

ALMA MATER STUDIORUM - UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

FACOLTA' DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA SPECIALISTICA IN INGEGNERIA CIVILE

DISTART - SCIENZA DELLE COSTRUZIONI -

TESI DI LAUREA

in

Meccanica dei materiali innovativi LS

**RICERCA DEGLI SCHEMI STRUTTURALI
DI EDIFICI STORICI E ANALISI DEL LORO
COMPORTAMENTO STATICO E DINAMICO**

CANDIDATO:

Eleonora Bersano

RELATORE:

Chiar.mo

Prof. Ing. Giovanni Pascale

CORRELATORI:

Prof. Ing. Odine Manfroni

Prof. Ing. Stefano de Miranda

Anno Accademico 2008-2009

Sessione prima

INDICE

INTRODUZIONE	1
1. CENNI STORICI	3
1.1 Archimede: primo ingegnere della storia	3
1.2 Il “De architectura” di Vitruvio	4
1.3 Il “De re edificatoria” di Leon Battista Alberti	6
1.4 Galileo Galilei e la nascita della scienza delle costruzioni	7
1.5 I simboli di Ruskin	9
1.6 I principi statici di Giovanni Battista Milani	10
2. SCHEMI STRUTTURALI RICORRENTI	12
2.1 Sistema pesante	12
2.1.1 Il trilito	13
2.1.2 Elementi verticali	15
2.1.2.1 Pilastro	15
2.1.2.2 Colonna	15
2.1.2.3 Parasta	17
2.1.2.4 Lesena	17
2.1.3 Elementi orizzontali	17
2.1.3.1 Architrave	17
2.1.3.2 Trabeazione	17
2.1.4 Esempi di trilito nella storia	18
2.2 Sistema pseudospingente	19
2.2.1 Pseudoarco	19
2.2.2 Pseudocupola	21
2.2.3 Esempi di sistemi pseudospingenti nella storia	22
2.3 Sistema spingente	23
2.3.1 L’arco	26
2.3.1.1 Tipologie di arco	28
2.3.1.2 Esempi di arco nella storia	30
2.3.2 La volta	31
2.3.2.1 Tipologie di volta	32
2.3.2.2 Esempi di volta nella storia	34
2.3.3 La cupola	36
2.3.3.1 Tipologie di cupola	37
2.3.3.2 Esempi di cupola nella storia	38
2.4 Sistema intelaiato	41
2.4.1 Fachwerk	42
2.4.2 Telaio in cemento armato	43
3. PRECEDENTI COSTRUTTIVI	44
3.1 L’architettura egizia	44
3.1.1 Tecniche costruttive	44
3.1.2 Le colonne	45
3.1.3 Dalla mastaba alla piramide	47
3.1.4 Le piramidi di Dahschur	49
3.1.5 La piramide di Chèope	50
3.2 La ziggurat sumera	54
3.3 L’edilizia antisismica cretese	56

3.3.1	L'architettura labirintica	56
3.3.2	Le colonne minoiche	58
3.3.3	Le fondazioni	59
3.4	L'architettura micenea	61
3.4.1	Le mura ciclopiche	63
3.4.2	La porta dei leoni	64
3.4.3	L'edilizia tombale e funeraria	66
3.4.4	Il tesoro di Atreo	68
3.4.5	La pseudocupola in giro per il mondo	69
3.4.5.1	In Italia: i nuraghi e i trulli	69
3.4.5.2	In India: la stupa	71
3.4.5.3	Nello Yucatan: la falsa volta	71
3.4.5.4	Nel Canada del nord: gli iglù	71
3.4.5.5	In Mongolia: la yurta	72
3.5	Innovazioni etrusche	72
3.5.1	Tempio a podio	73
3.5.2	Tombe	73
3.5.3	Arco e volta	74
3.5.3.1	Origini del sistema spingente	76
4.	IL TRILITE GRECO	78
4.1	Templi greci	78
4.1.1	Struttura del tempio dorico	80
4.1.2	I materiali e la costruzione	83
4.1.3	Dimensionamento degli elementi strutturali	84
4.1.4	Correzioni ottiche	86
4.1.5	Dispositivi antisismici	87
4.1.6	Una colonia: Paestum	88
4.1.7	Il Partenone	91
5.	LO SCHEMA SPINGENTE ROMANO	94
5.1	L'architettura curvilinea dello stato romano	94
5.2	Il Pantheon	95
5.2.1	La storia	96
5.2.2	Il modello e le imitazioni	97
5.2.3	La geometria	97
5.2.4	La costruzione	99
5.2.5	La struttura portante	101
5.2.6	Gusci di rivoluzione	108
5.2.7	Guscio sferico	109
5.2.8	Opus caementitium	115
5.3	Le fondazioni romane	118
6.	IL SISTEMA BASILICALE	119
6.1	L'architettura paleocristiana	119
6.1.1	La basilica cristiana	119
6.1.2	Copertura non spingente	122
7.	LE CUPOL BIZANTINE	124
7.1	Le cupole delle nuove capitali: Ravenna e Costantinopoli	124
7.1.1	Basilica di San Vitale	126
7.1.2	Basilica di Santa Sofia	130

7.1.2.1	La cupola	132
7.1.2.2	Costruzione e crollo della cupola	134
7.1.2.3	L'insostenibile leggerezza di Santa Sofia	135
8.	SISTEMI ORIENTALI	138
8.1	Verso l'oriente	138
8.2	L'architettura islamica	138
8.2.1	La moschea	139
8.2.2	La cupola della Rocca	140
8.3	I castelli nel deserto	142
8.4	La montagna di pietra: Borobudur	143
8.5	La giungla di pietra: Angkor	143
9.	LO SCHEMA SPINGENTE ROMANICO	145
9.1	Il romanico	145
9.1.1	Le chiese	145
9.1.2	Basilica di Sant'Ambrogio	147
9.1.3	Le volte su nervature a crociera	149
10.	LO SCHEMA STRUTTURALE GOTICO	150
10.1	L'arco	150
10.1.1	Statica grafica	150
10.1.2	Primo metodo di dimensionamento	152
10.1.3	L'arco a sesto acuto	153
10.1.4	Villard de Honnecourt	157
10.2	Il gotico	158
10.2.1	Le origini	158
10.2.2	Eugene Viollet-le-Duc	159
10.2.3	Dalla chiesa romanica alla cattedrale gotica	160
10.2.4	Volte costolonate a crociera	165
10.2.5	Morfologia dell'architettura gotica	167
10.2.6	I materiali	171
10.2.7	I tre organi strutturali	173
10.2.8	Ricostruzione di Saint-Denis	175
10.2.8.1	Il nartece	176
10.2.8.2	Il coro	177
11.	LA CUPOLA DOPPIA DEL RINASCIMENTO	179
11.1	La rinascita	179
11.1.1	La cupola di Santa Maria del Fiore	181
11.1.1.1	Il modello	181
11.1.1.2	Il problema	182
11.1.1.3	La soluzione	184
11.1.1.4	Il programma costruttivo	186
11.1.1.5	La spinapesce	191
11.1.1.6	La lanterna	192
11.1.1.7	Macchinari	193
11.1.1.8	Gotica o rinascimentale?	196
12.	LO SCHEMA SPINGENTE BAROCCO	198
12.1	Riflessione sull'evoluzione delle coperture fino all'età barocca	198
12.2	Il Barocco	200
12.2.1	La cappella della Sacra Sindone	202

12.3 Tra barocco e classicismo	204
12.3.1 L'incendio di Londra	204
12.3.2 Cattedrale di St. Paul	205
12.3.3 Catenaria	209
13. LO SCHEMA NEOCLASSICO	212
13.1 Il neoclassicismo	212
13.1.1 Il Pantheon di Parigi	214
13.2 In America	217
14. LE STRUTTURE METALLICHE	220
14.1 La ghisa	220
14.1.1 Coalbrookdale Bridge	221
14.1.2 Crystal Palace	222
14.1.3 Le biblioteche di Labrouste	223
14.1.4 La Galleria Vittorio Emanuele II	227
14.2 L'acciaio	228
14.2.1 La Torre Eiffel	232
14.2.2 La Galleria delle Macchine	234
14.2.3 Le travature reticolari	236
14.3 I primi grattacieli	238
14.3.1 Le Baron Jenney	238
14.3.2 Henry Sullivan	240
14.3.3 Daniel H. Burnham	241
14.4 Sviluppi delle strutture in acciaio nel Novecento	243
14.4.1 Richard Fuller	243
14.4.1.1 La cupola geodetica	245
14.4.1.2 La cupola geodetica di Montreal	247
14.4.2 Frei Otto	248
14.4.2.1 Volte a cavi tesi	249
14.4.2.2 Coperture dello Stadio di Monaco	251
15. LE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO	255
15.1 Il calcestruzzo armato	255
15.1.1 Storia e applicazioni	256
15.2 Il sistema intelaiato	257
15.2.1 Le Corbusier	259
15.3 Strutture a guscio	264
15.3.1 Pier Luigi Nervi	264
15.3.1.1 Il ferro-cemento	269
15.3.2 Edoardo Torroja	271
15.3.3 Felix Candela	273
16. LIMITI DIMENSIONALI	277
16.1 Muratura	277
16.2 Cemento armato	277
16.3 Acciaio	278
16.4 Cemento armato precompresso	281
16.5 Verso il futuro	282
16.6 Considerazione conclusiva	283
16.6.1 Le conoscenze tecnico-costruttive	283
16.6.2 La disponibilità ed il costo della manodopera	284

16.6.3 Risorse finanziarie ed entusiasmo opinione pubblica	285
17. PARTENONE: ANALISI STATICA E DINAMICA	288
17.1 Geometria	288
17.1.1 Caratteristiche pianta	289
17.1.2 Caratteristiche alzato	289
17.2 Modello agli elementi finiti	290
17.2.1 Modellazione colonne	291
17.2.2 Modellazione trabeazione	292
17.2.3 Modellazione cella e frontoni	293
17.2.4 Modellazione copertura	293
17.2.5 Condizioni di vincolo	294
17.2.6 Condizioni di carico	295
17.2.7 Combinazioni di carico	296
17.3 Analisi statica	296
17.3.1 Verifica reazioni vincolari	297
17.3.2 Verifiche di resistenza	298
17.3.2.1 Verifica compressione colonne	299
17.3.2.2 Verifica eccentricità delle colonne	301
17.3.2.3 Verifica trabeazione	305
17.3.2.4 Verifica graffe metalliche	305
17.3.2.5 Verifica travi di copertura	307
17.4 Analisi dinamica	311
17.4.1 Storia sismica	314
17.4.2 La colmata persiana	317
18. PALAZZETTO DELLO SPORT DI ROMA: ANALISI STATICA E DINAMICA	322
18.1 Geometria	322
18.1.1 Caratteristiche cupola	323
18.1.2 Caratteristiche cavalletti	324
18.2 Modello agli elementi finiti	325
18.2.1 Modellazione cavalletti	325
18.2.2 Modellazione calotta	326
18.2.3 Condizioni di vincolo	328
18.2.4 Condizioni di carico	328
18.2.5 Combinazioni di carico	329
18.3 Analisi statica	330
18.3.1 Verifica reazioni vincolari	331
18.3.2 Verifiche di resistenza	332
18.3.2.1 Verifica compressione cavalletti	332
18.3.2.2 Verifica presso-flessione cavalletti	333
18.3.3 Calcolo della precompressione nella fondazione	337
18.4 Analisi dinamica	339
18.4.1 Verifica del periodo proprio fondamentale	340

INTRODUZIONE

I tecnici delle costruzioni del nostro tempo si trovano in una situazione molto diversa da quella vissuta dai colleghi del passato che affrontavano i problemi progettuali basandosi esclusivamente sull'esperienza e sull'intuito. Essi godevano delle conoscenze tramandate nei secoli, attraverso la presenza stessa delle strutture sopravvissute, che chiarivano ciò che era possibile ottenere dal punto di vista costruttivo con i materiali che si avevano a disposizione. Inoltre, per riuscire a realizzare tutte quelle opere, grandiose o meno, essi dovevano certamente essere dotati di una grande capacità nel saper leggere la struttura e di una profonda sensibilità nel prevedere il suo comportamento futuro.

Nel XVI secolo, grazie alla mirabile attività di Galileo, ebbe inizio lo studio sistematico della Fisica e delle altre scienze naturali, consentendo la sperimentazione, la rappresentazione e l'interpretazione matematica dei fenomeni. Da quella *rinascita* ad oggi, gli sviluppi tecnici, industriali e sociali hanno consentito ad un numero di persone sempre crescente di dedicarsi alla ricerca scientifica, favorendo imponenti progressi in tutti i campi.

La ricerca sistematica circa lo studio delle costruzioni iniziò solo nel XVIII secolo e conobbe il suo periodo più fecondo nel secolo successivo, quando si diedero alla luce le prime e significative realizzazioni con l'utilizzo dei nuovi materiali quali acciaio e cemento armato. Questi consentirono l'adozione di nuove trame strutturali caratterizzate dalla presenza di elementi snelli e resistenti a flessione: telai, ponti sospesi, travi reticolari. Contemporaneamente, per motivi economici, cadde in disuso la vecchia muratura che aveva dominato la scena del costruito, dai primordi fino alla prima metà del XIX secolo.

L'entrata in uso dei *nuovi materiali* e l'adozione di forme strutturali particolari hanno reso necessaria la risoluzione di problemi di modellazione numerica molto impegnativi, volti all'interpretazione matematica del comportamento strutturale. Questo ha comportato un uso sempre più frequente dei codici calcolo per risolvere le strutture, pervenendo ad eccessi come quello di ritenere che il progetto lo faccia il calcolatore automatico. Inoltre, le numerose normative con regole e formule che

delimitano l'attività del costruire, da un lato sono state necessarie poiché hanno garantito la sicurezza dell'edificio a livello legale, ma dall'altro hanno obbligato la pratica progettuale entro binari sempre più stretti e dettagliati.

Con il passare del tempo, si è inesorabilmente giunti così ad un'atrofizzazione di quelle capacità critiche e intuitive del comportamento fisico della costruzione che, possedute dai costruttori del passato, erano le fondamenta delle loro opere e che, spesso, non sono più nel bagaglio culturale di quelli moderni. Si deve quindi oggi riacquisire la capacità di leggere gli edifici per individuarne la loro struttura, al fine di controllare al meglio la risposta strutturale e di analizzare criticamente i risultati forniti dai potenti e utili programmi di calcolo moderni.

In questa tesi, ripercorrendo a grandi linee la storia dell'ingegneria e dell'architettura, si cerca di capire quale sia stata l'evoluzione degli schemi strutturali adottati dai costruttori più antichi fino a quelli contemporanei, al fine di fornire le chiavi di lettura necessarie per analizzare le costruzioni del passato e quelle del presente. Si desidera quindi imparare a leggere l'edificio, mettendone in evidenza la struttura e spogliandolo da quegli elementi di abbellimento che ne nascondono lo scheletro portante, l'unico vero mezzo atto a sopportare i carichi.

A conclusione di tale ricerca, si svolge poi l'analisi statica e dinamica di alcune strutture esistenti, attraverso l'ausilio di un programma di calcolo agli elementi finiti, in modo da verificare a posteriori la bontà e la pertinenza delle scelte progettuali degli ingegneri del passato i quali, nonostante fossero privi dei moderni strumenti di calcolo, erano dotati di quelle doti intellettuali e professionali che hanno consentito alle loro opere di superare la verifica più onerosa: quella del tempo.

1. CENNI STORICI

1.1 Archimede: primo ingegnere della storia

Ai primordi della storia, la naturale e inevitabile esigenza di ripararsi dalle intemperie e insidie esterne, fu soddisfatta dall'uomo organizzando e sistemando i vuoti entro gli ammassi rocciosi, ricavando così in grotte e caverne lo spazio per il proprio rifugio. A quell'uomo primitivo nessuna nozione di meccanica delle strutture era certo necessaria, dato che nelle cavità la struttura era assente o meglio era presente in negativo, come in una pellicola fotografica.

Dopo qualche millennio, gli antichi costruttori di templi, fortezze e cattedrali non avevano ancora cognizione delle leggi statiche che sono alla base dell'analisi strutturale e ciò che guidò loro nella realizzazione dei monumenti furono l'esperienza e le regole della geometria.

Infatti, gli antichi affrontarono i loro problemi basandosi essenzialmente sulle esperienze di cantiere, dove erano impegnati contro le forze nelle quali inevitabilmente si imbattevano, costituite dai pesi dei materiali da spostare e da sollevare, e dove saggiavano concretamente la resistenza della costruzione qualora non si presentassero danni o addirittura crolli.

Inoltre, tra tutte le discipline di base di cui ci si dovrebbe occupare per approfondire lo studio della scienza del costruito, quella che fu utile fin dai tempi antichi, per riconoscere forme e misurare superfici e volumi, fu la geometria.

Gli artefici delle architetture formalmente perfette dei templi greci infatti, furono ispirati dalla geometria elaborata dall'intelletto speculativo ellenico ed ammirata dai pitagorici, con le sue magiche armonie e ritmiche contrapposizioni: pari-dispari, retto-curvo, destro-sinistro, pieno-vuoto, quadrato-rettangolo. La geometria di Pitagora e dei suoi seguaci, costituì una importante fase nello sviluppo di questa disciplina che continuò poi con Talete ed Euclide, passando da una pratica impegnata su problemi e regole della misurazione, ad una teoria volta alla definizione ed idealizzazione degli enti. Gli "Elementi" di Euclide furono un insieme di esemplari modelli del nuovo procedimento di sintesi, in

contrapposizione con il precedente metodo di analisi, nonostante non vi era mai alcun riferimento ad applicazioni pratiche.



Figura 1.1: Archimede

Archimede (287-212 a.C.), invece, pur riprendendo gli elementi euclidei non si limitò alla sola platonica teoricità del suo predecessore, ma fu un genio universale che visse la realtà del concreto e lasciò segni immortali nella storia dell'uomo, oltre a dare un notevole contributo al progresso scientifico. Infatti, insieme alle sue scoperte nell'ambito della geometria e dell'idrostatica, all'uso del metodo di *esaustione*, agli studi

sulla spirale, sulla quadratura del cerchio e della parabola, sui galleggianti, sulla leva e sulle indagini astronomiche, ebbe una schiera altrettanto grandiosa di successi nelle applicazioni pratiche. Gli storici a lui contemporanei lo esaltarono per il grande contributo dato dalle sue invenzioni quali: attrezzature militari, apparati meccanici per sollevare pesi con sforzi piccolissimi, sistemi di irrigazione, metodi per la determinazione del peso specifico di un materiale.

Egli fu quindi un matematico per il rigore logico delle sue limpide dimostrazioni, ma fu anche il primo ingegnere della storia, in quanto capace di applicare le sue teorie a problemi pratici che riuscì ad affrontare e a risolvere.

1.2 Il “De architectura” di Vitruvio

Durante il passaggio dalla repubblica all'impero romano, Vitruvio Pollione (I secolo a.C.) scrisse i dieci libri del “De architectura”. Presumibilmente redatto tra il 40 e il 15 a.C., è il più importante trattato dell'antichità giunto all'età attuale. In esso, l'autore affrontava gli studi di archeologia e di storia dell'arte antica,

menzionando e descrivendo gli edifici, gli architetti e gli ordini sia greci che romani. Affrontava tutti i problemi tecnici e teorici dell'edilizia, insistendo sul canone classico dell'equilibrio e della misura, aggiungendovi il decoro e gettando in tal modo le basi per la nascente edilizia imperiale. Vitruvio, inoltre, chiariva ed analizzava l'impianto dei Fori e degli edifici pubblici delle città romane, la costruzione delle basiliche, delle abitazioni private, delle terme, dei teatri, dei portici, dei porti e delle palestre. Forniva anche molte e preziose indicazioni sui materiali costruttivi, sulla tecnica di realizzazione dei muri, degli intonaci, degli stucchi, dei pavimenti e dei mosaici.

L'opera ebbe successo in età imperiale e, a differenza della poca attenzione riservatela dai medioevali, ebbe un grande seguito presso i teorici del Rinascimento italiano, a cominciare da Leon Battista Alberti.

Nel primo libro, Vitruvio descriveva le sei parti che, secondo la sua opinione, costituivano l'architettura; a proposito di tale suddivisione, si riporta il famoso brano:- L'architettura consta della *ordinatio*, in greco *taxis*, della *dispositio* che i greci chiamano *diatesis*, della *eurithmia*, della *simmetria*, del *decor*, e infine della *distributio* che in greco si dice *oikonomia*.

La *ordinatio* è la misura subordinata dei membri dell'edificio considerati uno ad uno e il giusto rapporto della proporzione generale rispetto al modulo. Essa si basa sulla quantità, in greco *posotes*, la quale consiste nel calcolo deduttivo dei moduli dai membri dell'opera e nell'armonica esecuzione dell'insieme in relazione alle singole parti di ciascun membro.

La *dispositio* è l'adatta messa in opera delle cose e l'elegante esecuzione dell'edificio nelle varie composizioni, dal punto di vista della qualità. Le figure della *dispositio* (in greco *ideai*) sono tre: *icnografia*, *ortografia*, *scenografia*, cioè pianta, alzato e disegno prospettico. [...] Queste figure nascono da *cogitatio* e da *inventio*; la *cogitatio* è cura (piena di studio e di vigile attività) al fine di conseguire l'effetto proposto con sensazioni piacevoli; la *inventio* è la spiegazione di problemi insoluti e l'impostazione, con un tratto di creatività, di un fatto nuovo. Queste sono le definizioni della *dispositio*.

L'*eurithmia* è la figura leggiadra e l'aspetto commisurato dei membri nella composizione; si ottiene quando i membri dell'opera sono, nelle tre dimensioni

armonici: di altezza rispetto alla larghezza e di larghezza rispetto alla lunghezza: quando insomma tutti corrispondono alla loro giusta commisurazione rispettiva.

La *simmetria* o commisurazione, è, appunto, il collegamento armonico dei singoli membri dell'edificio; più particolarmente è la corrispondenza proporzionale, computata a moduli (o frazioni di modulo), delle singole parti considerate in sé, rispetto alla figura complessiva dell'opera. Come nel corpo dell'uomo la qualità della euritmia è considerata dall'avambraccio, dal piede, dal palmo, dal dito, e dalle altre parti, così è anche nel perfetto e completo edificio. Nei templi, come primo esempio, si ricava dal diametro delle colonne, o dal triglifo, cioè dal modulo.

Il *decor* è il bell'aspetto dell'opera, composta da membri ben calcolati e commisurati con gusto e sapienza. Si ottiene dalla *statio*, o modo di stare (in greco *tematismos*), dalla consuetudine, o per natura. Per il modo di stare, quando si costruiranno edifici a cielo aperto, o ipertrali, a Giove Folgore, al Cielo, al Sole, alla Luna; le manifestazioni di questi dei infatti noi le vediamo concretarsi nel cielo aperto e luminoso. A Minerva e a Marte e ad Ercole si faranno templi dorici, poiché a queste divinità guerresche convengono edifici senza minute raffinatezze. A Venere, Flora, Proserpina o alle Ninfe delle fonti sembreranno più adatti i templi corinzi, giacché queste divinità, data la loro tenerezza, sembrerà edifici più snelli e ornati con fogliame e volute abbiano un decoro più confacente. Per Giunone, Diana, Libero Padre e le altre divinità di questo tipo, si terrà in giusto conto la via di mezzo se si costruiranno templi ionici, adottando una giusta temperanza di proprietà fra la severità dei dorici e al leggerezza dei corinzi[...].

La *distributio* consiste nella misurata attribuzione di materiale e di area, e nella oculata parsimonia di spesa nel costruire[...]-. (Vitruvio, I sec. a.C.)

1.3 Il “De re aedificatoria” di Leon Battista Alberti

Leon Battista Alberti (1404-1472) fu un architetto ed un teorico che oltre alle sue opere architettoniche, quali il tempio Malatestiano di Rimini, è passato alla storia per le sue opere letterarie, di cui si ricorda, poiché interessante ai fini dello studio intrapreso, il “De re aedificatoria” del 1452. Questo trattato venne completato poi

dall'opuscolo sui "Cinque ordini architettonici", dove appare chiara l'ispirazione di matrice vitruviana.

Egli affermava che l'edificio debba possedere tre fondamentali qualità:

1. *utilitas*: la funzionalità, cioè l'edificio deve essere a misura d'uomo e deve essere realizzato in funzione dell'uomo;
2. *firmitas*: la fermezza. È un concetto vitruviano che si traduce nella: - saldezza delle fondazioni e nella accurata scelta dei materiali-. (S. Di Pasquale, 1998);
3. *venustas*: la bellezza, raggiunta con l'insieme armonioso delle parti costituenti la fabbrica.

Uno dei concetti fondamentali del pensiero albertiano fu quello dell'unità strutturale che, come si riscontra dal seguente brano, trova giustificazione in quella dello stesso corpo umano:- In natura i corpi degli esseri animati risultano strutturati in modo tale che le ossa non restino in nessun punto staccate tra loro. Allo stesso modo le ossature saranno da riunire alle ossature, ed esse tutte da rafforzare nel modo più opportuno con nervi e legamenti; sicché la successione delle ossature, collegate tra loro, risulti tale da resistere da sola, quand'anche ogni altro elemento venisse a mancare, perfettamente conchiusa nella solidità della sua membratura-. (L.B.Alberti, 1452)

Siccome la struttura è in perfetta armonia con ogni singolo elemento che la costituisce:- il concetto formulato dall'Alberti sull'unità costruttiva precorre la nozione di equilibrio strutturale-. (E. Benvenuto, 1981)

1.4 Galileo Galilei e la nascita della scienza delle costruzioni

Il padre fondatore della scienza delle costruzioni fu Galileo Galilei (1564-1642) che compì le prime ricerche sulla resistenza dei materiali, pubblicate poi nel trattato di meccanica: "Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze" del (1638).

Giova ricordare però che le più grandi costruzioni in muratura erano già state realizzate prima che il pisano scrivesse i suoi Discorsi. Oggi si dice che esse soddisfacessero alle regole non della scienza, ma dell'*arte del costruire*; cioè i costruttori dell'epoca conoscevano le tecniche costruttive, i materiali e le forme, ma nulla sapevano di stabilità e di resistenza della fabbrica

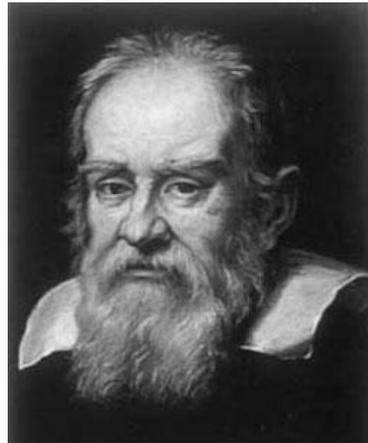


Figura 1.2: Galileo Galilei

da realizzare. Non è lecito pensare però che successi o crolli delle strutture antiche fossero governati dal caso e che il committente avrebbe consentito l'apertura del cantiere senza garanzie circa la riuscita dei lavori. Infatti, Galileo ha parlato di una nuova scienza inerente al modo con cui si valutava il comportamento strutturale, soprattutto di travi e colonne, come si può notare nelle figure 1.3 e 1.4, convinto che il problema fosse stato già affrontato dai suoi predecessori, seppur in maniera diversa.

La grande innovazione da lui introdotta fu la possibilità di una preventiva conoscenza degli effetti una volta che si siano stabilite le cause, cioè di conoscere il comportamento dell'elemento strutturale sotto carichi assegnati, prima della propria messa in opera. Prima di lui esistevano solamente forme finali di controllo, tarate sugli effetti causati dalle forze (anche se il concetto di *forza* ancora non era stato elaborato) ben visibili in cantiere, come quello di valutare il comportamento di una volta all'atto del disarmo del sostegno usato per realizzarla. La scienza del *sapere prima del fare*, nata con Galilei, impiegò quasi due secoli per diventare, con i due matematici C.A.Cauchy e S.D.Poisson, Scienza delle Costruzioni. Una disciplina in grado di dare risposta ai problemi che il costruire pone continuamente, almeno a livello formale.

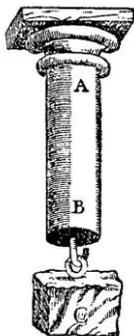


Figura 1.3: colonna caricata (Galilei, 1638)



Figura 1.4: trave (Galilei, 1638)

1.5 I simboli di Ruskin

Prima dell'innovazione portata nel mondo delle costruzioni dai materiali resistenti a trazione, i materiali che venivano usati erano sempre gli stessi e cioè: pietre, malte, mattoni e legno. Questi consentivano la realizzazione di una gamma limitata di schemi strutturali ed infatti, spogliando i monumenti dei loro valori formali e stilistici, si ritrovano sempre: *sistemi trilitici, sistemi voltati e sistemi a cupola*. Si tratta in tutti i casi di muri, archi, colonne, architravi, piattabande, volte e cupole realizzati in muratura e cioè un materiale che, dal punto di vista meccanico, può essere impiegato nella compagine strutturale solo se sottoposto a sforzi di compressione.

A tale riguardo, è utile citare il lavoro condotto da John Ruskin nelle sua opera "Stones of Venice" (1850-1852), in cui nel VI capitolo dedicato a "La natura del gotico" sostiene: -Ora ci sono tre grandi architetture nel mondo, e non potrebbero essere di più, corrispondenti a ognuno dei tre sistemi fondamentali di coperture di uno spazio...che fanno capo ai tre ceppi originari:

- A) greco: architettura dell'architrave
- B) romanico: architettura dell'arco a pieno centro
- C) gotico: architettura del tetto inclinato [...].

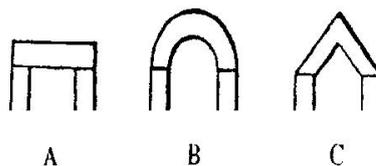


Figura 1.5: simboli delle architetture (Ruskin, 1852)

[...] l'architrave, l'arco a pieno centro e l'arco acuto. Nessun architetto al mondo troverà mai un sistema diverso da questi per costruire un ponte sopra uno spazio vuoto-. (Ruskin, 1852)

In tal modo, cioè come riportato dalla figura 1.5, Ruskin riuscì a mettere in evidenza i caratteri fondamentali e nel contempo le differenze tra architettura greca, romanica e gotica, usando tre elementari simboli: un segmento rettilineo, un segmento curvilineo ad arco con la concavità verso il basso e uno analogo, ma con la concavità rivolta verso l'alto. Dei tre, l'ultimo non fu preso in considerazione, poiché non rappresentava una forma generabile con pietre e

mattoni, anche se archi rovesci erano talvolta usati nelle opere di fondazione e al suo tempo i primi ponti sospesi fossero appena comparsi.

Il segmento rettilineo è base del sistema costruttivo trilitico realizzato con colonne e travi, tipico di templi greci come il Partenone, ma anche di costruzioni moderne fatte di pile di sostegno e di travi appoggiate su di esse. La differenza rispetto al passato sta nella distanza tra gli appoggi che è molto maggiore, grazie a travi in acciaio e al cemento armato, che consentono di coprire grandi luci senza spezzarsi.

Il segmento curvilineo rappresenta, invece, l'arco a tutto sesto, tipico dell'architettura romana e poi romanica, mentre l'arco acuto viene rappresentato con un segno triangolare che simboleggia la forma del tetto usato per la copertura delle cattedrali gotiche.

1.6 I principi statici di Giovanni Battista Milani

Giovanni Battista Milani, nella prima parte della sua opera intitolata "L'ossatura murale", risalente al 1920, sosteneva che le strutture si possono dividere in:

- 1) strutture di sostegno, come: piedritti, colonne, pilastri ecc.
- 2) strutture di copertura, come: volte, solai, tetti, cupole ecc.

Inoltre, i suoi studi lo hanno portato ad affermare che, prima dell'avvento dei nuovi materiali elastici come ferro e cemento armato, tutti gli infiniti monumenti architettonici di ogni epoca e di ogni regione, si possono raggruppare secondo due principi costruttivi fondamentali:

- I) principio dell'architrave: elemento orizzontale sostenuto da due verticali;
- II) principio della volta: sistema costituito da due o più elementi che si appoggiano mutuamente o da un unico elemento curvilineo che insistono su due elementi verticali.

La distinzione tra questi due sistemi statici sta nelle azioni che la copertura trasmette ai sostegni. Infatti, nel primo caso la copertura pesa sull'appoggio, trasmettendo solamente azioni dirette nel senso verticale, mentre nel secondo caso essa esercita anche un'azione di spinta diretta in obliquo.

2. SCHEMI STRUTTURALI RICORRENTI

Ripercorrendo la storia delle costruzioni e analizzando le interazioni tra gli elementi strutturali degli organismi architettonici, si nota la ricorrenza di comuni sistemi statici-costruttivi che si possono raggruppare secondo la seguente classificazione:

1. *Sistema pesante*
2. *Sistema pseudo-spingente*
3. *Sistema spingente*
4. *Sistema intelaiato*

Si ricorda che:- la separazione netta tra sistemi costruttivi, utilizzata per caratterizzare le grandi epoche dell'architettura, appare nel suo pensiero legata da un processo continuo di trasformazione, conseguenza inevitabile per chi ha la capacità di ragionare sulle decisioni che hanno condotto all'individuazione di tecniche e di forme via via più rispondenti alla natura dei materiali disponibili e al loro corretto impiego-. (Di Pasquale, 2003)

2.1 Sistema pesante

Viene anche chiamato *sistema trilitico o non spingente*, ed è basato sul principio dell'orizzontamento semplicemente appoggiato sui sostegni. Le forze in gioco sono solo le azioni verticali e le reazioni vincolari anch'esse verticali, poiché il vincolo tra orizzontamento e sostegno è un appoggio semplice che garantisce indipendenza tra i due elementi. Comprende tutte le strutture capaci di scaricare pesi secondo la verticale, in cui la sollecitazione è di compressione per gli elementi di sostegno (colonne, pilastri) e di presso-flessione per le relative connessioni orizzontali (architravi, trabeazione).

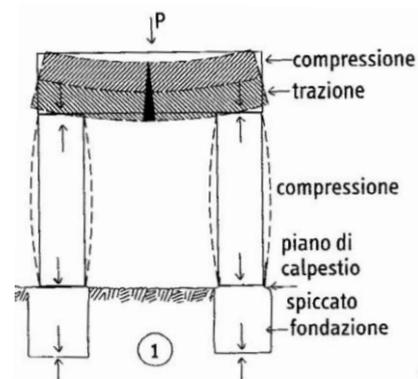


Figura 2.1: sistema trilitico (Giuliani, 2006)

2.1.1 Il trilito

Il *trilito* è il più antico e diffuso dei sistemi costruttivi e, come si deduce dalla sua etimologia, risulta composto da tre elementi monolitici. due sostegni verticali chiamati *ritti*, *pilastrini* o *piedritti* e una traversa sovrapposta, indicata con il termine *giogo* o *architrave*. Quest'ultima è un solido vincolato con appoggio semplice che, sollecitato verticalmente dal proprio peso e da quello dell'eventuale carico sovrastante, si deforma presentando la porzione superiore della sezione compressa e quella inferiore tesa. Essa è quindi soggetta alle sollecitazioni di flessione e taglio.

A seconda del materiale con cui vengono realizzati gli elementi, si possono distinguere i seguenti schemi strutturali:

- *Schema con sostegni ed orizzontamenti anelastici*, cioè in materiale lapideo naturale o artificiale che non resistendo a trazione obbligano a disporre i piedritti molto vicini tra loro, riducendo la superficie utilizzabile, per evitare la frattura dell'architrave a causa della sua inflessione. Esempi sono il sistema trilitico delle sale ipostile egizie e dei templi greci.
- *Schema con sostegni anelastici ed orizzontamenti elastici*, cioè gli elementi trasversali sono realizzati in legno, metallo o cemento, armato con tondini di ferro. Date le proprietà elastiche di tali materiali che consentono di resistere alle sollecitazioni di trazione, flessione e taglio, la luce tra gli elementi di sostegno può aumentare e con lei la superficie utilizzabile della pianta dell'edificio. Esempi sono le antiche basiliche cristiane con capriate lignee sulle murature longitudinali, le coperture ottocentesche realizzate con profilati metallici semplicemente appoggiati agli elementi di sostegno e i moderni orizzontamenti elastici in cemento armato.
- *Schema con sostegni ed orizzontamenti elastici*, in cui elementi vengono assemblati per realizzare un'ossatura con orizzontamenti indipendente dai piedritti. Esempi sono le strutture metalliche con collegamenti a cerniera o le strutture in cemento armato prefabbricato.

Si ricorda che tutti gli esempi citati, nonostante siano realizzati con materiali dalle caratteristiche diverse, appartengono alla categoria del sistema pesante o non spingente, le cui caratteristiche fondamentali sono riassunte nei due punti seguenti:

1. indipendenza tra sostegno ed orizzontamento → vincolo di cerniera;
2. azioni e reazioni verticali → assenza di spinta.

La parte di parete che grava sull'architrave non corrisponde all'intera massa che insiste su di essa in direzione verticale, ma è limitata all'incirca al prisma triangolare che ha come base il triangolo equilatero di lato pari alla luce

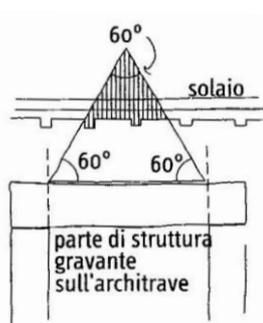


Figura 2.2: triangolo di carico
(Giuliani, 2006)

dell'architrave stesso, come evidenziato in figura 2.2. Infatti, quando un muro è coinvolto in una traslazione verticale, dovuta per esempio ad un cedimento delle fondazioni, la lesione che si verifica nella struttura ha un andamento parabolico e la porzione di materia che è al di sopra di tale lesione non è trascinata nel crollo.

Questo fenomeno si chiama *crollo ad arco naturale* ed è riportato nella figura 2.3:

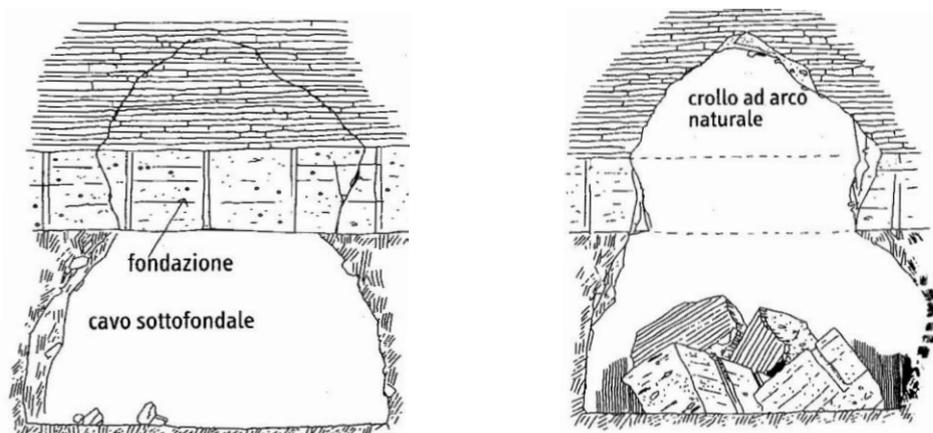


Figura 2.3: crollo ad arco naturale (Giuliani, 2006)

L'esperienza di tale possibile dissesto ha suggerito fin dall'antichità di inserire in corrispondenza dei punti deboli, dovuti per esempio alla realizzazione di aperture nella parete, un *arco di scarico* (sordino) per convogliare le sollecitazioni sui maschi murari laterali. Di ciò ne parlò lo stesso Vitruvio: - dobbiamo anche cercare di alleviare il peso della muratura per mezzo di archi [...] perché quando

questi [...] sono prolungati oltre le travi o gli architravi, per prima cosa il legno sollevato dal carico non si fletterà, e poi, se deperisse nel tempo sarebbe facile sostituirlo senza bisogno di puntelli-.

2.1.2 Elementi verticali

Si possono elencare i seguenti elementi verticali, codificati nel corso degli anni dal linguaggio architettonico:

- pilastro
- colonna
- parasta
- lesena

Dei quali, lesena e parasta risultano patrimonio del mondo classico, mentre colonna e pilastro presentano una grande varietà di applicazioni e una propria evoluzione storica.

2.1.2.1 Pilastro

È un elemento portante ad asse verticale che sostiene architravi, archi e volte. Si chiama anche *piedritto* ed è il corrispettivo evoluto dell'elemento di sostegno verticale presente nel trilito. Può essere in materiale litico o in muratura, talvolta figurato o istoriato, a base quadrata, rettangolare, poligonale o composita, come si vede dalle tipologie rappresentate in figura 2.5.

Tipologia caratteristica del Medioevo fu quella del pilastro *polistilo*, la cui struttura è movimentata dalla presenza di colonne addossate.

Tipico dell'era moderna è il pilastro *a fungo*, concluso in sommità con un tronco di cono o di piramide rovesciati, per allargare la superficie di appoggio, in modo da connettere la base della struttura con le solette di solaio, evitando il fenomeno del *punzonamento*.

2.1.2.2 Colonna

La colonna è un elemento di sostegno con funzione portante, costituita da un fusto a sezione circolare poggiante su di una base e concluso in alto da un capitello. La

forma del fusto e quella del capitello sono riferibili ai vari ordini architettonici e hanno subito notevoli modifiche con il passare delle epoche. Infatti, il fusto può essere rastremato in basso o in alto, scanalato, rudentato (se nella scanalatura compare un motivo che

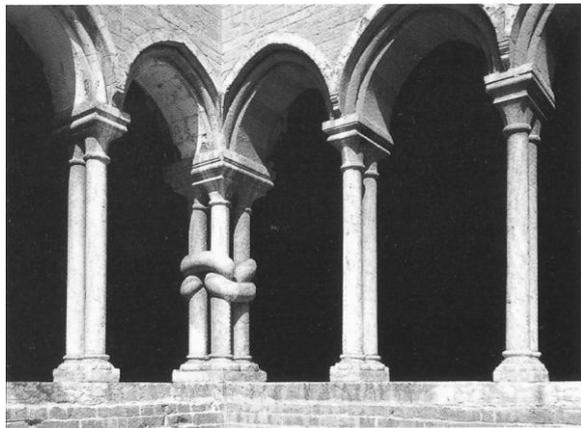


Figura 2.4: Colonne binate e annodate nel chiostro dell'abbazia di Chiaravalle della Colomba, XIII secolo (Bussagli, 2003)

si estende nel terzo inferiore, tipo treccia, bastoncino o corda), o liscio. Inoltre, alle tipologie del mondo greco-romano, si aggiunsero quelle medioevali, (annodata come in figura 2.4, salomonica), del tardo Cinquecento (bugnata), del Barocco (tortile e vitinea) e dell'epoca moderna (in acciaio senza capitello).

La colonna può essere monolitica oppure costituita da rocchi o mattoni accuratamente lavorati e ricoperti. Si differenzia anche in base alla propria posizione: binaria se in coppia, angolare se posta in angolo, addossata se sfiora la parete, incassata se inglobata nel pilastro. Si parla di *semicolonna* nel caso in cui sporgesse solo per metà dalla parete.

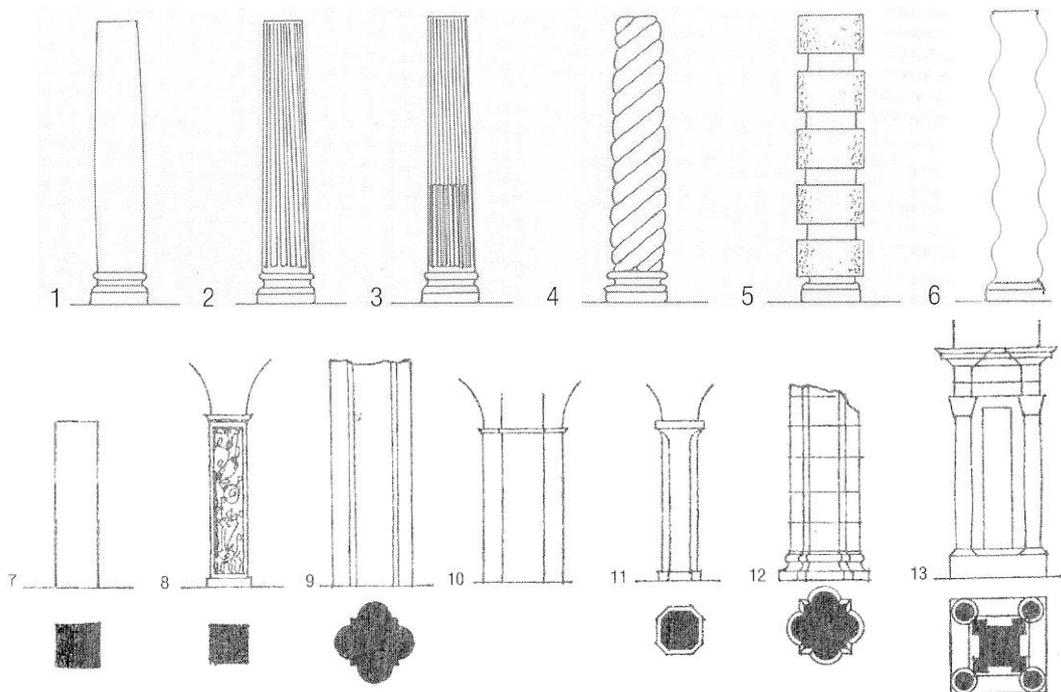


Figura 2.5: Tipologie di colonne e pilastri (Bussagli, 2003)

LEGENDA

1) colonna liscia; 2) colonna scanalata; 3) colonna rudentata; 4) colonna tortile; 5) colonna rustica; 6) colonna salomonica; 7) pilastro quadrato liscio; 8) pilastro decorato; 9) pilastro polistilo; 10) pilastro romano; 11) pilastro romanico; 12) pilastro gotico; 13) pilastro composito rinascimentale.

2.1.2.3 Parasta

La parasta è un semipilastro che sporge appena dalla parete, svolgendo la funzione portante di sostegno.

2.1.2.4 Lesena

La lesena, nonostante sia simile alla parasta nell'aspetto, non ha ruolo strutturale, ma è puramente decorativa.

2.1.3 Elementi orizzontali

Gli elementi orizzontali del sistema non spingente che, in quanto tali si appoggiano a quelli di sostegno verticali e sono soggetti a presso-flessione, possono essere:

- architrave
- trabeazione

2.1.3.1 Architrave

Il termine architrave è di origine rinascimentale e significa esattamente trave principale. Nel mondo antico era in materiale litico o in legno e veniva chiamata *epistylon*, mentre nel Medioevo *trabes*. Nell'era attuale la chiamiamo architrave o anche trave.

2.1.3.2 Trabeazione

La trabeazione è l'apparecchio architettonico portante a sviluppo longitudinale che poggia sugli elementi di sostegno e costituisce le basi del tetto dell'edificio. Essa è tipica dei templi greco-romani in cui si prestava articolata in architrave,

fregio e cornice. A partire dal Medioevo e poi sempre più frequentemente dal XV secolo, le trabeazioni, considerate elemento architettonico caratteristico del mondo antico, vennero riproposte con il valore di emulazione della classicità. Al medesimo modello antico si ispirano oggi le cornici marcapiano delle facciate dei palazzi e dei campanili.

2.1.4 Esempi di trilite nella storia

I primi esempi di trilite sono forniti dai quei monumenti preistorici megalitici chiamati *dolmen* (dal bretone *dol*: tavola e *men*: pietra) aventi la funzione di tombe a camera, diffuse tra il 4000 e il 1000 a.C. in Europa ed in Asia, di cui un esempio della zona di Bari è riportato in figura 2.6. Da menzionare anche l'enigmatico complesso di Stonehenge (si veda figura 2.7), uno dei tanti *cromlech* (dal bretone *crom*: rotondo e *lech*: pietra), cioè costruzioni circolari, diffuse nell'Europa occidentale e nell'Africa settentrionale. Quindi le prime strutture della storia erano semplicemente costruite con due pietre infisse in verticale nel terreno e sormontate da una terza, sovrapposta in orizzontale.

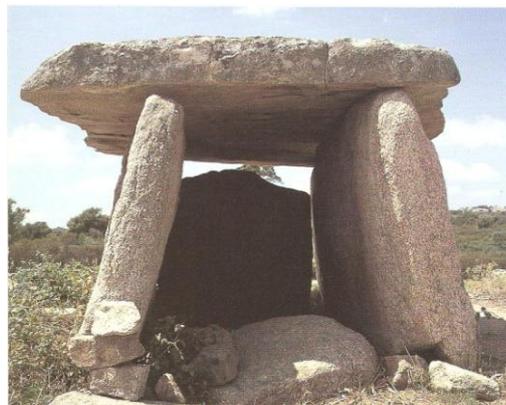


Figura 2.6: Dolmen neolitico a Bisceglie (Adorno, 1986)



Figura 2.7: Cromlech di Stonehenge, 2200-1300 a.C.

Nell'antichità, il sistema trilitico fu in larga parte utilizzato per la realizzazione di templi greci ed anche romani, in cui l'architrave, direttamente sostenuta dal capitello, è l'elemento portante dei tre che compongono la trabeazione: architrave, fregio e cornice nell'ordine (figura 2.8). Ciò è vero da un punto di vista formale, mentre a livello strutturale, la funzione resistente è garantita da un unico blocco la cui facciata è distinta in architrave, posto in basso, e fregio, posto in alto.

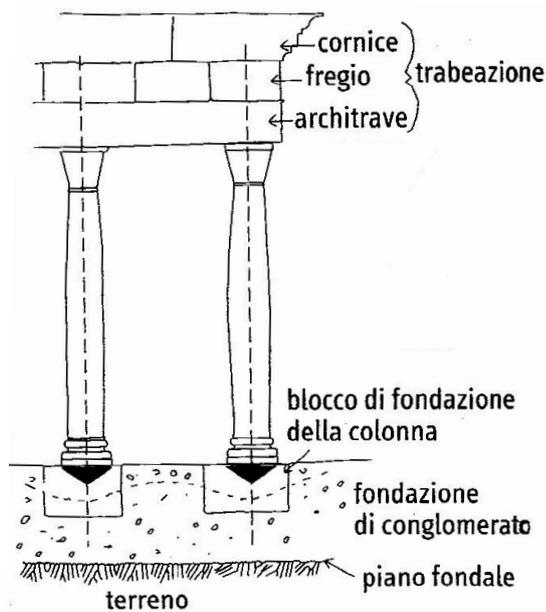


Figura 2.8: trilito nel tempio (Giuliani, 2006)

Come già ricordato, oltre che nell'arte greca, il trilito fu adottato anche in quella egiziana, nelle basiliche pagane e cristiane, negli edifici antichi e recenti, ad impalcatura con sostegni e orizzontamenti indipendenti tra loro.

2.2 Sistema pseudospingente

Il sistema pseudospingente è una forma strutturale di passaggio tra il sistema pesante e quello spingente. Infatti, dal punto di vista statico, si basa ancora sulla trasmissione verticale delle forze come nel trilito, ma per supplire alle carenze resistive dei materiali litici e quindi superare maggiori luci, in esso si dispongono gli elementi in modo da conferire all'orizzontamento una forma che sarà propria del sistema arcuato.

2.2.1 Pseudoarco

Per definire un arco non è sufficiente dire che si tratta di una struttura con asse curvo impostata su due piedritti con la funzione di coprire un vano, perché

altrimenti, si potrebbe cadere nell'errore di definire come tale anche lo *pseudoarco*. Infatti, per quanto riguarda il procedimento costruttivo, la disposizione ed il comportamento statico degli elementi, arco e pseudoarco sono completamente differenti. Il sistema a *pseudoarco* si distingue dal sistema ad arco perché i pesi degli elementi sostenuti scaricano sui piedritti, generando solo sforzi verticali e mai spinte laterali, come nel trilito.

Si possono avere due principali varianti:

1. pseudoarco realizzato con un unico concio modellato ad arco;
2. pseudoarco realizzato con vari conci sovrapposti in aggetto progressivo rispetto ai piedritti fino alla sommità.

Per quanto riguarda la prima tipologia, bisogna sottolineare che, soprattutto nel caso in cui lo pseudoarco è di luce molto ridotta, si ha quasi l'impressione che si tratti semplicemente di un architrave di grossa sezione scavato ad arco nella sua parte inferiore. In tal caso, essendo monolitico, l'elemento incastrato agli estremi lavora come la combinazione di un architrave centrale e di due mensole laterali e le forze si scaricano prevalentemente in direzione verticale. Si riportano in figura 2.9 due esempi di pseudoarchi monolitici:

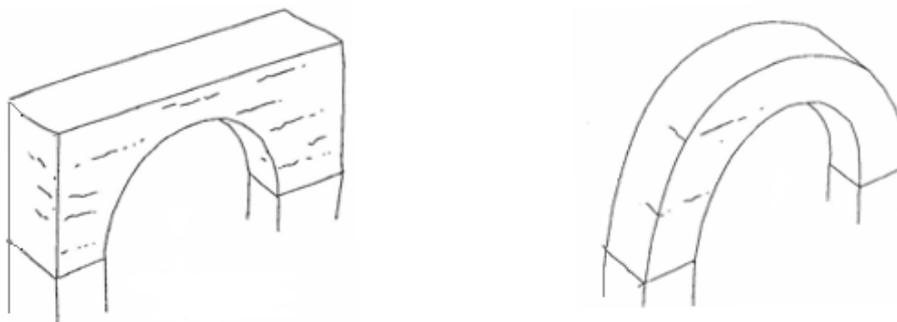


Figura 2.9: pseudoarchi monolitici (Giuliani, 2006)

Giova ricordare che talvolta, il comportamento dello pseudoarco è molto vicino a quello dell'arco reale o almeno a quello naturale. Ciò può essere causato dall'apertura di fratture in corrispondenza delle reni che possono determinare il passaggio dal sistema pseudospingente a

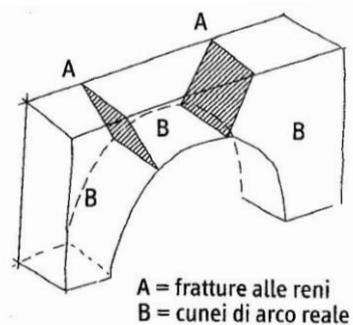


Figura 2.10: passaggio da pseudoarco ad arco (Giuliani, 2006)

quello spingente o arcuato, come schematizzato in figura 2.10.

La seconda tipologia è molto più diffusa e si realizza con tanti conci aggettanti di poco l'uno sull'altro fino alla mezzeria, in modo che i pesi si trasmettano verticalmente, senza alcuna spinta orizzontale e il materiale risulti interamente compresso. Spesso, per ragioni estetiche, si rende la superficie interna continua tramite colpi di scalpello che eliminano gli scalini interni altrimenti presenti, come si vede in figura 2.11.

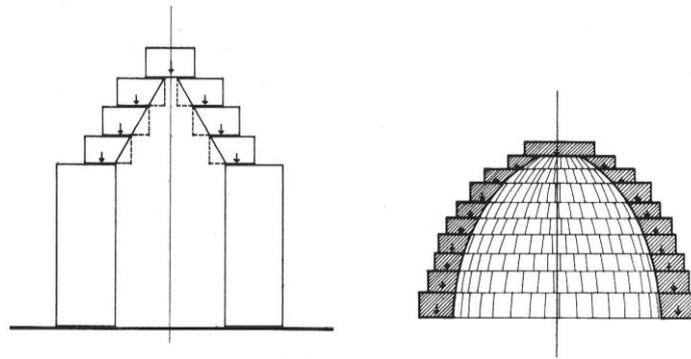


Figura 2.11: pseudoarco e sezione di pseudovolta a conci aggettanti (Cataldi, 1979)

2.2.2 Pseudocupola

Estendendo spazialmente lo pseudoarco, mediante rotazione, si ottiene la *pseudovolta a pianta circolare o pseudocupola*; essa risulta costituita da blocchi squadrati sovrapposti in modo da formare cerchi concentrici aggettanti ciascuno su quello inferiore, con diametro decrescente verso l'alto, in modo da chiudere l'intero volume con un solo blocco. Nonostante la configurazione con ricorsi in aggetto successivo conferisse stabilità ad ogni anello, avvicinando la struttura a quella di una cupola naturale e limitando il fenomeno del ribaltamento, spesso si trova un pilastro centrale per sostenere il blocco centrale e garantire così maggior sicurezza.

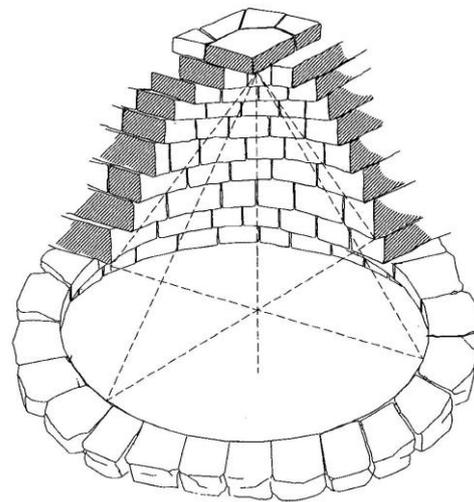


Figura 2.12: tholos ad anelli concentrici decrescenti (Giuliani, 2006)

2.2.3 Esempi di sistemi pseudospingenti nella storia

Per la semplicità di concezione, la forma strutturale dello pseudoarco si incontra in ogni epoca, ma soprattutto in regioni e in culture talmente lontani tra loro, da rendere impossibile ogni scambio culturale, come dimostrato dai seguenti esempi:

- nuraghi sardi;
- trulli pugliesi;
- tholoi delle antiche civiltà del bacino mediterraneo;
- stupa buddiste;
- archi a mensola maya;
- igloo eschimesi.

Gli esempi più antichi si riconoscono nella copertura interna della piramide di Dahschur (2590-2570 a.C.) e nelle *tombe a tholos* della civiltà minoica e micenea (1570 a.C. circa), riportate nelle figure 2.12 e 2.13. Un altro mirabile e monumentale esempio di pseudocupola monolitica è la copertura del Mausoleo di Teodorico a Ravenna risalente al 526, raffigurato nella immagine 2.14. Essa venne realizzata con un unico blocco lapideo in pietra d'Istria, caratterizzato da un diametro di 10,76 metri, da uno spessore di quasi 1 metro e da 230 tonnellate di peso.



Figura 2.13: Piramide di Dahschur, III millennio a.C.

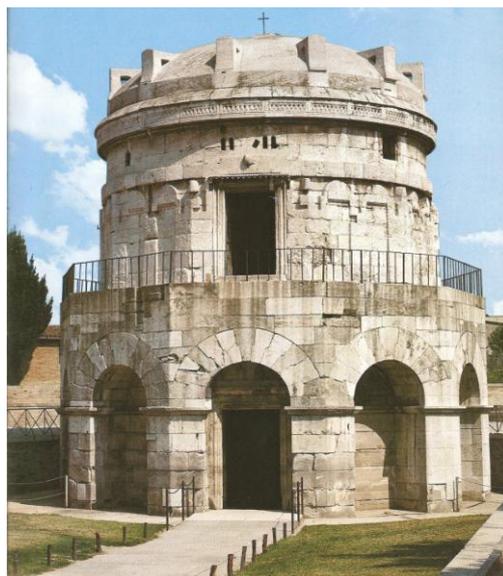


Figura 2.14: Mausoleo di Teodorico, Ravenna, VI secolo

2.3 Sistema spingente

Il sistema spingente è basato sul principio dell'arco o della volta, comprendendo quelle strutture capaci di scaricare pesi secondo direzioni diverse da quella verticale. L'arco, si può considerare un orizzontamento che, ricevendo dalle strutture che sostiene azioni di peso agenti in direzione verticale, le trasmette ai sostegni in direzioni inclinate. Queste azioni trasmesse (R) si scompongono in due componenti: una verticale che è un'azione di peso (N), ed una orizzontale che è la *spinta* (S). Quest'ultima è quindi una forza che tende a ribaltare i piedritti e la pressione che gli elementi costituenti l'arco si scambiano è di intensità crescente mano a mano che ci si avvicina all'imposta. La grande novità introdotta con il sistema spingente rispetto a quello non spingente è che, usando lo stesso materiale anelastico (pietra, laterizio, conglomerato), tagliato e conformato in maniera acconcia, si possono realizzare orizzontamenti di gran luce in quanto tutte le sezioni risultano sollecitate a compressione, che è uno sforzo che il materiale in questione riesce a sopportare benissimo.

Lo schema strutturale di un sistema spingente può venire rappresentato nelle seguenti due maniere, riportate in figura 2.15:

1. due solidi ad asse rettilineo inclinati, messi in contrasto tra loro e appoggiati sui due sostegni ad asse rettilineo verticale;
2. due solidi ad asse curvilineo messi in opposizione tra loro in chiave e appoggiati sui due sostegni ad asse rettilineo verticale.

Il primo schema strutturale è quello di un tetto a falde con due puntoni che gravano sui muri perimetrali della costruzione, mentre il secondo è il classico arco impostato sui piedritti

Nel sistema spingente, oltre alla verifica di compressione utilizzando la componente verticale, è necessario effettuare anche la verifica al ribaltamento del piedritto, con la componente orizzontale della spinta

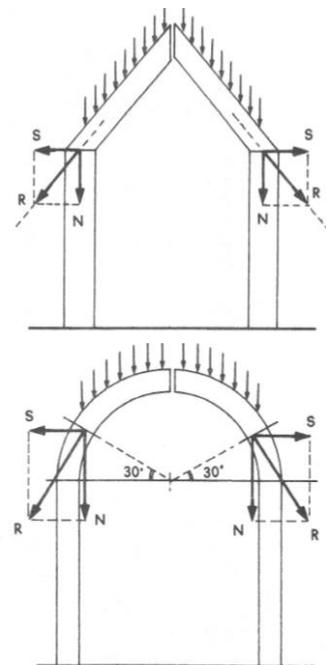


Figura 2.15: Schemi di sistema spingente (Caleca, 2000)

che non deve essere di un'entità tale da rovesciarlo. Qualora la direzione e l'intensità dell'azione che l'orizzontamento trasmette al piedritto non garantisca la stabilità del sistema, si può ridurre o azzerare l'azione spingente opponendo la resistenza passiva di masse inerti o affiancando un altro sistema spingente che esercita una controspinta equilibrante, seguendo due differenti principi di seguito descritti.

1. *Principio delle resistenze passive o delle masse inerti*

Si può aumentare il peso del piedritto realizzandolo con materiale di maggiore peso specifico, oppure sovrapponendogli masse che ne aumentano il peso, in modo che la risultante delle azioni trasmesse dall'orizzontamento al sostegno con il peso maggiorato si avvicini alla verticale e cada entro il nocciolo centrale di inerzia della sezione di base. Esempi di tali masse inerti sono i pinnacoli delle chiese gotiche coperte da grandi sistemi voltati.

Si può anche decidere di aumentare le dimensioni della sezione del piedritto, affinché la linea d'azione della risultante cada più facilmente all'interno del nocciolo della sezione di base. Esempi sono le masse murali poste a contrafforte negli edifici romani e i contrafforti delle chiese romaniche e gotiche.

2. *Principio delle resistenze attive o delle controspinte*

Si riduce l'azione orizzontale di un sistema spingente, affiancando ad esso un altro sistema spingente che esercita un'azione di verso contrario a quella del precedente. Riferendosi alla figura 2.16, si nota come le due forze prodotte dagli orizzontamenti contigui (A_1 e A_2) si combinano in forma vettoriale e, nel caso in cui siano uguali in modulo, le due componenti orizzontali si annullano (S_1 e S_2), mentre quelle verticali si sommano (N_1 e N_2) ed il piedritto in comune risulta uniformemente compresso. Esempi sono i diffusi porticati ad arcate che si appoggiano su esili colonne intermedie in

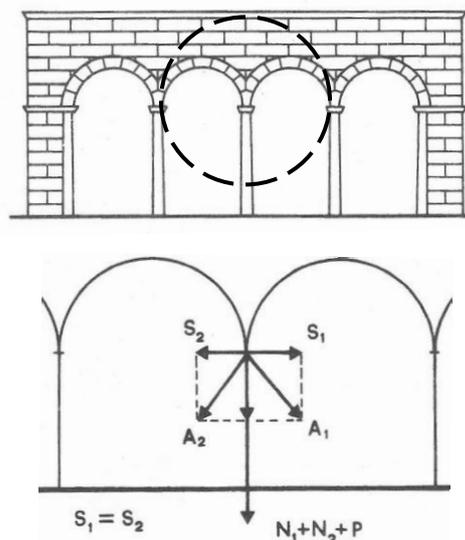


Figura 2.16: Principio delle resistenze attive applicato ad un porticato (da Caleca, 2000)

materiale lapideo, ma che necessitano alle due estremità di piedritti capaci di reggere la spinta, quindi stabilizzati con masse inerti.

Altro esempio è quello delle chiese gotiche in cui si realizza un perfetto equilibrio tra le azioni trasmesse dalle ampie coperture voltate e gli elementi di sostegno. Come si vedrà in seguito, i gotici realizzarono una ragionata composizione delle forze che permette ai pilieri di avere una ridotta sezione ed alla chiesa un alto coefficiente di utilizzazione dell'area. Infatti, lo schema strutturale gotico riportato in figura 2.17, fa sì che la spinta della volta della navata centrale si componga con la contropinta orizzontale dell'arco rampante, ottenendo un'azione obliqua ridotta, che si combina con il peso del muro che sostiene il tetto, il peso del tetto e il peso del pinnacolo, avvicinandosi sempre di più alla direzione verticale. Questa risultante si combina poi con l'azione della volta della navata laterale e con il peso del piliere, in modo da cadere entro il suo piccolo nocciolo centrale d'inerzia. L'equilibrio del sistema gotico è anche garantito dall'uso dell'arco a sesto acuto che è meno spingente di quello a tutto sesto e dall'adozione delle volte costolonate che incanalano la spinta lungo vie di resistenza prescelte.

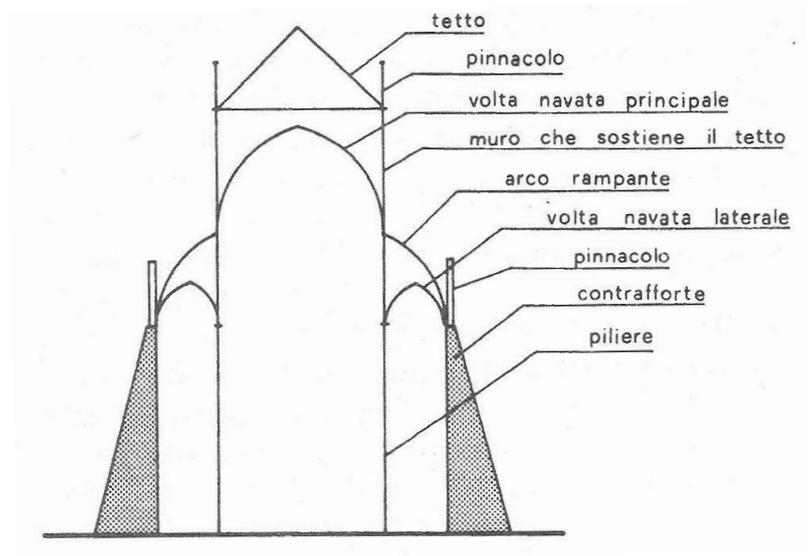


Figura 2.17: Schema strutturale di una chiesa gotica
(Caleca, 2000)

2.3.1 L'arco

L'arco offre maggiori garanzie di stabilità rispetto alla trabeazione e permette di coprire spazi molto ampi. Esso lavora nelle condizioni ottimali quando è in compressione ed è in compressione se è ben costruito; per questo è il sistema più adatto a sfruttare le qualità meccaniche della pietra e della muratura, ma da solo serve a poco se non si è in grado di individuare e, di conseguenza, contrastare le spinte che determina. Grazie alle condizioni di vincolo agli estremi che consentono una componente orizzontale alle reazioni, la curva d'asse dell'arco può essere avvicinata alla funicolare dei carichi fino anche a coincidere con essa, in modo tale che l'arco risulti soggetto solamente a compressione. In questa maniera la generica sezione trasversale è integralmente sfruttata ai fini della resistenza e a parità di portata e di carico, ne consegue sia una maggiore economia di materiali rispetto alle strutture resistenti a flessione, sia la possibilità di superare luci notevoli, impensabili per strutture a travata.

L'arco si presenta come una struttura ad asse curvo impostata su due piedritti con la quale si riesce a coprire un vano. È costituito da più elementi posizionati in direzione radiale rispetto al centro, o ai centri dell'arco, che trasferiscono i carichi ai sostegni con una direzione non verticale, ma inclinata verso l'esterno. Come si osserva dalla figura 2.18, l'arco parte dalla sommità delle spalle o piedritti che possono concludersi con *peducci* o *mensole*, sulle quali appoggia il cosiddetto *piano* o *concio d'imposta*, da cui inizia la *curvatura*, ossia il *sesto*. I piani inclinati di circa 30° rispetto al piano orizzontale passante per il centro dell'arco sono i *piani alle reni*. Nel punto più alto del tratto curvilineo, vi è la *chiave* dell'arco posta al centro e talvolta evidenziata da un motivo decorativo. La faccia inferiore dell'arco è detta *intradosso* o *imbotte*, mentre la faccia superiore è spesso inglobata nel muro. La distanza tra intradosso ed estradosso determina lo *spessore*; la distanza verticale tra il piano di imposta e il punto più alto dell'intradosso definisce la *freccia* o *saetta* o *monta*, mentre la distanza tra i due piedritti si dice *luce* o *corda* o *linea d'imposta*.

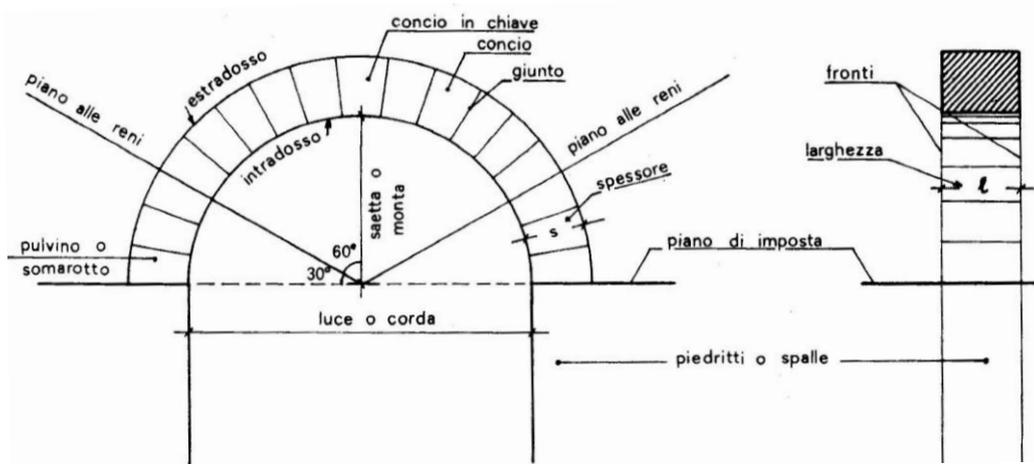


Figura 2.18: Nomenclatura degli elementi di un arco (Caleca, 2000)

Nell'arco, come in ogni solido geometrico, vi è una zona della propria sezione chiamata *nocciolo centrale di inerzia* in cui deve cadere la risultante delle forze affinché si abbia compressione, altrimenti si ha trazione e quindi possibili lesioni se la struttura è realizzata con materiale non resistente a tale sollecitazione. Più precisamente, il poligono delle successive risultanti delle forze agenti (reazioni all'imposte e carichi verticali) prende il nome di *curva delle pressioni*; ogni punto di tale curva appartiene ad una sezione trasversale dell'arco e ne costituisce il *centro di pressione* e, nel caso in cui l'arco sia in muratura o in calcestruzzo non armato, occorre che il centro di pressione sia non esterno al nocciolo centrale d'inerzia della sezione e che il massimo valore della sollecitazione non superi il carico di sicurezza del materiale impiegato.

Può accadere che il luogo dei centri di pressione coincida con l'asse mediano e quindi cadere nel centro del terzo medio della sezione solo in minima parte e in zone precise, mentre tenda ad allontanarsi alle reni e in chiave, dove la sezione sarà quindi sollecitata a trazione e quindi si localizzeranno le fratture.

Se il centro di pressione cade fuori dal nocciolo della sezione alla sezione, è necessario rendere i piedritti stabili contro il rovesciamento ingrossandoli (*spalleggiamento*) o concentrandovi delle azioni verticali mediante carichi sia direttamente applicati su di essi sia riportati a loro tramite tiranti.

Nel caso in cui l'arco sia costruito in cemento armato o in acciaio, come nelle strutture moderne, la resistenza a trazione che garantisce il materiale adottato consente ai centri di pressione di uscire dal nocciolo centrale, senza alcuna

fessurazione, a patto che la sollecitazione rimanga inferiore al valore di carico limite.

La stabilità dell'arco, a parità di luce, di materiale e di carico dipende dal rapporto tra la freccia e la corda, poiché al variare di esso varia l'azione trasmessa alle spalle e la sua inclinazione. Per esempio, questa sarà prossima alla verticale in un arco a sesto acuto e si avvicinerà all'orizzontale nella piattabanda.

Dal punto di vista statico, tra i vari tipi di arco si distinguono:

- arco a 3 cerniere;
- arco a 2 cerniere;
- arco incastrato agli estremi;
- arco a spinta eliminata;

Dal punto di vista del materiale adottato, nelle opere monumentali si trovano per lo più archi in pietra da taglio. Attualmente, si usano archi di mattoni sopra l'apertura di porte o finestre nei muri, oltre che in ponti di modesta luce. Proprio per la realizzazione di ponti, si sceglie ancora l'utilizzo di archi in pietra da taglio, se risultano convenienti per le risorse locali disponibili, altrimenti i ponti di grande luce si costruiscono in cemento armato, acciaio o in lega d'alluminio.

2.3.1.1 Tipologie di arco

Esistono diversi tipi di archi che possono essere formati da elementi che agiscono tra loro per mutuo contrasto o da strutture monolitiche di getto, in ogni caso comunque spingenti. Le varie tipologie si stabiliscono a seconda del profilo del sesto e della posizione del centro o dei centri rispetto la linea d'imposta.

In particolare, rivestono notevole importanza i seguenti tipi di arco, riportati in figura 2.19:

- *arco a tutto sesto* (1) o semicircolare che ha l'intradosso formato da una semicirconferenza con il centro sulla linea d'imposta ed il raggio pari a metà della luce. È caratteristico dell'architettura romana, romanica e rinascimentale;
- *arco rialzato* (2) ad intradosso semicircolare avente centro rialzato rispetto alla linea d'imposta e raggio pari alla metà della luce. È caratteristico dell'architettura bizantina;

- *arco scemo* (3) ad intradosso con un solo centro posto al di sotto delle linee d'imposta che sono inclinate e convergenti verso il centro di curvatura. È molto spingente ed è stato usato come arco di contropinta negli edifici romani dell'età imperiale e del Medioevo;
- *arco ribassato* (4) che presenta una freccia superiore a metà della luce;
- *arco a sesto acuto* costituito da due archi di cerchio aventi i centri sulla linea d'imposta e raggio maggiore di metà della corda; la freccia è maggiore di metà della luce e le due curve si intersecano a cuspide. Può essere *compresso* (6) se i centri sono interni alla corda, *equilatero* (5) se sono all'estremità di essa e *lanceolato* (7) se i centri sono al di sopra della linea d'imposta. È meno spingente dell'arco a tutto sesto ed è caratteristico dell'architettura gotica e di quella araba;
- *arco Tudor* (8) che è policentrico ribassato, con due curve raccordate con due tratti retti riuniti a cuspide secondo un angolo all'incirca di 160°. È caratteristico dell'architettura anglosassone dal XV al XVIII secolo;
- *arco rampante* (9) che è asimmetrico con piani d'imposta a diverso livello ed intradosso semiellittico o policentrico. A livello statico riveste la funzione di arco di contropinta, in quanto puntella il muro dall'esterno, tramite un contrafforte che scarica le spinte orizzontali al suolo e, come tale, fu usato nell'architettura romana e medioevale;
- *piattabanda* (10) che è un arco con centro di curvatura quasi all'infinito e intradosso quasi piano. È l'arco più spingente in assoluto perché la risultante delle azioni trasmesse ai piedritti è prossima all'orizzontale e quindi dà luogo ad una spinta di notevole intensità;
- *arco inflesso* che è costituito da quattro archi di cerchio alternati in andamento concavo e convesso. È tipico della tradizione costruttiva orientale;
- *arco di scarico* che è inserito all'interno dell'apparecchio murario, devia il peso di un eventuale aggravo rafforzando i punti deboli della parete.(cfr. 2.1.1).

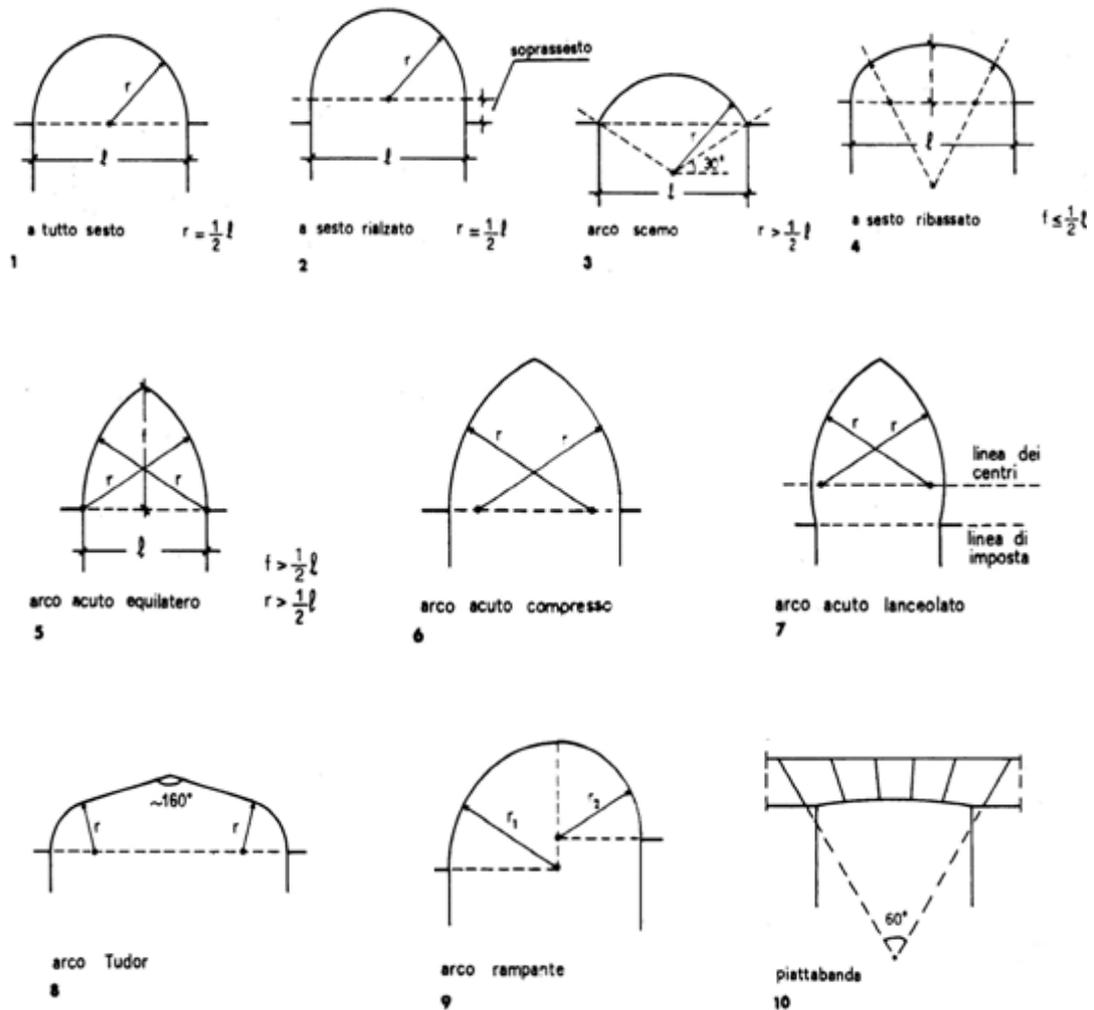


Figura 2.19: tipologie di arco (Caleca, 2000)

2.3.1.2 Esempi di arco nella storia

Seneca presentò il problema dell'origine dell'arco nel suo Epistolario sostenendo che:- Posidonio dice che l'inventore dell'arco fu Democrito bloccando con un concio centrale [chiave] le pietre disposte ad assecondare una curva. Questo è falso dal momento che anche prima di Democrito vi furono ponti e porte di cui la maggior parte era ad arco-. (Seneca, I secolo d.C.)

Visto che si parla di Democrito (480 a.C.-360 a.C.), contemporaneo di Socrate (469 a.C.-399 a.C.), questo prova l'esistenza di esempi di arco più antichi rispetto a quelli romani, per esempio ai tempi degli assiri e degli etruschi, ma i romani sono stati i primi ad aver capito il suo comportamento statico e ad averlo utilizzato

consapevolmente. L'arco divenne infatti il cardine dell'edilizia romana, essendo la sola struttura che potesse sfruttare a pieno la qualità di resistenza a compressione della muratura e di tutti i materiali da costruzione disponibili nell'antichità. Liberandosi dai limiti sulle luci a cui obbligava il sistema trilitico, in cui l'architrave era inflesso e quindi lavorava a trazione, l'arco consentì la realizzazione di strutture eccezionali quali ponti (nella figura 2.20 il ponte di Tiberio a Rimini, risalente al I secolo a.C.) e acquedotti, divenendo anche un simbolo estetico ed infine politico e propagandistico. IA conferma di ciò, tanti sono gli archi onorari e trionfali, realizzati per celebrare imprese di condottieri ed imperatori, come ad esempio quello di Augusto a Rimini, del 14 d.C., riportato nella foto 2.21.



Figura 2.20: Ponte di Tiberio, Rimini, I sec. a.C.

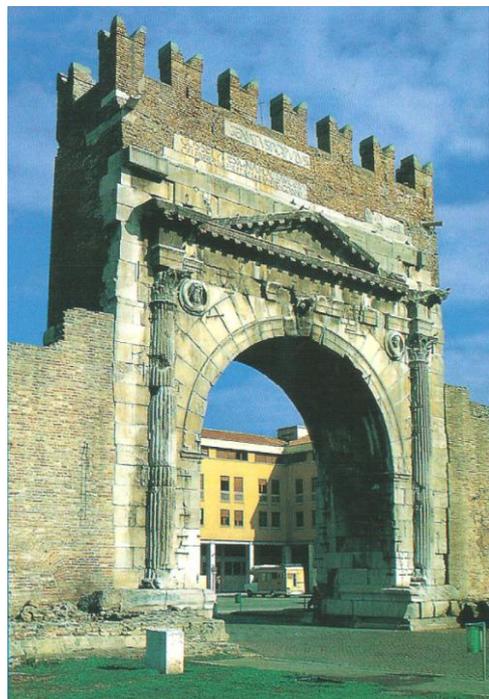


Figura 2.21: Arco d'Augusto, Rimini, 14 d.C.

2.3.2 La volta

La volta nasce dalla traslazione di un arco lungo una direttrice preferenziale oppure dalla rotazione dell'arco attorno ad una asse. Dal punto di vista statico, è analoga all'arco, cioè è anch'essa una struttura spingente che esercita sui sostegni azioni inclinate che originano quindi spinte. Si utilizza la stessa nomenclatura indicata per gli archi: estradosso, intradosso, piani di imposta, spessore, luce, freccia, piani alle reni, sesto, etc. L'unica sostanziale differenza è che l'arco raccorda due punti distanti tra loro, avendo uno sviluppo lineare, mentre la volta copre un intero ambiente, sviluppandosi nello spazio.

2.3.2.1 Tipologie di volta

Morfologia e denominazioni della volta dipendono dalla forma geometrica della superficie media. Se tale superficie è unica la volta si dice *semplice*, mentre quando è costituita da più superfici variamente intersecatinsi si dice *composta*.

Tra le volte semplici si distinguono:

- *volta a botte* (1) che è la più elementare; nasce dalla traslazione di un arco a tutto sesto o a sesto ribassato, e risulta una struttura semicilindrica che poggia su due *archi di testata*;
- *volta a vela* (2) che è ottenuta sezionando una volta emisferica con 4 piani verticali e togliendo le 4 semicalotte risultanti; scarica così sugli archi laterali conclusivi del vano rettangolare. La copertura è detta anche *calotta*, mentre tra un arco e l'altro ci sono i *pennacchi*;
- *volta a bacino* che è generata dalla rotazione della curva generatrice, che può essere un arco di cerchio, di ellisse o di parabola, attorno ad una retta verticale ad essa solidale, indicata come *asse della volta*;

Tra quelle composte le più comuni sono:

- *volta a crociera* (3) che è formata dalle quattro superfici (*unghie*) ottenute eliminando le parti che rimangono al disotto delle linee d'intersezione di due volte a botte aventi la stessa freccia; si dice *costolonata* se gli archi di intersezione sono evidenti (*costoloni*). Un esempio è in figura 2.22;
- *volta a padiglione* (4) ottenuta eliminando le parti che rimangono al disopra delle linee d'intersezione di cui sopra; le 4 superfici che rimangono sono dette *fusi* e si possono adattare anche a vani rettangolari;
- *volta a schifo* (5) che è una volta a padiglione tagliata da un piano parallelo al piano d'imposta;
- *volta ad ombrello* (6) che ha unghie e lunette intorno al centro e si usa per coprire vani poligonali e non rettangolari.



Figura 2.22: Volta a crociera del chiostro Dos Jeronimos a Lisbona, XVI secolo

Le tipologie di volte più significative per le loro numerose applicazioni, tra quelle appena descritte, sono riportate schematicamente nella figura 2.23.

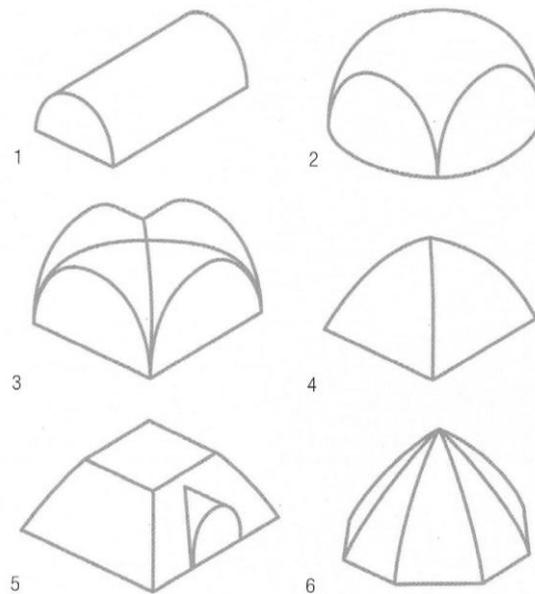


Figura 2.23: tipologie di volta (Bussagli, 2003)

Dal punto di vista dei materiali impiegati le volte possono essere costruite in pietra da taglio, in laterizi, in muratura a sacco, in conglomerato cementizio armato o non armato. Tra le volte del passato un tipo caratteristico di volta a struttura mista era quello detto *alla romana*, nel quale l'intradosso era costituito da uno sottile strato di laterizi disposti di coltello, eseguito rapidamente e senza

bisogno di speciali armature provvisorie, sul quale si gettava successivamente la muratura a sacco.

A grandi linee, si può affermare che nelle civiltà antiche fu predominante l'uso di volte murali realizzate con materiale non elastico, mentre nelle moderne coperture a guscio, i materiali di cui si fa un maggiore utilizzo sono il cemento armato ed il ferro.

2.3.2.2 Esempi di volta nella storia

Al contrario di quello che si pensa, i romani non furono i primi e gli unici costruttori di volte del loro tempo, ma l'uso della volta nelle sue forme più semplici era conosciuto anche in Oriente, nelle regioni Mesopotamiche ed in Egitto.

Infatti, già nel 1300 a.C., gli egizi usarono volte oblique, con mattonelle piane disposte a semicerchio, per realizzare le coperture dei magazzini di Ramesse e più tardi, nel II secolo d.C., lo stesso sistema voltato venne usato dai Sassanidi in Persia nella sala del Palazzo di Ctesifonte. A Babilonia, sulla riva orientale dell'Eufrate, volte a botte realizzate in strati radiali di mattoni sorreggevano i meravigliosi giardini pensili del palazzo di Nabucodonosor II, risalenti al 600 d.C. Come si vedrà in seguito, anche gli etruschi conoscevano la volta, ed in particolare, con conci di piccole dimensioni, realizzarono volte a botte per edifici civili e religiosi. Come lo si è fatto per l'arco, è comunque necessario sottolineare che l'impiego continuo e consapevole della volta si diffuse in Occidente solamente a partire dall'epoca romana. I romani ne svilupparono le applicazioni e ne variarono le forme grazie ad un'approfondita conoscenza del comportamento statico e soprattutto all'uso del conglomerato cementizio, che conferiva particolare elasticità alla struttura. Alcuni esempi di volte a getto di calcestruzzo adottate nei grandiosi edifici della Roma imperiale sono: i mercati Traiane, la basilica di Massenzio e la basilica della Domus Augustana sul Palatino. Attorno al I secolo a.C., i romani impararono anche a frazionare il peso con *costoloni* e *nervature* che scaricavano le azioni su alcuni punti, rinforzati a loro volta con *contrafforti* o *speroni*. Agli stessi costruttori romani si ispirarono quelli romanici che idearono il tipo di chiesa a campate, in cui il peso della copertura centrale si scarica gradualmente, attraverso campate laterali più piccole, sul muro

perimetrale, spesso rinforzato con dei contrafforti. Successivamente, si adottarono tipologie di volta più sofisticate e resistenti grazie all'applicazione dell'arco a sesto acuto, che comportava spinte orizzontali minori e contribuiva ad accentuare il verticalismo tipico delle chiese gotiche. Nelle volte a crociera, increspate e stellate dell'architettura gotica, inoltre, tutto il peso veniva scaricato sui pilastri polistili sostenuti dai contrafforti, togliendo qualsiasi funzione portante al muro. Durante il Rinascimento, la volta riprese le forme classiche, ma con innovazioni nei materiali usati:

- nel caso della cupola di Santa Maria del Fiore a Firenze, Brunelleschi usò mattoni disposti a spinapesce;
- nel caso delle ampie coperture di San Pietro a Roma, Bramante riprese il sistema del conglomerato cementizio.

Nell'era moderna, le nuove soluzioni tecniche e l'utilizzo dei nuovi materiali, quali il ferro e poi il cemento armato, hanno progressivamente soppiantato l'uso degli altri materiali e consentito lo sviluppo di nuove forme di copertura che della volta hanno mantenuto la suggestione. In particolare, il cemento armato ha consentito di plasmare le strutture secondo le forme più svariate, permettendo la realizzazione di volte sottili. Un vistoso esempio di copertura figlia del progresso tecnologico è il paraboloido, usato per la prima volta da Le Corbusier nel 1958 per il Padiglione Philips, all'Expo di Bruxelles. Questo era realizzato con una membrana sorretta da elementi rigidi portanti, come si vede in figura 2.24.

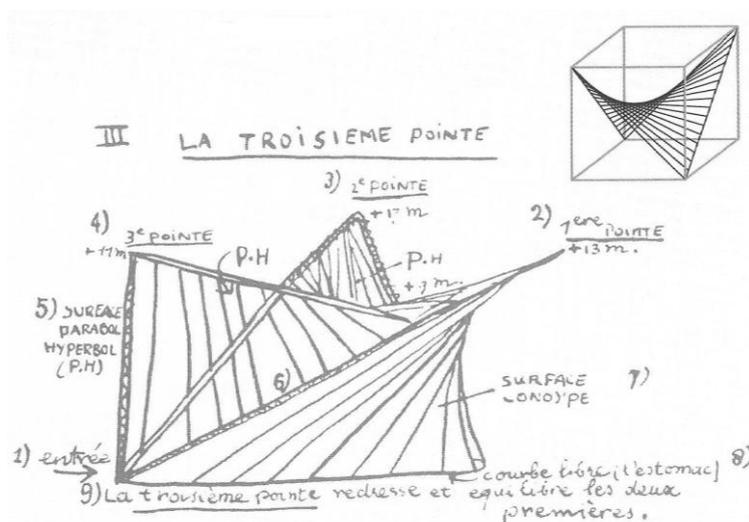


Figura 2.24: schizzo per il padiglione Philips, 1958, e schema di copertura a paraboloido iperbolico (Bussagli, 2003)

2.3.3 La cupola

Tra le volte composte un ruolo di spicco va riservato alle cupole.

La cupola più semplice può ottenersi sezionando una volta a vela con un piano orizzontale e sovrapponendo direttamente a tale superficie, costituita da 4 pennacchi (1), una volta a bacino.

Quindi, la cupola è come se fosse costruita al di sopra di una volta a vela a cui sia stata recisa la calotta vera e propria. Spesso, tra il bacino e i pennacchi, può essere inserito un elemento detto *tamburo* (2), in cui possono essere realizzate delle aperture; gli elementi angolari chiamati pennacchi, insieme a quegli elementi conoidi definiti *trombe d'angolo* (3), hanno la funzione strutturale di favorire lo scarico dei pesi sugli archi perimetrali e permettono il passaggio dalla pianta quadrata della campata alla base di imposta della cupola (si veda figura 2.25).

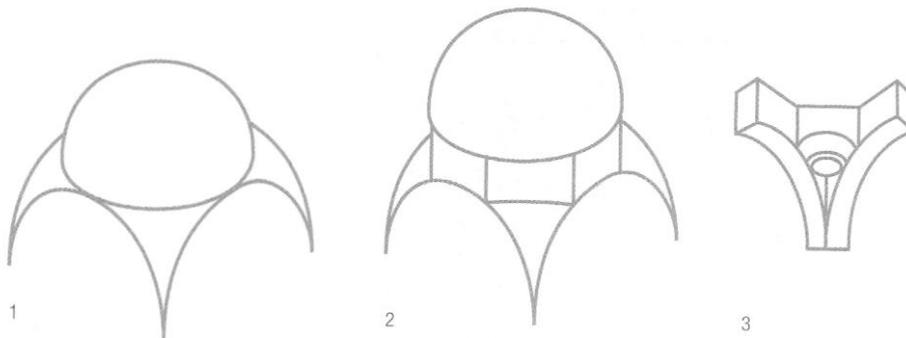


Figura 2.25 schema della cupola e dei suoi elementi (Bussagli, 2003)

A coronamento della calotta e a favore di una maggiore luminosità interna si ha la *lanterna*.

La cupola si dice estradossata se è visibile dall'esterno dell'edificio, ma può essere anche nascosta da un prisma esterno coperto a tetto chiamato *tiburio*, come si può notare dalla immagine 2.26.

In conclusione, la cupola può essere concepita come una copertura a volta di particolare complessità e, al pari della volta,

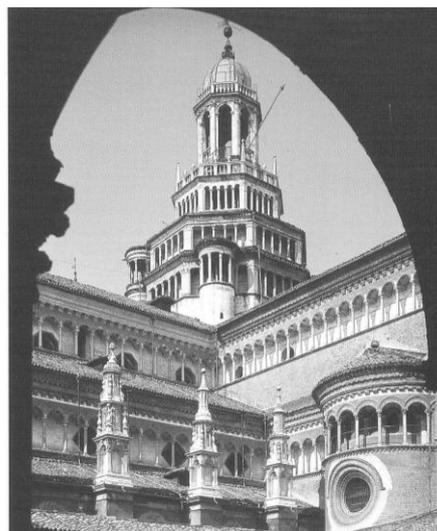


Figura 2.26: tiburio della Certosa di Pavia, 1473

ha la forte valenza simbolica del cosmo e, qualora presente, costituisce il fulcro dell'edificio.

Per quanto riguarda l'analisi del comportamento statico delle cupole, è necessario basarsi sulla teoria dei gusci di rivoluzione, elementi di un dato spessore, originati dalla rotazione della *linea meridiana* attorno all'asse di rivoluzione. Si dicono *paralleli* le curve nate dall'intersezione della superficie del guscio con piani ortogonali all'asse di rivoluzione, mentre *meridiani* le curve nate dall'intersezione della superficie della cupola con piani che contengono l'asse di rivoluzione.

Le cupole presentano un regime tensionale di due tipi:

- membranale: sottoposte a soli carichi verticali sono soggette a sforzi normali di meridiano di compressione, e a sforzi normali di parallelo che sono di compressione sopra le reni e di trazione in prossimità dell'imposta, dove quindi si possono localizzare le fessure;
- flessionale: sono soggette a momenti flettenti localizzati all'imposta della cupola;

Dal punto di vista costruttivo la cupola è edificata con conci trapezoidali detti *cunei*, i cui giunti (i sottili interspazi tra pietra e pietra o mattone e mattone) sono orientati verso un unico centro. Tramite l'utilizzo di malta è possibile anche costruire la cupola con i laterizi.

2.3.3.1 Tipologie di cupola

Le tipologie di cupola sono derivate da quelle di arco, infatti essa può essere: *sferica*, *emisferica* (come quella in San Pietro a Roma), *rotonda*, *ribassata*, *rialzata*, *archiacuta* (come quella di Santa Maria del Fiore a Firenze in figura 2.27), *parabolica*, *conica*, *ovoide*, *a spicchi*, *a bulbo* (come quelle tipiche dell'architettura islamica a decoro dei Mihirab delle moschee), *a ombrello* ect.

Ci sono poi, le cupole moderne in metallo che



Figura 2.27: Cupola di S.Maria del Fiore a Firenze, 1436 (Bussagli, 2003)

sono costruite con la ripetizione di moduli prefabbricati triangolari e vengono dette *geodetiche*. Riportata nella figura 2.28 è una tra le più famose e cioè quella del padiglione americano all'Expo di Montreal del 1967, realizzata in acciaio e plexiglas, e progettata da Richard Buckminster Fuller.



Figura 2.28: Cupola geodetica di Montreal, 1967 (Bussagli, 2003)

2.3.3.2 Esempi di cupola nella storia

La cupola era sconosciuta ai greci ed i primi costruttori di cupole vere e proprie furono i romani, anche se già prima di loro, sale cupolate all'interno di edifici sacri della Persia, dedicati al culto del fuoco, vennero costruite da parte della civiltà sasanide (III-VII secolo a.C.) e partica (II-III secolo a.C.).

Si deve però all'architettura romana la perfetta soluzione della copertura a cupola, partendo da quella in muratura derivante dall'arco e dalla volta degli etruschi. I tecnici di Roma apportarono un miglioramento decisivo al sistema strutturale, adottando su larga scala il conglomerato di calcestruzzo che, gettato sull'armatura lignea, creava una copertura unitaria e compatta.

Questo elemento architettonico ebbe grande prestigio e fu portatore di significati e suggestioni, legati soprattutto al concetto di centralità del potere.

Primi esempi di cupola romana che definirono le prime fasi della propria evoluzione furono:

1. cupole *coniche* delle celle sepolcrali del II secolo a.C.;
2. cupole *ovoidi* delle Terme Stabiane di Pompei;
3. cupole *rotonde* di templi circolari peripteri;
4. cupole dei mausolei, quale quello di Cecilia Metella;

Successivamente, nelle coperture per le sale rotonde che gli architetti adrianei prediligevano, le masse furono sempre più alleggerite tramite archi di scarico e nervature in laterizio; inoltre vennero usati dei contrafforti, absidi e nicchie per contenere le spinte delle cupole, focalizzate con maestria in determinati punti. Emblematico esempio di tali soluzioni tecniche è la cupola del Pantheon a Roma che, articolata in lacunari e realizzata in conglomerato, è considerata la cupola più bella pervenuta integra sino ai nostri giorni.

Tra il V e il VI secolo, a Ravenna vennero costruite cupole con materiale leggerissimo, cioè ancorette di terracotta che, infisse le una nelle altre, formavano degli anelli sovrapposti, racchiusi esternamente dal tiburio poligonale coperto da tetto. Gli sviluppi di tali coperture

appartenevano all'orbita bizantina, anche se è facile riscontrare elementi di derivazione armena e orientale, oltre che apporti romani. La cupola di Santa Sofia a Costantinopoli è semi-sferica, raccordata al corpo centrale cubico mediante pennacchi sferici, esternamente rinfiancata e cerchiata alla base da una serie di piccole finestre.

L'architettura musulmana fuse elementi bizantini e persiani ed elaborò una cupola con profili ovoidi rialzati o a bulbo, come ad esempio quella di una delle tante moschee indiane, raffigurata in 2.29.

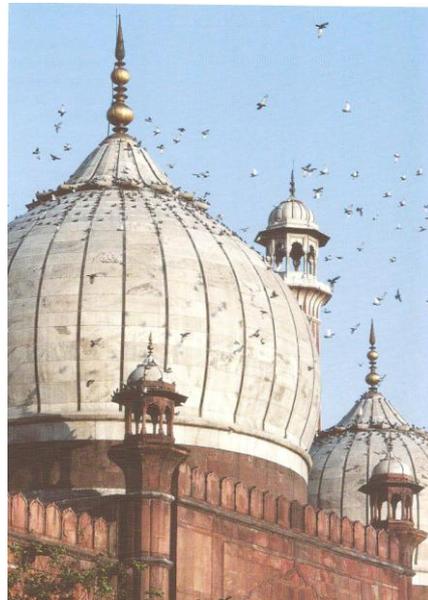


Figura 2.29: Cupola centrale della moschea a Nuova Delhi, 1644-1658

In Italia, tra l'XI e il XIII secolo, il romanico propose cupole sferiche che si ergevano all'incrocio delle navate su raccordi di varia forma, mentre lo stile gotico fece proprie cupole slanciate a crociera (voutes d'ogive), cupole nervate e costolate, in cui si può riscontrare anche qualche influenza araba.

Brunelleschi nel 1420 chiuse il periodo delle cupole medioevali ed inaugurò la fase di quelle rinascimentali, con la costruzione della cupola archiacuta di S. Maria del Fiore, a sesto rialzato con nervature lungo i meridiani. Michelangelo per S. Pietro (figura 2.30), partendo dall'impostazione bramantesca, adottò una cupola

sferica pura, ma fu costretto per ragioni statiche ad usare il sistema brunelleschiano di nervature a sesto acuto.



Figura 2.30: Cupola di San Pietro a Roma, 1547-1589

La cupola michelangiotesca fu la base per gli sviluppi dell'età barocca, di cui si ricordano la cupola di Sant'Ivo a Roma di Borromini e le cupole torinesi di Guarini. Rainaldi e Vignola introdussero la cupola a pianta ellittica che trovò frequentemente impiego nel corso del Seicento da parte di numerosi architetti, quali ad esempio Bernini e Borromini. Successivamente, venne adottato lo schema michelangiotesco delle calotte separate per la costruzione della cupola di Wren per San Paolo a Londra e in quella di Antonelli a Novara. Quest'ultimo è da ricordare anche per la Mole Antonelliana di Torino.

Nell'Ottocento, con l'avvento dei nuovi materiali quali ferro e cemento armato, le cupole moderne si distanziarono completamente dai canoni tradizionali. La prima cupola in acciaio fu costruita nel 1810 a Parigi per la Hall eau blé, seguita poi dalla cupola del palazzo di vetro dell'Esposizione di Londra del 1862 e dal gasometro di Schwendler di Berlino dell'anno seguente. Tra le cupole realizzate in cemento armato sono da menzionare quella del Mercato Algeciras di E.Torroja del 1933 e quella di P.L. Nervi del Palazzetto dello Sport a Roma, del 1960; primi esempi delle tante coperture sottili in cemento armato che permettono di coprire 30÷40 metri di luce con spessori di soli 8÷12 cm.

2.4 Sistema intelaiato

Il sistema intelaiato è un sistema costruttivo basato sul principio del telaio, anziché su quello a muri portanti. Il telaio è costituito da un orizzontamento ad asse rettilineo perfettamente incastrato a due piedritti ad asse rettilineo verticale. Orizzontamento e piedritti sono in materiale elastico e costituiscono un unico sistema in cui i collegamenti tra le membrature sono realizzati mediante il vincolo di incastro perfetto, materializzando il principio elastico della continuità. L'incastro perfetto fa sì che gli angoli formati dall'asse dell'orizzontamento con gli assi dei piedritti siano indeformabili e tali restino anche quando gli elementi del sistema si deformano sotto l'azione dei carichi. In tal caso, si parla di *telaio a nodi rigidi* cioè che ha nodi dotati di resistenza flessionale, e la struttura risulta iperstatica, altrimenti l'inserimento di cerniere nei nodi renderebbe il telaio staticamente determinato.

Come si nota dalle immagini di figura 2.31, i pilastri possono essere incastrati o incernierati alla base.

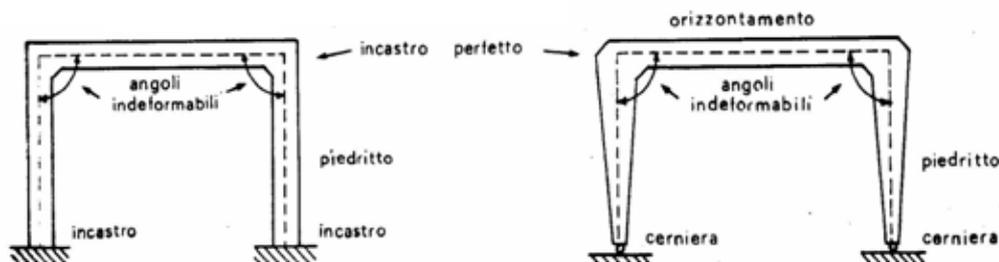


Figura 2.31: telaio incastrato e incernierato al piede (Caleca, 2000)

I telai, realizzati in legno, in acciaio o in cemento armato, costituiscono una gabbia (*maglia, ossatura o scheletro*) a campate che, lasciata in vista oppure intonacata e rivestita, sostiene uno o più piani sopraelevati dal suolo, la copertura e le pareti.

La ripetizione dell'elemento telaio in orizzontale e in verticale origina gli *schemi strutturali a gabbia o a scheletro indipendente*, caratteristici delle moderne strutture elastiche intelaiate. La ripetizione dell'elemento telaio solamente in orizzontale origina *telai multipli orizzontali* (figura 2.32), caratteristici dei

capannoni; la ripetizione solamente in verticale origina telai *multipli verticali* (figura 2.32), caratteristici di torri, campanili, serbatoi etc.

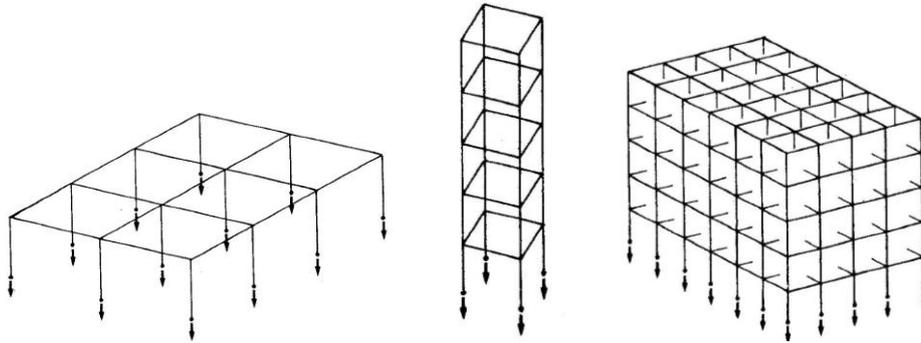


Figura 2.32: telai multipli (Caleca, 2000)

In queste strutture a telaio, sia i sostegni, sia gli orizzontamenti vengono realizzati con materiali elastici capaci di resistere alle sollecitazioni di trazione, flessione, taglio e torsione, oltre che a compressione.

A differenza delle costruzioni edificate con il sistema trilitico e spingente, nelle quali i muri, oltre ad avere funzione delimitativa tra ambienti, sono portanti, cioè svolgono la funzione statica di sostenere i carichi dell'edificio, nella struttura intelaiata è il telaio a svolgere funzione strutturale e i muri perdono tale compito, divenendo *muri di tamponamento*.

2.4.1 Fachwerk

La parola deriva dal tedesco e significa letteralmente “costruzione a scomparti”. Si tratta di un tipo di edificio realizzato su di un'ossatura portante di travi in legno a graticcio, con pannelli di riempimento talvolta intonacati, che possono essere realizzati:

- in mattoni;
- con impasti di paglia o argilla;
- in pietrame legato con malta;
- in pietrame senza alcun legante.

Per quanto riguarda l'ambito monumentale, tale tipologia costruttiva non è molto diffusa, ma sia Plinio nell'opera “*Historia naturalis*”, sia Vitruvio nel “*De*

Architectura”, parlavano di tecniche costruttive simili, relativamente ai *muri formacei*.

In Europa, tale sistema costruttivo ebbe grande successo in Germania e in Francia tra il XII e il XV secolo quando, con esso, vennero costruite città intere, ma si hanno numerosi esempi anche in Inghilterra, in Spagna e in Italia settentrionale. Per la semplicità di realizzazione e per la grande disponibilità dei materiali necessari, molti villaggi africani sono stati eretti con il sistema a graticcio, usato ad esempio per le case “pauapique” del Mozambico.

2.4.2 Telaio in cemento armato

Teorizzatore e applicatore del telaio in cemento armato fu Le Corbusier che, all’inizio del XX secolo definì i suoi famosi 5 principi che avrebbero dovuto caratterizzare il singolo edificio:

1. costruzione su *pilotis*;
2. pianta libera;
3. facciata libera;
4. finestre a nastro;
5. tetto-giardino;

Nel 1914 ideò il sistema costruttivo Dom-ino basato su un telaio in cemento armato con colonne e solai e riportato nell’immagine 2.33; un esempio tra le sue tante opere fu Villa Savoye che, come si vede dall’immagine di figura 2.34, rispecchia le caratteristiche sopraelencate.

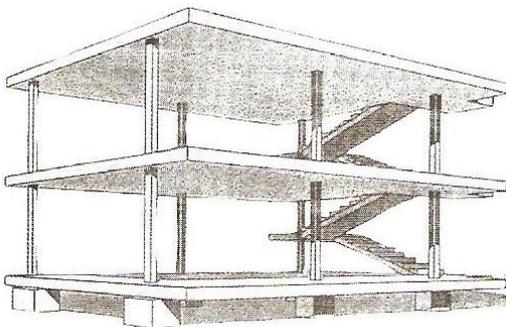


Figura 2.33: progetto per casa Dom-ino, 1914 (Bussagli, 2003)



Figura 2.34: Villa Savoye, 1929-1931

3. PRECEDENTI COSTRUTTIVI

3.1 *L'architettura egizia*

“Il calcolo accurato: la porta d'ingresso alla conoscenza di tutte le cose”.

Con questa forte affermazione inizia il Papiro Rhind, un prezioso documento egizio del 1650 a.C. che fornisce in tal modo la prima esaltazione della capacità razionalizzante dell'uomo, indispensabile chiave di lettura per comprendere il segreto dell'armonia universale e unico strumento a lui disponibile per riproporlo, organizzando lo spazio in cui vive.

La civiltà dell'antico Egitto, si è sviluppata dal IV millennio al 525 a.C., nella sottile striscia verde e fertile, lunga circa 1500 chilometri e larga una decina, lungo le sponde del Nilo, il grande fiume africano che per millenni le ha dato prosperità e ricchezza.

3.1.1 *Tecniche costruttive*

Alle origini, le opere architettoniche egizie venivano realizzate con materiali poveri; in un primo tempo con legno e giunchi, poi con materiali terrosi ricavati dal Nilo e nati dall'impasto di fango e paglia, quali l'*adobe*. A partire dal 2600 a.C. invece, gli egizi cominciarono ad avvalersi di materiali più pesanti e quindi più resistenti e duraturi, come la pietra calcarea e arenaria. Questo cambiamento non modificò forme e tipologie, ma comportò l'adozione di tecniche costruttive più complesse. I grandi blocchi venivano trasportati dalle cave al cantiere, tramite rulli di legno sulla terraferma, o zattere sul fiume e poi venivano messi in opera attraverso il rullaggio su rampe di mattoni, tutto grazie al lavoro dell'ingente manodopera disponibile a bassissimo costo.

Al fine di conferire maggiore solidità all'edificio, si ricorreva spesso all'interramento di parte dei pilastri e per realizzare gli intercolumni si usava

materiale di sterro che poi sarebbe stato tolto, per garantire stabilità ai conci di pietra.

Per la copertura di templi ed abitazioni, si utilizzava lo schema statico del *trilite*, sulla cui trabeazione venivano collegate grandi lastre di pietra o di legno, tramite giunti ad incastro.

Sulla parte sommitale delle pareti si realizzavano aperture, calcolate in modo da garantire l'illuminazione degli ambienti interni.

3.1.2 *Le colonne*

In Egitto, la colonna era utilizzata sia nell'architettura privata, sia in quella pubblica di templi e di tombe.

In origine, nel caso in cui il soffitto fosse troppo pesante per essere sostenuto soltanto da muri, esso veniva puntellato con semplici pilastri quadrangolari, senza base né capitello e successivamente, come dimostrato dai ritrovamenti nelle tombe reali delle prime dinastie di Abido e Saqqara (ca 3000 a.C.), le colonne lignee lavorate sostituirono il semplice palo di legno. Queste vennero poi utilizzate nella costruzione di templi durante l'Antico Regno (2850-2052 a.C.) e, durante la famosa epoca delle piramidi, furono progressivamente sostituite con modelli in pietra, ancora ispirati ai motivi vegetali del loto, del papiro e delle palme. Di essi, i primi esemplari furono le semicolonne del complesso funerario di Gioser (2680-2660 a.C.) a Saqqara, di cui esistono ancora notevoli resti, quali:

- le colonne scalanate (nella *Casa del Sud* e nel *Tempio a tre colonne*) che preannunciavano quelle doriche, ma erano ben diverse nei rapporti proporzionali;
- le colonne a fascio (nei colonnati d'ingresso e nella *Sala delle colonne*) rastremate verso l'alto, con un diametro di base di 1 metro e al vertice di 0,70 metri, e alte 5 metri.

Nell'epoca del Nuovo Regno (1570 a.C.-715 a.C.), vennero realizzati numerosi templi aventi lo schema assiale, con grandi porticati a colonne, come quelli presenti nel tempio funerario di Deir el-Bahari, che è riportato nell'immagine 3.1.

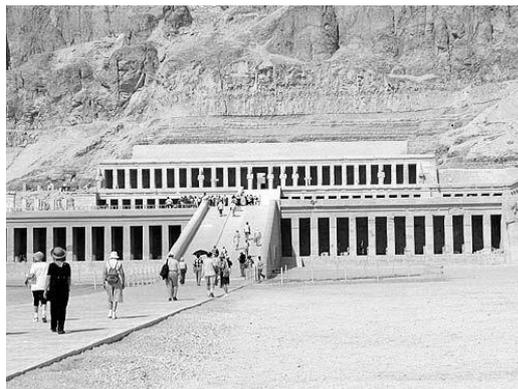


Figura 3.1: colonnato del tempio di Deir el-Bahari, 1500 a.C.

Come si può notare dal monumentale accesso al Tempio della regina Hatshepsut e di Thutmosi III a Karnak, il grande pilone (riportato in figura 3.2) che lo caratterizza è costituito da due grandi torrioni rastremati verso l'alto. Tale rastremazione verso l'alto e non verso il basso come nelle colonne minoiche, influenzò poi l'architettura dei dori con i quali gli egizi entrarono in contatto a partire dal VII secolo a.C.

La colonna egizia, che poggia su un plinto e sostiene un architrave tramite l'interposizione di un *abaco*, conservò sempre nell'Egitto faraonico un significato simbolico legato a quello della pianta, alla quale alludevano la sua forma e la sua decorazione. Il riferimento è quello al paesaggio primordiale della Valle del Nilo: il fiume-dio che passa tra la fitta vegetazione che si leva sui tumuli emergenti dalle acque (le basi delle colonne) fino al cielo, rappresentato dal soffitto piatto e azzurro. Il tempio egizio si presentava quindi come un microcosmo, simbolo dell'universo intero. Per esempio, all'interno del grandioso tempio di Amon-Ra, a Karnak, un sapiente sistema di illuminazione faceva filtrare la luce nella sale ipostile, in cui 134 colonne-papiro erano poste a sostegno del cielo-soffitto, e la luce arrivava dall'alto tramite le tipiche finestre in pietra forata, come si vede nella figura 3.3.



Figura 3.2: grande pilone del tempio di Thutmosi III, a Karnak, 2000 a.C.

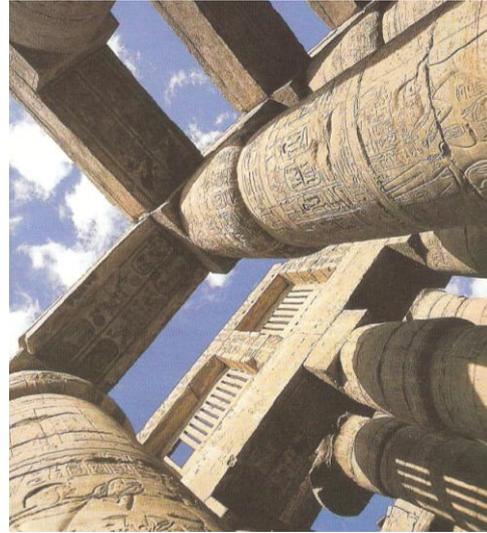


Figura 3.3: sala ipostila del tempio di Amon-Ra, a Karnak, 1290-1260 a.C.

I templi egizi vennero realizzati secondo tre modelli:

- il tempio *a ipetrale*, cioè a cielo aperto, dedicato al culto solare del dio Ra, il sole, che per gli egizi era il padre del faraone;
- il tempio *periptero*, costituito da una cella rettangolare, aperta sul lato corto, circondata da un porticato di colonne o pilastri. Si può definire come l'antenato del futuro tempio greco;
- il tempio *a penetrabile* che, come in una sorta di imbuto, sviluppa in lunghezza la successione di cortile, porticato, atrio, vestibolo, cella e santuario.

3.1.3 Dalla mastaba alle piramide

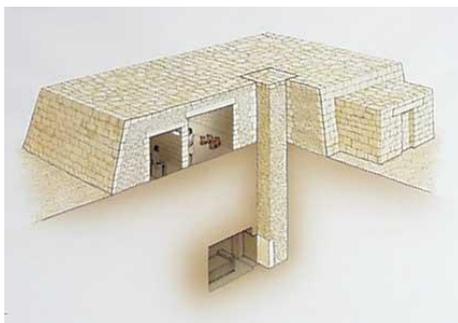


Figura 3.4: mastaba (www.sobrehistoria.com)

La piramide (dal greco *pyr*: fuoco) è una tomba di rango reale, caratterizzata da base quadrata e da quattro facce triangolari convergenti in un vertice, esattamente come il solido geometrico.

Essa trasse origine dalla *mastaba*, (dall'arabo *banco*) una sepoltura privata

diffusa nell'Antico Regno, con forma tronco-piramidale ad un piano, avente base rettangolare, realizzata con tumuli compatti in pietra e cotto.

Come si può notare dalla immagine riportata in figura 3.4, possedeva due aperture sui lati lunghi che immettevano in un pozzo sotterraneo (*caditoia*), che portava alla vera e propria camera funeraria e all'esterno vi erano altari votivi per sacrifici, che con il tempo vennero trasformati in camere aventi la medesima funzione.

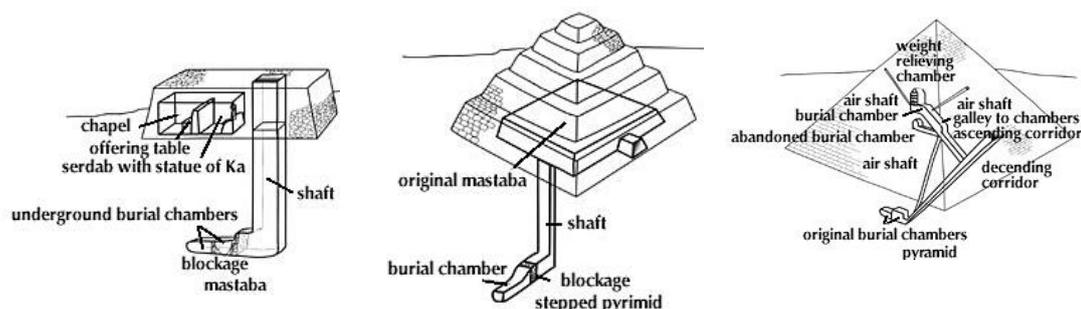


Figura 3.5: evoluzione dalla mastaba alla piramide (www.coastline.edu)

Dalla sovrapposizione di una mastaba sull'altra, con quella superiore di dimensioni minori, nacque la *piramide a gradoni*, come quella del faraone Gioser (2650 a.C.) a Saqqara, che è la più antica che sia pervenuta sino ai giorni nostri. A una prima mastaba in pietra, alta soltanto 8 metri se ne sovrapposero e se ne

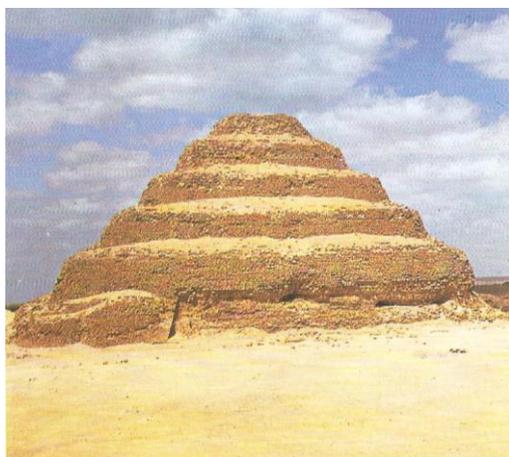


Figura 3.6: piramide di Gioser a Saqqara, 2650 a.C. (Adorno, 1986)

affiancarono altre, fino a raggiungere i 60 metri di altezza. Si ottenne così un'imponente costruzione a gradoni (si veda figura 3.6), analoga alla ziggurat mesopotamica, antenata di tutte le piramidi successive.

La piramide a gradoni era caricata da un forte simbolismo religioso, divenendo la scala attraverso la quale il faraone defunto ascende al cielo.

La definitiva forma della piramide sarà poi raggiunta riempiendo gli interstizi tra un gradone e l'altro, ottenendo così pareti esterne levigate, ricoperte da uno strato di scintillante pietra calcarea e da una punta aurea. Questi erano simboli del fascio di raggi solari, percorrendo i quali, il faraone poteva raggiungere Ra, il dio-sole.

3.1.4 Le piramidi di Dahschur

Risultano interessanti da ricordare le piramidi di Dahschur, che si annoverano come i più antichi esempi di pseudo-volta, insieme alle tombe a tholos della civiltà minoica e micenea.

Snefru fondatore della IV dinastia (2575-2551 a.C.) e padre di Chèope, fu forse l'inventore della piramide perfetta. Egli fece costruire a Dahschur, uno dei siti più meridionali della necropoli menfita, due piramidi di dimensioni imponenti, anche se inferiori alla Grande Piramide del figlio. Nelle piramidi di Snefru si vedono comparire tutte le invenzioni del complesso funerario classico della IV dinastia: la struttura generale con piramide, piramide satellite, muro di cinta, tempio della piramide, via cerimoniale e tempio a valle.

La piramide meridionale, costruita per prima, è detta *piramide romboidale*, a causa della doppia pendenza delle quattro facce; infatti l'inclinazione delle facce cambia, a circa metà della loro altezza, generando uno spigolo. Si pensa che vi sia stato un pentimento progettuale nel corso della costruzione.



Figura 3.7: piramide romboidale a Dahschur, 2575-2551 a.C.

Il lato è di 183,5 metri e l'altezza di 105 metri che sarebbe stata di quasi 130 metri, se si fosse mantenuta fino alla fine la pendenza della parte inferiore, che è maggiore. Essa, riportata in figura 3.7, è anche la piramide meglio conservata, avendo mantenuto la maggior parte del suo originario rivestimento esterno di calcare. Snefru, probabilmente insoddisfatto della sua realizzazione precedente, forse a causa di una possibile mancanza di stabilità della costruzione, realizzò un'altra piramide, che poi scelse come luogo sepolcrale, rappresentata nell'immagine 3.8. Tale costruzione è detta *piramide rossa*, per il colore rossiccio del calcare locale con



Figura 3.8: piramide rossa a Dahschur, 2575-2551 a.C.

cui è stata costruita, anche se il rivestimento, in gran parte caduto, era in calcare bianco di Tura. La forma è quella della piramide regolare ed appare appiattita a causa del rapporto proporzionale tra l'ampia base con il lato di 213 metri (dimensione superata solo dalla piramide di Chèope) e l'altezza di 99 metri, meno della metà della larghezza.

3.1.5 La piramide di Chèope

Si deve al figlio di Snefru, Chèope (2551-2528 a.C.) e ai suoi successori, Chèfren (2520-2494 a.C.) e Macerino (2490-2472 a.C.), l'erezione delle tre grandi piramidi di Ghiza, che sono sempre state oggetto di stupore da parte dei visitatori e che, ad oggi, sono il simbolo dell'Egitto antico.

La piramide di Chèope, la più antica e la più grande delle tre, fu il prototipo per le altre e si può affermare che costituisca l'apice dell'architettura megalitica, da tempo diffusa in varie zone del bacino Mediterraneo. È considerata la prima e la più immensa tra le Sette Meraviglie del Mondo Antico ed è l'unica sopravvissuta fino all'epoca attuale.

Erodoto nel V secolo a.C. scrisse: “ *Chèope ha lasciato un'opera colossale, la sua piramide*”.

In effetti, è un monumento enorme, costituito da 2300000 blocchi del peso medio tra le 2 e le 15 tonnellate, e capace di contenere sei volta la Basilica di San Pietro. Sebbene oggi le sue superfici si presentino scabre e irregolari, a causa dell'asportazione del rivestimento esterno, avvenuto durante il Medioevo, risulta caratterizzata da un'assoluta perfezione geometrica. La sua altezza originaria era di 146,59 metri (ora 137 m) e il lato della base quadrangolare era pari a 232 metri (attualmente 230 m). Con tali misure, ogni faccia triangolare era alta 186 metri, dalla base al vertice.

A conferma della perfetta misurazione costruttiva degli egizi, si nota che l'altezza è pari al perimetro di base diviso 2π , con uno scarto di soli 24 centimetri, irrisorio in relazione alle dimensioni in gioco e al fatto che non si conosce esattamente il metodo di misurazione adottato dagli antichi egizi. Si sa però, grazie al papiro

Rhind del 1650 a.C., che quello che si chiama π esisteva già ed aveva il valore di 3.16, infatti:

$$h = \frac{4 \cdot L}{2 \cdot \pi} = \frac{4 \cdot 232}{2 \cdot 3,16} = 146,83 \text{ m}$$

$$146,83 \text{ m} - 146,59 \text{ m} = 0,24 \text{ m}$$

Per la sua costruzione vennero usati due tipi di pietra: calcare e granito, mentre per il rivestimento esterno è stata adottata un particolare tipo di pietra riflettente, chiamata calcare di Tura. Studi recenti hanno dimostrato che, se tale pietra fosse ancora presente, al sorgere del sole la piramide potrebbe essere vista dalla Luna.

I 100000 uomini impiegati, ci misero 20 anni a costruire la grandiosa piramide, lavorando con un perfetto e programmato sincronismo tra:

- le cave: dove i materiali venivano estratti dalla pietra, lavorati e squadriati;
- il Nilo: grazie al quale veniva trasportato il materiale specialmente durante le piene;
- il cantiere: in cui un corpo stabile di operai lavorava, alloggiando ai piedi della piramide.

Ancora non si sa con certezza quali tecniche venivano usate per innalzare ad altezze vertiginose, almeno per allora, i blocchi litici necessari alla costruzione. Il peso dei macigni da sollevare era talmente elevato che se fossero stati utilizzati argani e leve, questi macchinari avrebbero dovuto avere dimensioni maggiori della piramide stessa. Una delle teorie più accreditate e stupefacenti a proposito, è quella proposta dall'ingegnere Pincherle secondo cui, gli enormi massi venivano fatti salire su piani inclinati sfruttando, come scrisse Erodoto:- la dilatazione di un infinito numero di tronchi bagnati-. Il piano inclinato era costituito dalla rampa della *grande galleria*, sulle cui due lisce e lunghissime banchine poteva scorrere la slitta, costituita dai *legni corti* che sostenevano e facevano scorrere verso l'alto gli enormi monoliti. Si pensa quindi che gli egizi preparassero tronchi segati a forma di cubo, con lato di circa un metro, e ne mettessero 50 in fila con le fibre legnose in senso trasversale. Dopo averli bagnati, la lunghissima fila si allungava

di più di un metro, cioè le dilatazioni di tutti gli elementi si sommarono e l'allungamento finale poteva essere utilizzato per far salire il materiale, come in una scala mobile.

Dal punto di vista costruttivo, si riscontra una forte analogia nell'organizzazione del cantiere con quella propria di un cantiere navale: la fabbricazione del colossale edificio avrebbe seguito le modalità necessarie ad assemblare una grande imbarcazione con la chiglia rovesciata. Non a caso, ai piedi della piramide è stata scoperta nel 1954 una grande barca, probabilmente la *barca solare*, che doveva servire al re per il suo viaggio ultraterreno.

Come per le altre piramidi, anche per quella di Chèope, le fasi che si seguivano per la realizzazione furono le seguenti:

1. ricerca di un solido terreno roccioso, spesso situato sulla riva occidentale del Nilo;
2. allineamento del sito secondo i punti cardinali;
3. spianato il perimetro, posa del primo strato di pietre con funzione di fondazione;
4. costruzione di una piramide a gradini, costituita da un nucleo centrale sostenuto da una serie di contrafforti;
5. innalzamento della struttura, sostenuta da un numero crescente di contrafforti,
6. raggiunta l'altezza definitiva, posa dei blocchi di riempimento per conferire forma piramidale,
7. posa del rivestimento esterno, a partire dalla base,
8. rifinitura del rivestimento per rendere liscia la superficie esterna.

A differenza della mastaba, le piramidi non presentavano camere sepolcrali interrato e le principali erano contenute all'interno della stessa piramide, a cui si accedeva tramite lunghi e stretti corridoi. Per esempio, la stanza che accoglieva le spoglie del faraone era posta al centro della struttura e quindi su di essa gravava il peso di gran parte del monumento. Gli architetti del tempo furono tra i primi nella storia a realizzare ambienti voltati, adottando dispositivi come pseudoarchi di

scarico, oltre che tetti a V rovesciata, per assorbire l'immenso peso che sollecitava il soffitto della stanza vuota.

La sezione verticale, di seguito riportata in figura 3.9, mostra come nella struttura interna della piramide di Cheope vennero realizzati gli scivoli necessari per fare salire gli enormi blocchi di pietra a grande altezza: la grande galleria e le camere di scarico erano i dispositivi usati durante la costruzione per elevare i blocchi di maggiore mole. In particolare, la grande galleria è alta 8,5 e lunga 47 metri, chiusa con un soffitto a modiglioni con 36 blocchi di granito.

Le cavità interne all'edificio erano dovute alle esigenze costruttive di alleggerire l'enorme peso gravante sulla camera funeraria e di eliminare la maggior parte dei materiali di risulta quindi non, come spesso si pensa erroneamente, per custodire tesori o segreti. Erano predisposte anche delle lunghe bocche di aerazione che collegavano la camera del faraone all'esterno.

1. Entrata
2. Corridoio discendente
3. Camera incompiuta
4. Camera della regina
5. Camere di scarico
6. Camera del faraone
7. Grande galleria

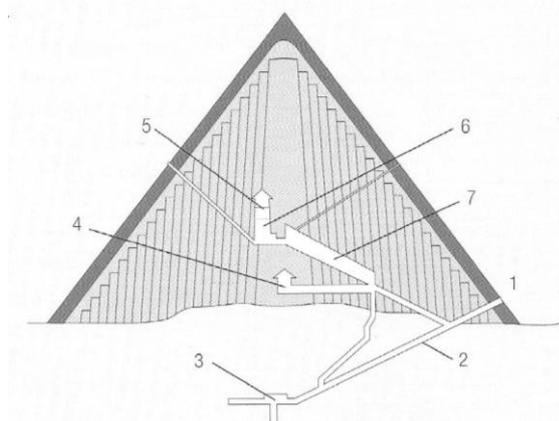


Figura 3.9: sezione verticale della piramide di Cheope a Ghiza, 2551-2472 a.C., (Bussagli, 2003)

Come si vede in figura, al termine della grande galleria vi è un corridoio con il quale si accede alla camera del faraone, chiamata anche "il centro del mondo". Essa è alta 6, lunga 5,2, e larga 10 metri, e al suo interno è ancora posizionato il sarcofago monolitico in granito che doveva contenere le spoglie di Cheope. Siccome tale sarcofago è più largo di alcuni centimetri rispetto alla galleria, si pensa che esso sia stato posto nella stanza prima della realizzazione del soffitto, la cui costruzione rappresenta una vittoria dell'ingegneria del tempo: in uno spazio con altezza di 17 metri, lastroni di granito dal peso di 400 tonnellate sono stati posizionati, a forma di tetto, per sostenere il carico sovrastante. La complessa

copertura formata da cinque ordini di lastre di pietra, distanziate mediamente un metro una dall'altra, termina con un sistema di lastre in pietra disposte a falde e funzionanti come un arco a tre cerniere. Una plausibile ipotesi della presenza dei cinque ordini di lastre di copertura, assenti dalla camera della regina, posta più in basso e verso il basamento, suggerisce che tali lastre servissero per compensare lo scivolamento dei conci lapidei degli strati esterni, disposti a corsi inclinati verso il centro della piramide, e che quindi fossero stati posti con l'idea di funzionare come puntoni anziché travi.

3.2 La ziggurat sumera

Intorno al 3500 a.C., i sumeri giunsero nella Mesopotamia meridionale. Essi furono la prima delle tante popolazioni che, nel corso dei secoli, si insediò nella fertile terra tra i due fiumi e vi lasciò la propria impronta culturale e la propria espressione stilistica. La loro capitale Ur, fu concepita secondo il moderno schema urbanistico *a griglia quadrata*, garantendo così una notevole razionalizzazione dello spazio. Ivi sorgeva il cosiddetto *tempio bianco*, al quale si saliva mediante una lunga scalinata, simbolo della faticosa salita dalla terra al cielo. Questa tipologia di edificio, si può considerare come l'anticipazione della tipica costruzione templare mesopotamica: la *ziggurat* (o *ziggurat*), a 7 o 8 piani, costituita da gradoni sovrapposti, sempre più stretti dal basso verso l'alto, congiunti da scale (si veda figura 3.10 e 3.11). Si trattava di un tempio-palazzo ove viveva il re che, traendo dal dio la propria autorità, rappresentava egli stesso il dio in terra.

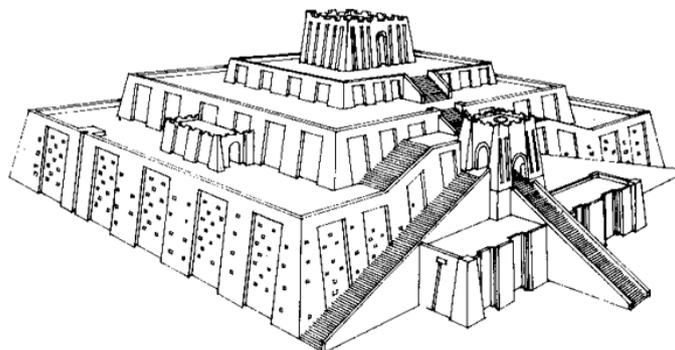


Figura 3.10: la Ziggurat di Ur, III millennio a.C., ricostruzione ideale (Adorno, 1986)



Figura 3.11: la Ziggurat di Ur, aspetto attuale (Adorno, 1986)

Prendendo spunto da essa, la costruzione a torre e a gradoni si sviluppò nel corso del tempo e raggiunse altezze sempre maggiori: dai 25 metri della ziggurat di Ur, ai 40, 140 e addirittura 185 metri che diedero origine alla nota leggenda della Torre di Babele.

La fondamentale differenza tra le ziggurat sumere e le piramidi egizie, nate anche esse dalla sovrapposizione di gradoni, è da ricercare nelle ragioni ideologiche alle quali si deve la loro realizzazione: le prime erano strumenti per l'avvicinamento progressivo al dio, ascendendo al cielo, camminando dal basso verso l'alto, mentre le seconde erano grandi tombe reali. Inoltre, le costruzioni dei sumeri erano grandiose, ma mai quanto le piramidi egizie, dalle quali si distinguevano anche per il materiale con il quale erano erette: mattone crudo, essiccato al sole, spesso tinteggiato con colori diversi, e non con la pietra degli egizi. L'uso del mattone crudo era legato, oltre che alla disponibilità di risorse naturali del luogo, anche al vantaggio di mantenere gli interni freschi sotto il cocente sole di quelle località.

3.3 L'edilizia antisismica cretese

Lo sviluppo cronologico della cultura cretese si estende dall'ultima fase del neolitico (2900 a.C.) alla fine dell'età del bronzo (1200 a.C.); in particolare, tra il 2000 e il 1200 a.C. fiorì sull'isola di Creta, nel mar Egeo, una splendida civiltà, citata nel poema omerico dell'Iliade, ed oggi documentata grazie ai resti del palazzo di Minosse e delle case della città che vi sorgeva attorno, cioè Cnosso.

3.3.1 L'architettura labirintica

Tra gli affascinanti resti dell'antica civiltà, riportati alla luce dall'archeologo inglese sir Arthur Evans tra il XIX e il XX secolo, risulta interessante analizzare le singolari tessiture murarie, così particolari nella loro configurazione *pluriconnessa*. Infatti, la pianta delle pareti murarie della città-palazzo (figura 3.12) è caratterizzata da una stretta ed intricata articolazione tra maglie, indicata anche come *multicellulare*, talmente innovativa da diventare simbolo di un nuovo stile, *il minoico* appunto.

Il palazzo di Cnosso, il più grande dei tre che esistevano sull'isola, fu abitazione dei potenti monarchi oltre che di una numerosa collettività e perciò intorno ad un vasto cortile centrale a forma rettangolare, si organizzavano molti ambienti, da quelli adibiti a rappresentanza ai laboratori. Tali ambienti di piccole dimensioni erano collocati secondo una disposizione confusa, senza apparente logica geometrica, rendendo molto complessa la pianta del palazzo che copriva un'area di 20000 m². Ciò giustifica la denominazione di *architettura labirintica* ed è collegato alla leggenda del labirinto costruito da Dedalo, su commissione del re Minosse, per rinchiudervi il Minotauro, ucciso poi dall'eroe Teseo che, entrato nel labirinto, ne uscì per mezzo del filo fornitogli da Arianna, figlia di Minosse.



LEGENDA

- | | |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1. cortile occidentale | 8. sala del trono |
| 2. cortile centrale | 9. santuario tripartito |
| 3. ingresso sud | 10. scala per gli appartamenti reali |
| 4. sala a pilastri | 11. sala della doppia ascia |
| 5. corridoio delle processioni | 12. megaron della regina |
| 6. portico meridionale | 13. bagno della regina |
| 7. scalinata al primo piano | 14. area teatrale |
| | 15. case esterne |

*Figura 3.12 :pianta del palazzo di Cnosso, isola di Creta, XVII sec a.C.
(Adorno, 1986)*

Dal punto strutturale si trattava di un sistema pesante mentre dal punto di vista costruttivo, l'esame dei reperti archeologici ha messo in evidenza come la muratura veniva già concepita alla pari di un sistema le cui qualità derivavano non solo dalla bontà dei materiali costituenti, ma anche da come essi venivano organizzati e collaboravano tra loro. Infatti, la muratura della città-palazzo era costituita assemblando blocchi lapidei di roccia calcarea o gessosa e rispettava

regole precise di buona fattura. Per esempio, le pietre erano disposte in modo che ce ne fossero alcune trasversali, cioè con il lato più lungo orientato secondo la normale alla parete, e non tutte con il lato maggiore parallelo allo sviluppo longitudinale del muro. Inoltre, la pluriconnessione delle pareti era tale che i *setti* si incrociassero sempre ad angolo retto, formando fitte reti di maglie rettangolari, in modo da conferire al sistema la capacità di far fronte a severe sollecitazioni dinamiche. Anche oggi, si usano sezioni pluriconnesse nelle navi, nelle travi portanti di forte luce, nelle ali e nelle fusoliere degli aerei, per conferire maggiore resistenza nei confronti delle azioni dinamiche quali l'effetto delle onde, le turbolenze dell'aria e il passaggio dei treni. Analogamente, gli edifici e le murature di Creta dovevano resistere alle forti sollecitazioni sismiche che colpivano frequentemente l'isola, comportando crolli e distruzioni dalla cui esperienza si formò una classe di costruttori capaci di realizzare edifici con caratteristiche che oggi sarebbero chiamate *antisismiche*.

Da osservare anche la presenza di elementi di collegamento realizzati in legno che attraversano i grossi blocchi di pietra costituenti i muri di Cnosso. Questi perni in legno non avevano la sola funzione di collegare i vari blocchi, ma anche quella di conferire *plasticità* a tutto la compagine muraria. Infatti, con la sua capacità di resistere a sforzi oltre al proprio limite, adattandosi alle grandi deformazioni senza fratturarsi, il legno sopperiva alla fragilità della muratura che, costituita da blocchi lapidei di gesso, non riusciva a superare senza rompersi le violenti scosse che il suolo trasmetteva all'interno dell'ossatura muraria.

3.3.2 *Le colonne minoiche*

Le colonne che sostenevano gli architravi, forse in legno, erano rastremate verso il basso, cioè erano state sagomate in modo da restringersi dall'alto verso il basso, come si può notare nelle figure 3.13 e 3.14. Questa conformazione non era né casuale né nata da motivi estetici, anzi anche essa si può annoverare come una tra le tecniche antisismiche. Infatti, le oscillazioni ondulatorie dovute al sisma hanno minor presa sul pilastro se questo, invece di incastrarvisi con una larga base, vi si

appoggia come un sottile puntello. Si può ipotizzare come un'anticipazione di quel vincolo *a cerniera*, oggi usato con frequenza nelle strutture moderne.

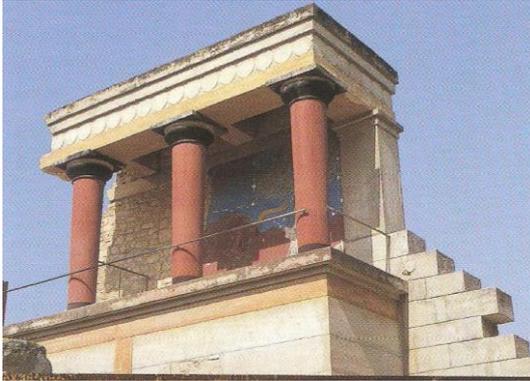


Figura 3.14: *entrata settentrionale del palazzo di Cnosso, isola di Creta, XVII sec a.C. (Bussagli, 2003)*

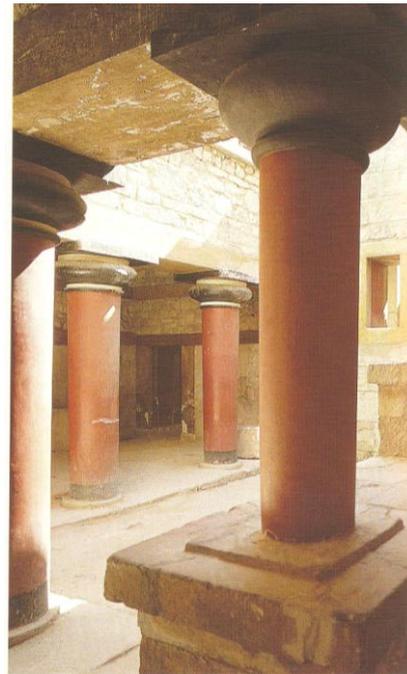


Figura 3.13: *interno del palazzo di Cnosso, isola di Creta, XVII sec a.C. (Bussagli, 2003)*

3.3.3 Le fondazioni

Infine, merita attenta osservazione la tecnica con cui vennero realizzate le fondazioni del palazzo che, costruito su di un colle, era a più piani. I costruttori cretesi prepararono il piano di appoggio, spargendovi sopra uno strato di ghiaia e sabbia sciolta, al fine di livellare le irregolarità del terreno e realizzare un letto deformabile per smorzare le vibrazioni sismiche del suolo. Infatti, la *frequenza fondamentale* dell'edificio, così come quelle del suolo, sono proporzionali alla rigidità, come si può notare dalla seguente formula che permette di calcolare il *periodo proprio di vibrazione* di una struttura in funzione della sua massa m e rigidità k :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Essendo:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} : \text{periodo}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} = 2\pi f : \text{pulsazione}$$

$$f = \frac{1}{T} : \text{frequenza}$$

Quindi, la *frequenza propria*, che è inversamente proporzionale al periodo, sarà alta per banchi rocciosi e basse per suoli soffici, che per tale motivo svolgono la funzione di allontanarla dagli alti valori di frequenza fondamentale dell'input sismico. Ciò è un notevole beneficio, poiché l'ampiezza della risposta dinamica di un edificio ad una sollecitazione, dipende dal rapporto tra la frequenza fondamentale dell'input e quella propria della struttura. Tanto più le due frequenze sono vicine, tanto più la risposta è amplificata e qualora i due valori coincidessero si avrebbe il catastrofico fenomeno della *risonanza*.

Si può considerare tale soluzione tecnica come l'antenato dei moderni *isolatori sismici*, cioè apparecchi realizzati in gomma o con molle di acciaio che, posti sotto l'edificio, ammortizzano i colpi inferti dal terremoto. Alcuni di essi sono riportati nelle immagini 3.15, 3.16, 3.17:

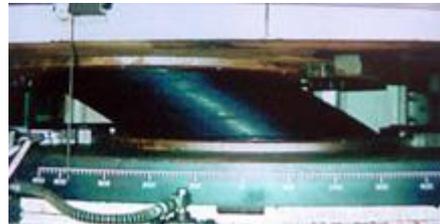


Figure 3.15, 3.16, 3.17: esempi di isolatori sismici

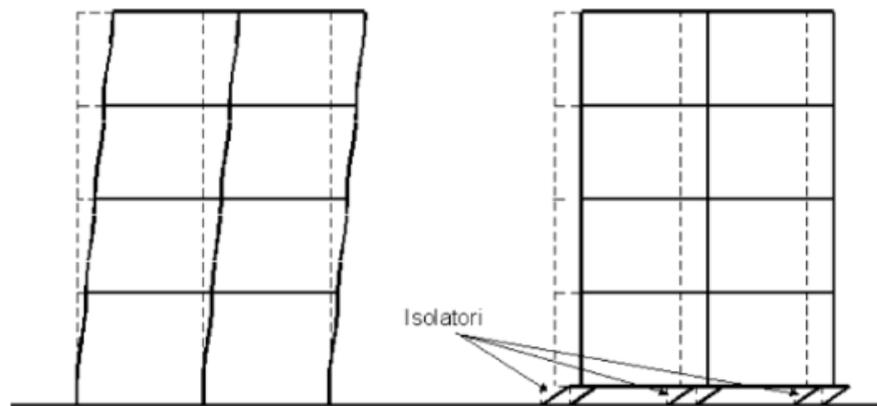


Figura 3.18: Comportamento di un edificio a base fissa e di uno isolato alla base

Essi trasformano l'intera struttura in un *oscillatore semplice*, cioè un sistema ad un grado di libertà e, essendo molto flessibili alla traslazione laterale, concentrano la deformazione su di essi ed innalzano il periodo proprio di vibrazione del sistema T , abbassando così la frequenza f .

3.4 L'architettura micenea

La cosiddetta civiltà "micenea" si svolse soprattutto nel Peloponneso e, pur mostrando contatti con la civiltà minoica, fu diversa da essa in quanto più povera, legata alle tradizioni agricole e pastorali. Data la sua posizione geografica, per sopravvivere aveva bisogno di combattere e quindi le città erano potentemente fortificate. Al contrario delle città-palazzo cretesi, che erano ampie, libere e aperte, in quanto la propria sicurezza era affidata al mare Egeo che circondava l'isola e quindi alle navi che lo presiedevano, a Micene e a Tirinto sorsero città-fortezza, più piccole, fortificate e posizionate in collina.

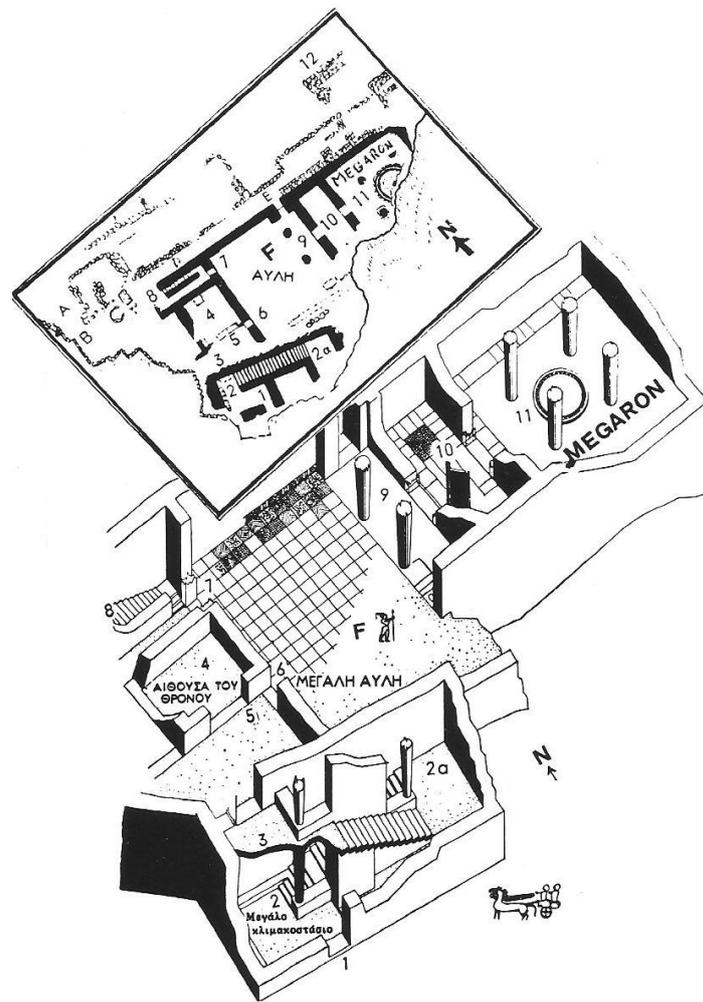


Figura 3.19: pianta e ricostruzione del palazzo di Micene, XIV secolo a.C. (Meletzis e Papadakis, 1980)

Come si può osservare dalla ricostruzione della pianta in figura 3.19, nel cuore del palazzo vi era un ambiente tipico chiamato *megaron* che consisteva in un vano ampio a pianta rettangolare la cui copertura era sostenuta da 4 colonne lignee e con il focolare al centro, preceduto da un vestibolo d'ingresso e da un porticato. Era la sala principale dove ci si riuniva e dove venivano accolti gli ospiti. Il megaron, oltre alla funzione specifica nel palazzo miceneo, riveste un interesse storico poiché vi si riconosce l'impianto planimetrico (atrio e sala) che sarà poi costante nel tempio greco, rappresentando quindi la prima cellula compositiva (*naos*) dei futuri templi della Grecia classica.

3.4.1 Le mura ciclopiche

La città di Micene, antica capitale della Grecia, ove la leggenda decantata da Omero collocava le mitiche vicende di Agamennone (il re che condusse l'esercito acheo contro Troia), si erge sulla collina nella zona nord-occidentale di Argo. Sulla vetta sorgeva l'Acropoli, alta 278 metri e dal XIV secolo a.C. circondata da una ciclopica muraglia, realizzata accostando grosse pietre di forma irregolare in insiemi molto compatti e legandole tra loro con perni in legno, posti entro fori appositamente realizzati. Questa cinta muraria monumentale caratterizzata da uno spessore fino ad 8 metri e da un'altezza massima di 17 metri, secondo il mito venne costruita direttamente dai Ciclopi che la realizzarono con blocchi che pesavano ciascuno più di 10 tonnellate.

Nel 1850 un professore di diritto romano a Basilea, Jakob Bachofen, osservando i resti delle mura notò che esse mostravano tecniche costruttive diverse a seconda dei tratti:

- i tratti vicini alle porte erano di fattura accurata con blocchi regolari e squadrate, con superficie perfettamente definite poste a contatto;
- nella maggior parte dei rimanenti tratti, i blocchi erano di forma irregolare, di varie dimensioni con gli interspazi riempiti usando pietre di dimensioni minori (*stile ciclopico*);
- in alcuni tratti, i blocchi erano di molteplici forme geometriche ma perfettamente accostati l'uno all'altro (*tipologia poligonale*).

Contestando la diffusa opinione secondo la quale i tre tipi di muratura risalissero ad epoche diverse, lo storico era convinto che esse erano frutto ed opera di uno stesso periodo, essendo tutte e tre dotate di quella concatenazione tra i massi che rende monolitica la muratura e garantisce un uguale comportamento a livello prestazionale.

3.4.2 La porta dei leoni

L'ingresso alla cittadella avveniva tramite delle porte monumentali, di cui resta la celebre Porta dei Leoni, adiacente al bastione occidentale delle mura di Micene. La famosa porta (figura 3.20) risulta costituita da quattro poderosi ed essenziali monoliti, corrispondenti ai quattro fattori indispensabili per l'apertura: la soglia, i due stipiti e l'architrave. Al di sopra dell'architrave vi era un altro monolite, di forma triangolare con la funzione statica di far scivolare lungo i lati il peso delle enormi pietre che si addossano e scaricarlo

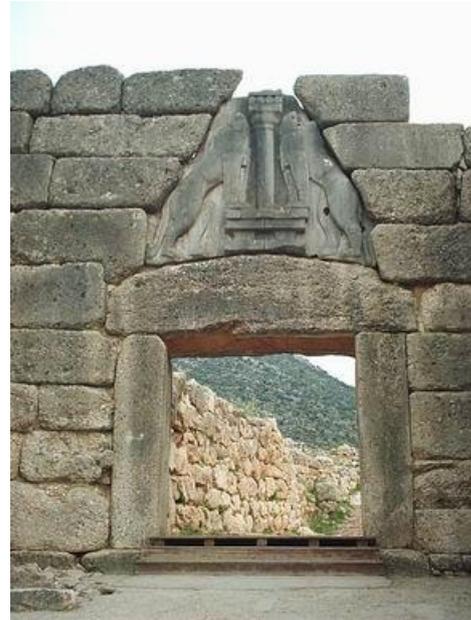


Figura 3.20: Porta dei Leoni, Micene, XIV sec a.C.

sugli stipiti. Tutto è semplificato ed elementare, in quanto finalizzato alla difesa, ma su tale blocco calcareo triangolare vi è l'unica decorazione del complesso architettonico e che dà il nome alla porta: due leoni (in realtà due leonesse) affrontate davanti una colonna su cui appoggiano le zampe anteriori. Da rilevare la forma della colonna che, come nell'architettura cretese, risulta rastremata verso il basso. L'architrave avente una luce di 3 metri è a sezione variabile, con altezza crescente, procedendo dalle sezioni di appoggio fino a quella in mezzeria, ottenuta configurando con contorno parabolico l'estradosso del monolite. Vi era



Figura 3.21: porta dei leoni. Khattushash. 1500 a.C.

l'intenzione di far combaciare tutti i contorni dei ciclopici massi, infatti l'intradosso del blocco triangolare è concavo in modo da aderire alla convessità dell'architrave, così come gli altri due suoi lati e i piedritti aderiscono perfettamente ai bordi

delle mura entro le quali la porta è incorporata. Questa conformazione a frammenti di mosaico richiama le tipologie riscontrate tra le rovine della capitale dell'impero Ittita, Khattushash (1500-1200 a.C.), nella Turchia asiatica, e conferma punti di contatto tra le due civiltà. Anche in tale luogo, infatti, si trova una monumentale *porta dei leoni* (figura 3.21) a sezione parabolica che si apriva a tenaglia lungo le ciclopiche mura a doppio paramento della città.

Come già detto, l'architrave monolitico venne sfruttato molto frequentemente nell'architettura megalitica, nuragica, etrusca, persiana, egiziana e greca, ma esempi di architravi ad altezza variabile come quello adottato a Micene sono episodici. Questo rappresenta la geniale risposta di un tecnico all'esigenza statica di offrire maggiore resistenza laddove la richiesta è maggiore, cioè di introdurre una variazione di altezza coerente con la crescita della caratteristica della sollecitazione.

Infatti, in una trave appoggiata agli estremi e soggetta ad un carico uniformemente distribuito, l'andamento del momento flettente è parabolico in funzione dell'ascissa z :

$$M = \frac{1}{2} \cdot q \cdot z \cdot (L - z)$$

ed assume il valore massimo nella sezione di mezzeria pari a: $M_{\max} = \frac{q \cdot L^2}{8}$

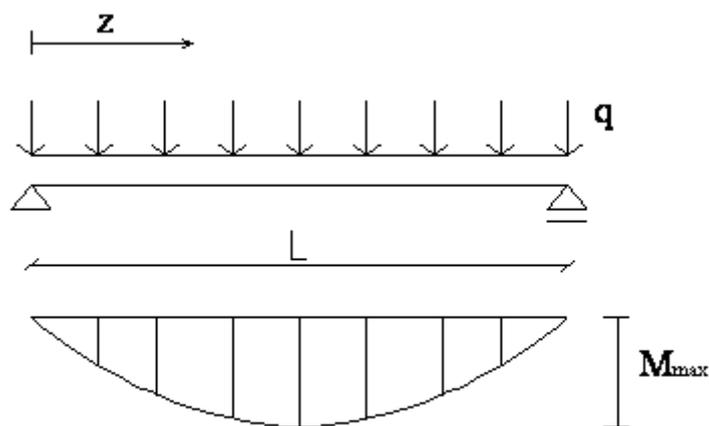


Figura 3.22: andamento del momento flettente per una trave appoggio-appoggio

La trave si inflette sotto il carico e, nella generica sezione, le tensioni orizzontali hanno un andamento lineare a farfalla lungo l'altezza, che pone in compressione

la parte superiore e in trazione quella inferiore. Per sezione rettangolare di base B ed altezza H, il valore massimo della tensione risulta essere ai bordi e pari a:

$$\sigma_{MAX} = \pm \frac{6 \cdot M}{B \cdot H^2}$$

Come si può notare, anche essa è variabile in funzione di H con legge quadratica. Per questo motivo, una variazione di altezza che avvenga con legge quadratica come quella che fa crescere il momento, riuscirebbe a mantenere costante la tensione al variare dell'ascissa z, ottimizzando in tal modo l'elemento strutturale in questione. Quindi, l'andamento parabolico dell'estradosso della trave, si traduce in un puntuale e razionale pareggio tra esigenze e risorse. Infatti, una trave a sezione costante avrebbe dovuto essere dimensionata per resistere al massimo momento flettente e quindi si sarebbe dovuta utilizzare una sezione di altezza pari a quella in mezzzeria, cioè quella massima.

3.4.3 L'edilizia tombale e funeraria

La civiltà micenea, oltre che per gli straordinari preziosi portati alla luce alla fine del 1800, divenne famosa anche per l'edilizia tombale, tanto da rendere le *tholos* funerarie il monumento simbolo dell'Egeo. Esse sono strutture a pianta circolare con un diametro di circa 15 metri che venivano interrate e rivestite da una struttura muraria, avente la configurazione di un conoide. Tali strutture di copertura non esercitano spinte sugli appoggi e, come già visto (cfr. 2.2), si definiscono *pseudocupole*, cioè nonostante abbiano la forma di una cupola non posseggono né lo stesso schema statico, né le medesime distribuzioni di sforzi interni di una struttura a cupola. Esse sono costruite tramite blocchi lapidei regolari e piatti, disposti secondo anelli concentrici di diametro decrescente via via che si sale verso la sommità, affinché ciascun blocco poggi a mensola su quello che gli è sotto, ed il terreno di ricoprimento garantisca la stabilità del sistema.

Infatti, come riportato in figura 3.23, il terreno fornisce al generico blocco B, di peso proprio P, una forza stabilizzante P1, posizionata a sinistra del baricentro del blocco, mentre il sovrastante blocco A esercita un'azione ribaltante pari a P2,

traslata a destra. Affinché la pendenza della parete sia tale da assicurare equilibrio, risulta necessario che la risultante R , delle tre forze P , P_1 e P_2 , cada nel terzo medio della superficie di appoggio del blocco B , larga h .

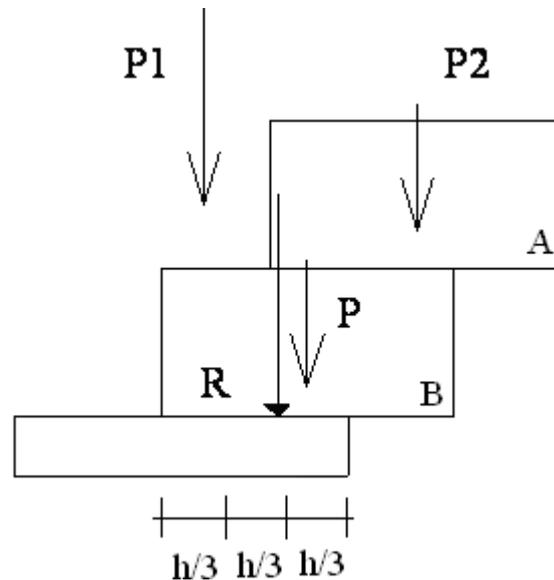


Figura 3.23: schema forze agenti nella pseudocupola

L'equilibrio del sistema, ottenuto grazie ad un'appropriata posizione di ciascuna pietra, veniva raggiunto dai costruttori antichi grazie ad un'operazione istintiva, figlia di convinzioni intuitive e innate, non di conoscenze acquisite con lo studio.

Al fine di migliorare il comportamento sismico, si usavano blocchi con spessore minore in sommità, in modo da ridurre lo spessore della parete e favorire un incremento delle prestazioni sismiche dell'edificio dovuto all'alleggerimento delle masse più alte. Inoltre, la capacità di resistere alle scosse sismiche era affidata anche alla simmetria centrale della costruzione, unitamente all'utilizzo di perni e spinotti in legno.

I blocchi lapidei erano parallelepipedi ricavati dal calcare siliceo del posto che era una roccia sedimentaria sfaldabile, le cui parti sporgenti venivano asportate poi dall'interno, ottenendo così superfici interne lisce e regolari. Dato il tipo di pietra disponibile, la forma a tholos era l'unica soluzione possibile che avevano i micenei per realizzare le tombe, quindi nonostante la similitudine formale con la volta, i micenei non si possono definire i suoi creatori.

3.4.4 Il tesoro di Atreo

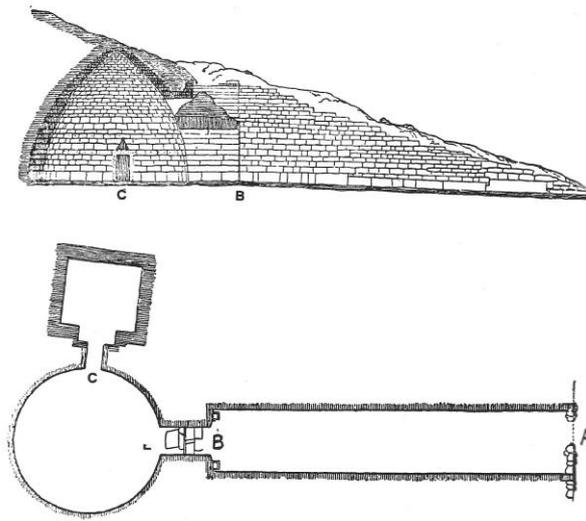


Figura 3.24: spaccato e pianta del Tesoro di Atreo, Micene, XIV sec a.C.

La più importante tomba micenea è quella chiamata Tesoro di Atreo, riportata nelle figure 3.24 e 3.25; è una tomba sotterranea a tholos (C) cui si accede da un corridoio scavato nel terreno, *dromos* (B), attraverso una porta (A) sormontata da un triangolo di scarico, posto sopra un architrave di peso pari a 12 tonnellate. L'ambiente circolare è coperto da una pseudocupola che, come si è già precisato, ha la medesima parvenza di una cupola ma è eretta con una tecnica diversa. Questa *tholos* presenta un diametro di 14,5 metri e un'altezza di 13,2 metri ed è formata da 33 anelli concentrici di pietre aggettanti l'una sull'altra e un tempo ornate da rosette bronzee. Da questo ambiente circolare si passava poi alla camera funeraria di forma quadrangolare, di lato pari a 6 metri e di altezza 5 metri. Il corridoio è lungo 36 e largo 6 metri.

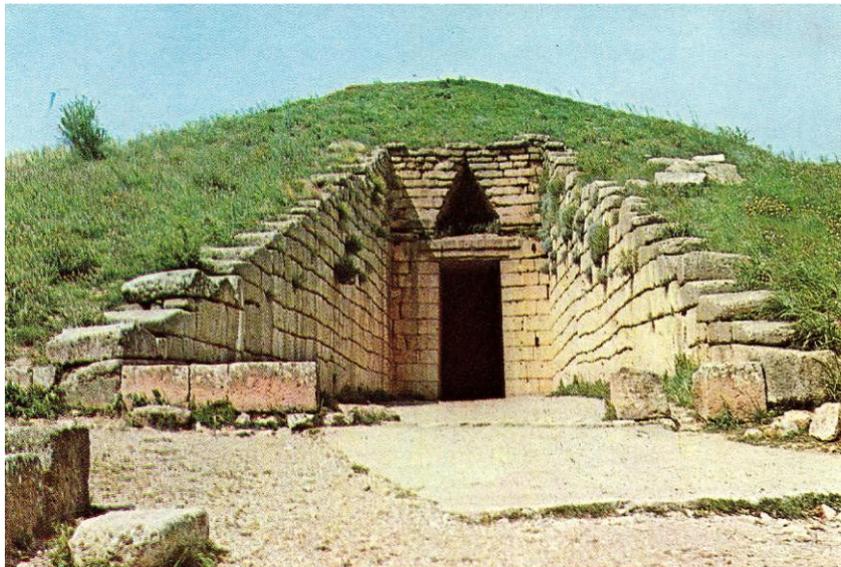


Figura 3.25: accesso al Tesoro di Atreo, Micene, XIV sec a.C.

3.4.5 La pseudocupola in giro per il mondo

Fin dagli albori della storia numerose civiltà, localizzate in disparate regioni del globo, hanno utilizzato la pseudocupola, anche denominata *cupola impropria*, per realizzare la copertura dei propri edifici, siano essi di carattere amministrativo, residenziale e religioso. È da evidenziare come civiltà lontane tra loro, senza alcuna possibilità di scambi culturali reciproci, nate in regioni dalle caratteristiche geomorfologiche e climatiche completamente agli antipodi, aventi tradizioni e disponibilità di materiale differenti, abbiano realizzato diverse costruzioni usando il medesimo schema strutturale: il sistema pseudospingente.

Si riportano alcuni esempi di coperture che, realizzate con tecniche e materiali diversi, si considerano le antenate delle cupole propriamente dette. Alcune di esse appartengono alla tradizione costruttiva del passato, come le tombe a tholos micenee ed etrusche, mentre altre sono ancora in uso in certe regioni della Terra, come gli igloo eschimesi e le yurta dell'Asia centrale.

3.4.5.1 In Italia: i nuraghi e i trulli

Stessa soluzione tecnica per coprire uno spazio circolare, fu adottata dai costruttori dei *nuraghi* (dal tema antico-sardo *nurra*: mucchio di sassi, con il suffisso sardo *aghe*), ovvero case-fortezza delle popolazioni indigene di cui si hanno circa 70000 esempi in tutta la Sardegna (figura 3.26). A forma tronco-conica, sono formati da filari concentrici di grossi blocchi di pietra, che si restringono verso l'alto, fino a formare una pseudocupola per coprire l'unico ampio vano centrale, raggiungibile tramite una porta esterna architravata e da un corridoio.



Figura 3.26: esterno ed interno dei nuraghi

Essi sono dei monumenti megalitici (cioè fatti con grandi pietre), risalenti circa al X secolo a.C., ma caratteristiche analoghe a quella dei nuraghi sardi, si trovano nei *trulli* (dal greco *troullos*: cupola) pugliesi che, caratterizzati dal corpo cilindrico bianco e dalla scura pseudocupola, hanno origine antichissima, ma non ancora del tutto precisata. Infatti, si pensa che tali costruzioni in pietra a secco siano di origini protostoriche, ma non si sono mai trovati trulli più antichi di quelli risalenti al XVI secolo d.C., a ridosso dell'Altopiano della Murgia. Evidentemente, per motivi economici era preferibile abbattere il trullo e ricostruirlo riutilizzandone il materiale, piuttosto che ripararlo in caso di dissesto. Sul perimetro circolare della pianta venivano realizzate murature a sacco di notevole spessore che, sebbene riducevano l'abitabilità degli spazi interni, garantivano, insieme con il ridotto dimensionamento e numero delle aperture, una elevata inerzia termica.

La pseudocupola che costituisce la copertura è una struttura autoportante costruita, senza bisogno di centine, da una serie di lastre orizzontali disposte ad anelli concentrici aggettanti. Si formano dei gradini che rientrano mano a mano che si sale verso l'alto, in cui ogni giro completo è staticamente equilibrato con quelli inferiori. Le lastre calcaree che costituiscono la parte intradossale della copertura vengono chiamate *chianche* e sono di maggiore spessore rispetto quelle dello strato esterno, dette *chiancarelle*. Il tetto termina con una chiave di volta, spesso scolpita con elementi lapidei decorativi sporgenti al vertice del conoide di copertura, come si può osservare dalla figura 3.26.



Figura 3.26: esterno ed interno dei trulli

3.4.5.2 In India: la stupa

La stupa è il tipo più antico di costruzione architettonica dell'arte buddista e consiste in un tumulo sepolcrale cavo con forma emisferica. Il più famoso esempio è quello della città di Sanchi, nell'India centrale, ove l'imperatore Asoka il Grande, nel III secolo a.C., fece erigere la *Grande Stupa*, destinata a conservare le reliquie del Buddha. Tale edificio religioso, riportato in figura 3.27, era costruito in mattoni e a chiudere la costruzione emisferica veniva posta il cosiddetto *chhatra*, un tetto con la forma del parasole dell'ombrello che nell'iconografia religiosa era un simbolo di potenza.



Figura 3.27: grande stupa, Sanchi, III sec a.C.

3.4.5.3 Nello Yucatan: la falsa volta

Risalente ad un periodo più recente è il Palazzo del Governatore ad Uxmal, nello stato messicano dello Yucatan. L'edificio, costruito dalla civiltà maya intorno al X-XI secolo, è costituito da una parte centrale collegata a due ali da un passaggio coperto da una falsa volta; essa si innalza su filari rientranti ed è chiusa da una pietra in sommità. Altro esempio di pseudocupola si ha nel contemporaneo Osservatorio, chiamato "Caracol", situato ad Chichen Itza, sempre nello Yucatan.

3.4.5.4 Nel Canada del nord: gli iglù

L'iglù (in eschimese letteralmente *casa*) è un rifugio a forma di cupola costruito con blocchi di neve pressata, sagomati diversamente a seconda di dove devono essere posizionati, in modo da costruire una parete sferica. Per ottenere una

curvatura ottimale, si usa una corda fissata al centro della base, usata come misura del raggio della cupola. I mattoni di neve sono montati seguendo una spirale o posizionati in cerchi con diametro decrescente salendo verso la sommità, in cui è lasciato un foro per la ventilazione e per la fuoriuscita del fumo del fuoco, necessario a scaldare l'ambiente. Finita la cupola, si scava nella parete un foro d'entrata preceduto da un basso corridoio, protetto da una cupola per contrastare l'entrata di raffiche di vento.

3.4.5.5 In Mongolia: la yurta

Essa è un'abitazione mobile adottata da molti popoli dell'Asia media e centrale, tra cui mongoli, kasaki e uzbeki. Di forma cilindro-conica con armatura



Figura 3.28: esempio di yurta mongola

scomponibile in vari elementi, le yurte hanno pareti costituite da uno scheletro di graticci incurvati di legno di salice uniti a catena. La copertura è realizzata con stuoie e tappeti di feltro che, fissati con stringhe allo scheletro, isolano l'abitazione dagli agenti atmosferici. Nonostante dalla seconda metà del 1900, la

Mongolia si sia fortemente urbanizzata, più della metà della popolazione continua a vivere nelle loro abitazioni tradizionali, sia che si tratti di nomadi di campagna che di abitanti di città e villaggi.

3.5 Innovazioni etrusche

Tra le popolazioni pre-romane, assume grande importanza la civiltà etrusca, a causa della quantità e della qualità dei loro reperti artistici ed architettonici che sono giunti fino ai giorni contemporanei. Portatori di una cultura probabilmente orientalizzante, gli etruschi si insediarono nella zona che da loro prese il nome di Etruria, ad oggi corrispondente alla Toscana, Umbria occidentale e Lazio settentrionale. Nel momento della loro massima espansione (VII-VI secolo a.C.) estesero il loro dominio al sud, fino in Campania e a nord, al di là dell'Appennino,

dove fondarono numerose città, tra le quali si annoverano: Misa (Marzabotto), Felsina (Bologna), Spina e Adria. Anche Roma fu sotto il loro dominio dall'epoca dei re Tarquinio Prisco (607 a.C.) e Servio Tullio (578 a.C.) fino al 509 a.C., quando Tarquinio il Superbo venne cacciato dalla città. Successivamente, dopo anni di guerre ed alleanze, l'Etruria divenne la Regio VII romana, nel 27 a.C.

3.5.1 *Tempo a podio*

Tipo architettonico di notevole rilevanza della civiltà etrusca fu il *tempio a podio*, che divenne poi il tipico tempio italico, adottato anche dalla civiltà romana, oltre che da altre popolazioni della penisola.

Poiché costruiti con materiale leggero facilmente deperibile, di tali templi oggi resta solamente il basamento in pietra. Il tempio etrusco presentava una certa somiglianza con il tempio greco, ma esso si ergeva sopra ad un alto podio a cui si accedeva tramite una scalinata frontale. Vitruvio li descrive abbastanza larghi da contenere tre *celle* contigue, precedute da un *pronaos* con quattro colonne basse di tipo *tuscanico* e con tetto ampio a due spioventi in legno, privo di quella decorazione che successivamente sarà propria del frontone greco. L'unica ornamentazione dell'edificio era costituita dalle *antefisse*, presenti anche nell'architettura greca, che ornavano le testate terminali dei coppi, le tegole ed inoltre proteggevano le travi del tetto dall'umidità.

L'ordine tuscanico (o toscano) era il preferito dagli etruschi; questo stile riprendeva i caratteri essenziali dell'ordine protodorico, con le ulteriori semplificazioni della colonna liscia, con *echino* rigonfio, *plinto* rotondo e trabeazione priva di decorazione.

3.5.2 *Tombe*

I romani distrussero le città etrusche, ma non le tombe che, essendo sotterranee e realizzate con materiale durevole, furono salvate da manomissioni e danneggiamenti. Esse rivestivano una notevole importanza perchè si credeva che

il defunto continuasse a vivere e quindi spesso erano a forma di casa, con più vani comunicanti, arredate con ricca suppellettile ed ornate con sculture e pitture parietali. Come conseguenza della non unità politica degli etruschi, le tombe erano diverse da città in città e le necropoli ritrovate sono di varia tipologia:

- *a tumulo*, cioè tumuli di terra con forma di scudi posizionati su basamenti in pietra, contornati da cornici sagomate;
- *a camera*, con possibilità di grande decorazioni;
- *a pseudovolta* dette a volta;



Figura 3.29: tomba a pseudovolta, Casale Marittimo, VII sec a.C.

Alla ultima tipologia appartiene la tomba di Casale Marittimo, vicino a Volterra, risalente al 620-600 a.C. che, caratterizzata da un impianto circolare, è sormontata da una pseudocupola, costituita da una serie di anelli concentrici, realizzati con lastre di tufo che si restringono progressivamente verso l'alto, fino a chiudersi con un'ulteriore unica lastra. Tale pseudocupola si differenzia da quella micenea del Tesoro di Atreo poiché le pietre della copertura non sono smussate e si hanno così all'interno gradini circolari a spigolo vivo. Di notevole importanza è la presenza del pilastro centrale, rastremato verso l'alto, con la funzione di collaborare nel sostenere il complesso strutturale, come si vede in figura 3.29.

3.5.3 Arco e volta

Ai fini dello studio intrapreso, giova ricordare gli etruschi anche perché furono i costruttori dei primi archi della storia. Infatti, nelle porte delle città etrusche si ritrovano i primi esempi dell'antichità di arco e di volta a botte circolare, in pietra da taglio. In essi, si può riscontrare una grande maestria nel taglio dei conci, che

presentavano il medesimo spessore in tutti i punti e nelle facce di giunto, che erano tagliate secondo la direzione del raggio di cerchio direttore della volta.

Esempio sublime di tali porte, coperte a volta circolare a cunei, è l'Arco di Volterra, risalente al IV secolo ed annoverato come uno dei primi esempi di arco reale in Italia (figura 3.31). L'arco, molto diverso dallo pseudoarco dal punto di vista costruttivo e statico, veniva realizzato con conci in pietra o in mattoni a forma di cuneo, con lati superiore ed inferiore curveggianti, disposti radialmente. A Volterra, i pilastri sono in pietra arenaria e la sequenza dei grossi conci, in pietra sgrossata e collegati senza calce, è interrotta da tre teste sporgenti agli appoggi e al vertice, che si distaccano anche per la differenza di colore del peperino scuro.

L'arco venne usato dagli etruschi come componente essenziale di un'apertura in altri due casi: quello della Porta Marzia e la Porta di Augusto a Perugia (figura 3.32); i romani lo adottarono poi sistematicamente, cosicché la loro architettura si può definire curvilinea a differenza di quella greca, indicata come rettilinea.

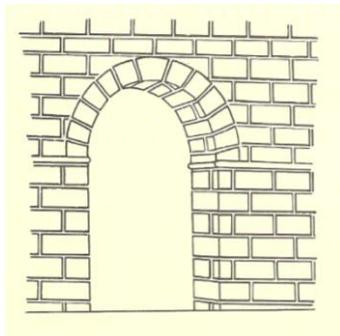


Figura 3.30: schema di arco
(Adorno, 1986)

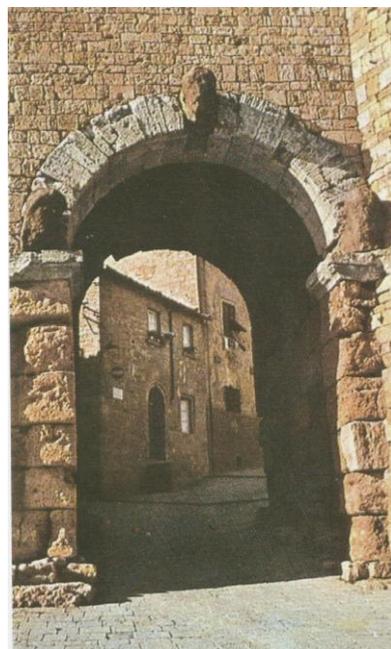


Figura 3.31: Arco di Volterra,
IV sec. a.C.
(Adorno, 1986)

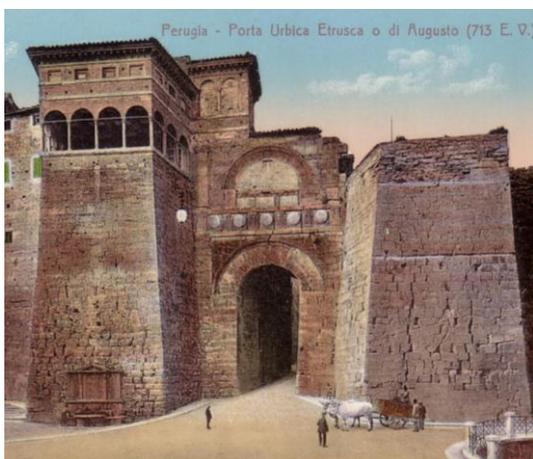


Figura 3.32: Porta di Augusto, Perugia, III sec. a.C.

Derivati dai tipi architettonici di pseudoarco e di pseudovolta delle civiltà pelasgiche e pre-elleniche (tholos micenea), l'*arco a sesto circolare* e la *volta a botte* (di cui un esempio è riportato in figura 3.33) quindi, si trovavano nella loro forma strutturale completa già nell'architettura etrusca, dove vennero utilizzati grandemente negli edifici civili e sacri. Da ricordare che il tipo di volta usato dagli etruschi fu quello a botte e forse era anche l'unico da essi conosciuto.

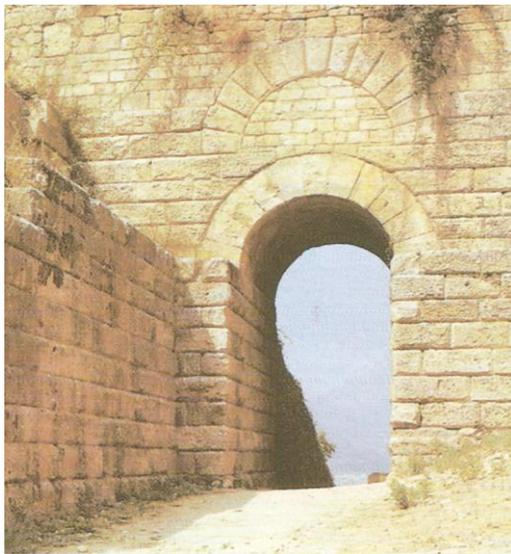


Figura 3.33: volta a botte etrusca

Analogamente agli altri caratteri peculiari della civiltà etrusca, anche tali sistemi architettonici furono ereditati dai romani che li usarono nella costruzione dei loro edifici e li trasformarono anche, dando origine a forme di volta composte, come per esempio la *volta a crociera*.

La diffusione dell'arco e della volta a cunei avvenne nelle regioni dove vi era grande disponibilità di pietra naturale e di legname. Con il legno infatti si realizzavano le centine necessarie alla loro costruzione.

3.5.3.1 Origini del sistema spingente



**Figura 3.34: Porta Rosa, Elea, 350 a.C.
(Adorno, 1986)**

Nonostante quelli etruschi siano tra i più antichi esemplari di schema strutturale spingente, ne esistono degli altri ancora precedenti. Infatti, l'arco era stato già usato secoli prima dagli egizi, assiri e babilonesi e per questo si dice che la sua origine sia orientale. Si ipotizza che i Focei dell'Asia Minore, fondata Elea nel VI secolo a.C., in Magna Grecia, importarono l'arco in Italia e realizzarono le porte della città. L'unica pervenuta, è la *Porta Rosa*, scoperta fra il 1964 e il 1971, e riportata nella foto di figura 3.34. I conci, che non sono

collegati da calce, presentano un taglio nitido e regolare che contribuisce alla perfezione della struttura. È da notare che questa porta fu costruita secondo misure perfettamente calcolabili, il cui modulo è dato dalla larghezza (pari a 2,68 metri) che è la metà dell'altezza totale e così due circonferenze si possono inscrivere perfettamente nella luce dell'arco.

Un'opinione in forte polemica con gli studiosi che, nel corso degli anni, hanno cercato di scoprire quale fosse stato il primo arco della storia, è quella di Gerard Rohlfs. Nel suo testo, intitolato "Primitive costruzioni a cupola", afferma che le prime costruzioni con copertura a pseudocupola nacquero poiché tale struttura era l'unica soluzione a poter essere realizzata, per il livello di tecnologia di allora e con i materiali disponibili che, avendo forma di parallelepipedo, erano facilmente sfaldabili secondo piani. Infatti, egli sostiene che:- La forma a tholos è l'unica praticabile e questo starebbe a giustificazione del fatto che popoli arretrati usavano, ancora alla fine XIX secolo, tali tecniche-. (Rohlfs, 1963). Secondo la sua idea, non ha nemmeno senso affaticarsi per cercare di conferire la paternità nell'uso di tali tecniche ad una delle tante antiche civiltà:- vorrei illuminare il ricorrere sparso e diffuso delle costruzioni in pietra col ricordare che certe antichissime forme di aratri in legno si sono conservate in una conformità sorprendente in paesi europei lontanissimi l'uno dall'altro, senza che si debbano ammettere dell'influenze dell'uno o dell'altro paese. Così come aratri in legno vengono fabbricati ancora tutt'oggi presso molti popoli, anche le costruzioni a cupola in pietra sono reminiscenze di un tipo di costruzione senza tempo, ma antichissimo, che è rimasto vivo e che si è potuto rinnovare là dove sussistevano particolari condizioni locali-. (Rohlfs, 1963). Tale concezione cerca di dare una risposta al problema dell'origine delle tecniche costruttive che, sorprendentemente, si riscontrano già in una fase avanzata in epoche antiche, durante le quali si pensa erroneamente non potessero essere così sviluppate. Concordemente, nella prefazione al saggio *L'Arte dell'Occidente* di Henry Focillon, Emil Bony sostiene:- La tecnica non può essere riassunta in libri di testo e manuali. Essa è una scoperta perpetua; [...] considerando la tecnica come un processo e cercando di ricostruirla come tale, abbiamo la probabilità di superare i fenomeni esteriori e di afferrare le relazioni profonde [...]-. (Bony, 1965)

4. IL TRILITE GRECO

4.1 Templi greci

Il tempio è la massima espressione architettonica del sistema trilitico.

Dal 1200 a.C. circa, cominciarono le invasioni dei dori che poi si insediarono nel Peloponneso, sulle isole dell'Egeo e lungo le coste occidentali dell'Asia minore (l'attuale Turchia), assimilando nella loro cultura sia elementi cretesi, sia micenei. Si può dire che dalla fine del mondo minoico-miceneo al primo apparire della nuova entità etnico-culturale definibile greca, passarono circa cinque secoli e gli storici non riconoscono molti elementi di continuità tra le due civiltà, anche se i dori, responsabili della discesa della vecchia, furono gli stessi animatori per l'ascesa della nuova.

Intorno all'800 a.C., cominciò a formarsi una identità nazionale di tutta la penisola ellenica e nacque una civiltà che condivideva stessi miti, culti e feste, caratterizzata da una comune cultura e da una nuova struttura politica che si fondava sulla *polis*. Elemento di continuità con il passato, oltre la lingua, fu il *megaron*, dalla cui forma derivò la prima cellula costitutiva del tempio greco: il *naos*, cioè la cella interna. Questa era il cuore del tempio, una stanza a pianta rettangolare, circondata da pareti murarie e coperta da un tetto ligneo a spioventi, realizzata per alloggiare la statua della divinità. Davanti vi era il *pronaos*, un atrio costituito o dal prolungamento delle pareti laterali del naos, racchiudenti nel lato anteriore due o quattro colonne in legno (tempio *in antis*), o da una serie di colonne trabeate (tempio *prostylos*). Con il progressivo aumentare delle dimensioni della cella, risultò necessario, diminuire le luci delle travi di sostegno e ricorrere a colonne posizionate anche internamente. Queste potevano essere:

- allineate lungo l'asse mediano della cella;
- posizionate su due file parallele.

Nella seconda metà del VIII secolo a.C., l'edificio venne circondato quasi sempre da una fila di colonne esterne (tempio *peripteros*), e più raramente da una doppia

fila (*tempio dipteros*). Dato che all'interno della cella erano ammessi solo i sacerdoti, lo sviluppo del tempio era soprattutto esterno, infatti il rito si svolgeva fuori ed era dalle campagne circostanti che il tempio veniva osservato nella sua maestosità e percepito nei suoi valori ideali. Ciò giustifica l'attenzione data alle colonne che costituiscono l'elemento visivamente più rilevante. A seconda del numero di colonne sul fronte, il tempio può essere *tetrastilo*, *pentastilo*, *esastilo*, *octastilo*, *decastilo*, *dodecastilo*, *polistilo*.

Mentre lo schema della pianta non è mai mutato, nell'alzata, e cioè nella struttura colonnare e nella decorazione, si alternarono tre stili: dorico, ionico e corinzio. Si definiscono anche *ordini*, poiché vi era una disposizione organica tra le parti, secondo un criterio armonico tendente a costruire un insieme architettonico unitario. Il tempio raggiunse quindi il suo tipo ideale che, indipendentemente dalle differenze fra i vari ordini, risultò caratterizzare l'architettura sacra dell'antica Grecia.

Grande differenza rispetto alle basiliche cristiane è che i templi greci non dovevano accogliere masse di fedeli in preghiera ma, come già detto, si configuravano come opere scultoree più che architettoniche, da vedere all'esterno, più che da vivere all'interno. Infatti, il naos era di dimensioni ridotte, in quanto finalizzato ad ospitare la statua della divinità e pochi altri celebranti e lo spazio tra colonnato e parete della cella era angusto, al massimo volto ad accogliere fedeli in caso di emergenza, come per improvvisi violenti scrosci di pioggia.

I templi ancora esistenti in Sicilia e nell'Italia meridionale, mostrano peristili più ampi ad indicare una maggiore sensibilità delle popolazioni italiche agli spazi interni. Per esempio, nel Tempio di Atena a Siracusa (VII secolo a.C.), il peristilio era tanto spazioso da poter essere trasformato successivamente in navata laterale. In seguito anche ad altri interventi, quali quelli di traforare le pareti della cella e di tamponare le peristasi per realizzare il muro perimetrale, l'edificio sacro alle divinità pagane divenne il duomo cattolico della città.

4.1.1 Struttura del tempio dorico

In questo tempio, che è quello che si ritiene il più antico, la colonna, priva di una propria base, si appoggia direttamente sulla piattaforma sottostante a tutto l'edificio, chiamata *stilobate*. La colonna trarrebbe la sua origine dai tronchi d'albero posti inizialmente a sostegno del tempio, come dimostrato dallo storico Pausania nel II secolo a.C., che menziona la presenza di una colonna in legno di quercia nella parte posteriore dell'Heràion di Olimpia, ancora esistente alla sua epoca. Progressivamente, le colonne lignee vennero sostituite da elementi analoghi in pietra, in cui il fusto era realizzato con blocchi cilindrici di marmo (*rocchi o tamburi*) sovrapposti l'uno all'altro. Al contrario di ciò che si è visto nelle costruzioni della civiltà cretese-minoica, la colonna dei templi greci risulta rastremata verso l'alto e percorsa da una serie di scanalature verticali, il cui crinale divisorio era tagliato ad angolo vivo. Tali scanalature, come delle linee di forza, ne sottolineano la funzione di sostegno e risaltano in confronto alla muratura levigata della cella. In sommità, la colonna è ornata con il *collarino* ed è coronata dal *capitello*, costituito da due elementi: l'*echino*, cioè una specie di cuscino a pianta circolare e l'*abaco*, una lastra quadrangolare; si può quindi dire che il capitello dorico, con la sua combinazione di una rosetta rigonfia e di un parallelepipedo, è l'elemento di mediazione tra il fusto rotondo e l'architrave squadrato.

Come rappresentato nello schema di figura 4.1, sopra le colonne corre la trabeazione formata dal basso in alto da i seguenti tre elementi:

- *architrave* liscio, poggiata sui capitelli delle colonne, che raccorda orizzontalmente gli elementi verticali;
- *fregio*, composto da lastre aggettanti con tre scanalature, aventi funzione protettiva e decorativa (*triglifi*) e da altre tavole quadrangolari rientranti alternate alle prime, scolpite con figure (*mètope*);
- *geison*, cioè una sovrastante cornice;

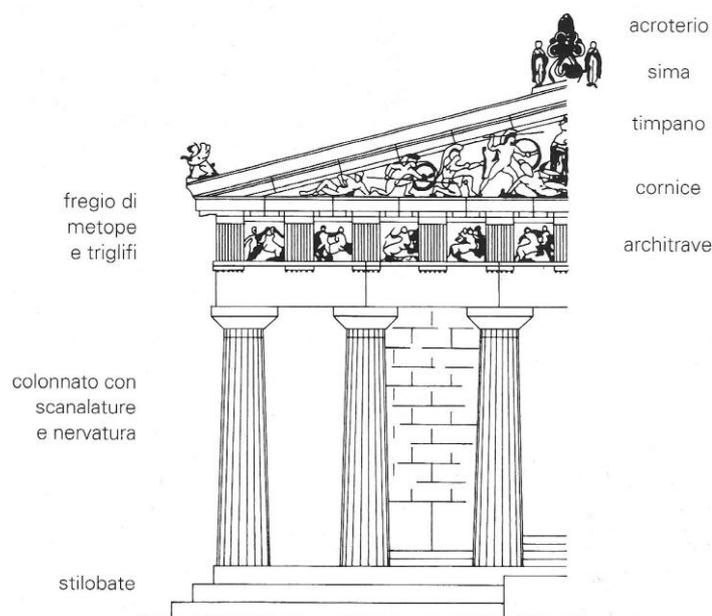


Figura 4.1: schema del tempio dorico (Melhose, 1999)

Il tetto dei templi greci era costituito da due superfici piane spioventi, una a destra ed una a sinistra, realizzato con legno e terracotta, materiali che con il tempo non hanno resistito ed infatti le coperture non sono giunte fino ai nostri giorni. Tale tetto a falde inclinate era sorretto da travi in legno che, dopo aver attraversato tutto l'edificio, terminavano sul recinto colonnato appoggiandosi alle architravi. Coloro che avessero guardato il tempio dall'esterno, non avrebbero visto le testate delle travi, poiché nascoste dai triglifi.

Sui lati corti del tempio, vi erano i *frontoni*, cioè superfici triangolari definite dagli spioventi del tetto, dal geison orizzontale e da un'altra cornice obliqua. Si delinea così il *timpano*, con funzione di sostegno della copertura e, al contempo, elemento di abbellimento, in quanto arricchito da sculture in rilievo, spesso in composizioni grandiose.

Nel periodo arcaico, gli elementi strutturali e decorativi sopra elencati erano in legno e poi, dal VI secolo a.C., si passò alla loro realizzazione con la pietra, fatta eccezione per le travi di copertura a sostegno del tetto che mantennero la loro fattura lignea.

Circa le travi portanti del tetto, Vitruvio si concentrò sui problemi di natura statica e di durabilità:- Sopra le colonne vanno impostate travi composte, di altezza adeguata alla luce. Esse avranno spessore pari al collarino delle colonne, e

saranno assemblate con il ricorso a biette, ma in modo che sia mantenuto tra le parti componenti, un distacco di due pollici. Infatti, se le travi fossero composte da parti a contatto, senza che queste consentano la circolazione dell'aria, esse marcirebbero al più presto-. (Vitruvio, I secolo a.C.)

Alcuni studiosi, tra cui De Angelis d'Ossat, sostengono che le travi fossero composte da tre tavoloni, coerentemente con la tripartizione presente nelle decorazioni dei triglifi.

Da citare anche il pensiero di Viollet-le-Duc, secondo il quale, data la posizione dei triglifi collocati in asse con le colonne sottostanti, essi sarebbero stati posti in opera da soli e per primi, con la doppia funzione di:

1. consentire un facile montaggio del gocciolatoio, cornice e frontone;
2. trasmettere i carichi alla sottostante architrave, in modo da alleggerire la trave, con riduzione degli sforzi di flessione nella sezione a maggior rischio di fratture, cioè quella di mezzeria.

Essi si configurano così come una sorta di colonna corta, intesa un prolungamento della colonna dell'epistilio, di cui riprendevano anche il motivo delle scanature verticali.

Viollet-le-Duc, nell'opera "Entretiens sur l'Architecture", ha affrontato anche il problema delle colonne d'angolo che, secondo la sua opinione, angosciava il costruttore greco:- La cella è come circondata da un portico; ma gli angoli lo preoccupano: egli vede su questi punti delle colonne isolate che devono sopportare un peso maggiore delle altre; egli diffida della resistenza degli architravi; prevede che se uno degli architravi poggianti sull'angolo si spezza la colonna non è più in grado di reggere la spinta che così si genera e che la spinge in fuori. La ragione gli suggerisce allora di diminuire l'interasse tra la colonna d'angolo e quelle immediatamente vicine e di aumentare il diametro della colonna angolare. Questa differenza tra gli assi delle colonne gli consente di piazzare un triglifo sull'angolo senza aumentare in modo sensibile l'intervallo tra i tre ultimi triglifi-. (Viollet-le-Duc, 1837)

4.1.2 I materiali e la costruzione

La pietra utilizzata per la realizzazione delle colonne e della trabeazione era calcare, ricavato da cave nelle vicinanze del cantiere. Se il Partenone è stato costruito con marmo pentelico, prelevato da un monte ateniese vicino all'Acropoli, chiamato Pentelo, i templi siciliani sono stati realizzati in arenaria tufacea. Il trasporto dei giganteschi blocchi di pietra avveniva facendoli rotolare al traino e poi una volta in cantiere, venivano sollevati e montati usando gli elementari meccanismi della leva, del piano inclinato e della carrucola. Arrivati nella posizione definitiva all'interno dell'organismo in costruzione, i rocchi venivano lavorati e scolpiti. Ovviamente, il fusto delle colonne veniva scanalato e dopo avere realizzato il capitello, l'abaco serviva da piattaforma di lavoro durante il difficile montaggio degli elementi litici sovrastanti.

Vitruvio ha descritto il trasporto dei fusti di colonna dalla cava al tempio di Diana ad Efeso avvenuto, secondo i suoi scritti, tramite coppie di buoi che trainavano i fusti coricati, rotolanti senza intoppi su perni e cuscinetti.

Anche Viollet-le-Duc, in seguito ai propri studi ed osservazioni fatte durante i suoi viaggi in Italia, ha descritto le fasi costruttive di un tempio dorico con estrema chiarezza:- L'architetto ha bisogno di colonne e comprende che questi pilastri isolati, per presentare una perfetta stabilità, devono essere composti da blocchi il più possibile grandi. Ma le cave di estrazione, le strade ed i mezzi di trasporto non consentono l'uso di grandi monoliti. Grosso modo deve procedere in questo modo: sceglie il banco sul pendio, vi traccia la colonna, la fa scavare poi poggiare sulla superficie laterale e rotolare [...]. In basso scava un foro quadrato sulle due basi del rocco, vi mette mozzi ed intorno ruote-. (Viollet-le-Duc, 1837)

Nel caso del tempio siciliano di Selinunte, la cava si trovava in una cittadina chiamata Cusa, collocata ad 11 chilometri di distanza. Qui le colonne venivano isolate dal masso roccioso, già configurate secondo la desiderata sagoma cilindrica, prima di essere distaccate e trasportate in cantiere. Infatti, Viollet-le-Duc racconta: -Queste non sono ipotesi. Ciascuno può vedere a Selinunte le cave che servivano agli abitanti delle colonie greche: cilindri enormi col diametro di

3,5 metri alti da 2 a 3 metri sono ancora attaccati al banco calcareo-. (Viollet-le-Duc, 1837)

Ed ancora, circa la costruzione del tempio al di sopra del basamento, sostiene:-
[...] costruiti i muri della cella, erette le colonne, l'architetto osserva che gli architravi a causa della eccessiva lunghezza possono spezzarsi: egli pone allora sopra ai capitelli basi più larghe del diametro delle colonne. Le due facce del dado devono perciò sbalzare[...] ma vi è sbalzo anche tra le facce anteriore e posteriore[...] e non vi sarebbe ragione alcuna. Ma è una esigenza costruttiva: le parti sporgenti, anteriore e posteriore, servono da piano di appoggio per gli operai che manovrano gli architravi: la loro distanza e la loro posizione è tale da escludere che la posizione degli architravi possa risultare eccentrica rispetto all'asse delle colonne[...]. I costruttori sono sempre stati avari di armature di sostegno; essi non amavano fare costruzioni inutili-. (Viollet-le-duc, 1837)

4.1.3 Dimensionamento degli elementi strutturali

In Egitto, l'architettura e con essa le tecniche necessarie per erigere templi e piramidi erano considerati come dei segreti, accessibili solo ad una stretta cerchia di tecnici. Invece, la diffusione di uno stile greco unitario, nella costruzione di templi in tutto il Mediterraneo, fu il risultato di una tecnica che rispondeva a leggi matematiche; in tal modo, questo tipo di sapere era accessibile a tutti, realizzando il più alto ideale teorico della Grecia classica: la libertà dell'individuo. In un mondo che tendeva quindi alla emancipazione dell'uomo, era logico che le case degli dei non avessero proporzioni astratte, ma rispondessero ai criteri dell'esperienza umana e per questo gli elementi del tempio dorico, sia per le forme delle diverse componenti, sia per l'insieme, prendevano come modello il corpo umano. Il tempio greco quindi è a misura d'uomo, non grandioso come quello egizio che cerca di imporsi sull'uomo, ma percepibile nell'esatto calcolo delle sue forme, con la sua armonia e chiarezza. A dimostrazione di ciò, l'autore del *De Architettura*, sosteneva che i templi dorici riproponevano la solidità del corpo maschile, quelli ionici l'esilità di quello femminile e quelli corinzi le caratteristiche del corpo di un fanciullo.

Inoltre, Vitruvio affermava che la composizione del tempio:-[...]si basa sulla simmetria i cui principi l'architetto deve rispettare scrupolosamente[...]; infatti nessun tempio può avere equilibrio compositivo senza rispettare simmetria e proporzione, come è per la perfetta armonia di un uomo ben formato-. (Vitruvio, I secolo d.C.)

Tale è il dogma vitruviano che ha valore universale e viene attuato mediante il rispetto delle proporzioni tra le parti, reso possibile dalla esistenza di un *modulo* fisso, al quale siano rapportabili tutti gli elementi della costruzione e la fabbrica nel suo insieme. Questo dogma assume anche il valore di scienza del costruire, qualora siano rispettate le regole di natura tecnica e tecnologica che costituiscono, nel loro complesso, la *firmitas*. La spiegazione di tale dogma è fornita con la metafora-analogia del corpo umano e delle unità di misura che ne derivano:-Se si è dunque d'accordo sul fatto che il sistema numerico è ricavato in base alle membra del corpo e che tra ognuna di esse singolarmente presa e l'insieme della figura umana esiste una costante corrispondenza simmetrica, ne consegue che dobbiamo ammirare quegli architetti che anche nella progettazione dei templi degli dei immortali disposero i vari elementi dell'opera in modo tale da ottenere nel rispetto delle proporzioni e della simmetria una adeguata disposizione delle parti e dell'insieme-.(Vitruvio, I secolo d.C.)

Quindi, il dimensionamento degli elementi era del tutto affidato alla metodologia modulare, in cui il modulo veniva assunto, secondo Vitruvio, pari al diametro della colonna all'*imoscapo*. Lo spazio tra le colonne, cioè l'*intercolumnio* doveva essere di due moduli e un quarto, mentre l'altezza delle colonne, compreso il capitello, doveva essere pari a:

- sei volte il diametro, per un tempio dorico;
- otto volte il diametro, per un tempio ionico;
- nove volte il diametro, per l'ordine corinzio.

L'altezza della trabeazione era circa di un modulo e mezzo per l'ordine dorico e di oltre due moduli per lo ionico ed il corinzio.

Analogamente, i dimensionamenti di Leon Battista Alberti, circa le colonne dei tre ordini, riprendevano quelli proposti di Vitruvio, come si vede dall'immagine 4.2.

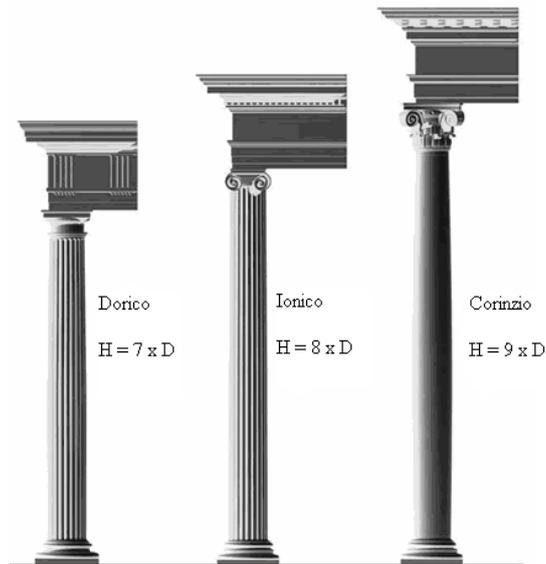


Figura 4.2: dimensionamenti albertiani per colonne greche (Frattini, art. Technologos,)

4.1.4 Correzioni ottiche

Ad un terzo dell'altezza, la colonna subisce un rigonfiamento (*èntasi*) che sembrerebbe una flessione elastica del fusto, per riuscire a sostenere il peso delle strutture portate, ma in realtà, era realizzata per correggere la sensazione di assottigliamento che si avrebbe a metà della colonna, causato da un errore ottico dovuto alla distanza.

Oltre all'entasi, i templi greci presentano altre correzioni ottiche, forse meno evidenti, ma non per questo meno importanti.

Per evitare la sensazione di moto in avanti, le colonne e le pareti sono leggermente inclinate verso l'interno. Le colonne angolari hanno un diametro maggiore rispetto alle altre, perché altrimenti, campeggiando contro uno spazio più ampio, apparirebbero più sottili. Nessuna linea è perfettamente retta, ma acquista tensione da una curvatura impercettibile; ad esempio, lo stilobate presenta un rialzo al centro, di solito corrispondente ad un millesimo della sua lunghezza, mentre tutte le linee orizzontali delle fiancate sono lievemente divergenti a partire dalle due fronti. Cioè, le linee del basamento e della trabeazione non sono rette, ma risultano curve e convesse, contrastando la convergenza prospettica delle linee parallele verso il cosiddetto *punto di fuga*, secondo l'ottica naturale. Alcune di queste correzioni ottiche sono chiaramente

visibili, altre vengono percepite solo dall'inconscio e quindi sono effettivamente riscontrabili tramite la misurazione. L'utilizzo di questi trucchi architettonici rende l'edificio perfetto, immobile e quindi eterno, come la divinità che rappresenta.

4.1.5 Dispositivi antisismici

Come già detto passo importante nell'evoluzione verso il tempio classico, fu la sostituzione degli elementi lignei con blocchi lapidei. Al fine di migliorare le deboli prestazioni sismiche delle pareti in muratura, si realizzava un'ossatura a graticcio, in cui alcuni blocchi erano disposti con il lato maggiore nel senso dello sviluppo longitudinale della parete (*ortostati*) e altri di traverso, in modo da lasciar apparire, sulle superfici esterne della parete, la loro sezione trasversale (*diatoni*). Si parla di opera *isodòma*, qualora gli ortostati di altezza uguale tra loro, erano disposti allineati in file regolari, con il giunto che collegava due blocchi adiacenti posto in corrispondenza del centro del blocco sottostante, mentre la presenza di diatoni rendeva l'opera *pseudo-isòdoma*.

Analogamente a ciò che si è visto per le costruzioni dell'Egeo, elementi lignei, in grado di apportare qualità plastiche all'insieme, erano annegati all'interno delle masse murarie e potevano anche assumere la forma di pilastri, posizionati in corrispondenza degli appoggi delle travi della copertura ed allineati con le colonne esterne. Per rendere solidali i blocchi l'uno all'altro, conferendo maggiore stabilità al sistema muratura, si legavano con perni, che nei tempi arcaici furono in legno e successivamente vennero sostituiti da ganci in bronzo, sigillati con piombo fuso, fatto colare in fori appositamente realizzati nelle pietre. In particolare, i collegamenti presenti erano di due tipi:

1. tra blocchi di filari sovrapposti: chiodature cilindriche;
2. tra blocchi adiacenti: agganci a doppio T.

Il tempio poggiava su di un'ampia platea rettangolare indicata con i termini di *stilobate* o *crepidoma*, il cui piano era posto più in alto rispetto al piano di campagna, di tre o più gradini che, secondo Vitruvio, dovevano essere

necessariamente dispari, in modo che si poggiasse il medesimo piede sul primo e sull'ultimo gradino.

Per filtrare ed abbattere le pericolose onde sismiche, come i costruttori di Creta, anche i greci usavano rendere omogeneo il piano di posa dello stilobate con uno strato soffice, realizzato con materiale di riporto. Ad esempio, nel caso dell'Acropoli di Atene, si utilizzarono i resti e i detriti delle costruzioni distrutte dai persiani (*la colmata persiana*).

4.1.6 Una colonia: Paestum

I primi greci giunti in Italia provenivano dall'isola Eubea e si insediarono nel 750 a.C. ad Ischia, allora chiamata Pithekoussai. Altri, provenienti da Corinto fondarono Siracusa, e successivamente i calcidesi fondarono Cuma, i megaresi Augusta, gli achei Crotone e gli spartani Taranto. Appena dopo un secolo, questi centri erano già talmente prosperosi e potenti da fondare essi stessi altre città come Selinunte, Neapolis, Poseidonia e nel V secolo altri greci, tra cui Pitagora, contribuirono alla nascita di Pozzuoli.

Le colonie erano nuove città fondate per evitare la sovrappopolazione e che l'incremento demografico riducesse il potere e le risorse economiche dello stato greco. Queste nuove città della Sicilia e dell'Italia meridionale, erano autonome rispetto alla madre-patria, ma nonostante ciò erano legate ad essa da continui scambi commerciali e culturali, con un movimento oltre che di merci, anche di idee ed artisti. Talmente imponente fu la colonizzazione greca dell'Italia meridionale, da conferire all'insieme di colonie fondate il nome di Magna Grecia. Alcune colonie divennero più ricche e potenti della stessa città da cui provenivano i fondatori.

Gli storici evidenziano il carattere dorico come quello caratterizzante l'architettura delle colonie e sottolineano anche il ruolo assolutamente non passivo giocato dalle popolazioni autoctone che assorbirono la cultura greca ma, nel contempo, contribuirono anche al suo progressivo arricchimento, con la propria storia e tradizione. Importanti furono i contatti con la civiltà micenea avvenuti prima della colonizzazione greca, che in parte influenzarono l'architettura della Magna

Grecia. A conferma di ciò, il capitello a corona di foglie bacellate della Basilica di Paestum (VI secolo a.C.), che trova il suo riscontro in un capitello pre-ellenico, presente in un tempio dell'Acropoli di Tirinto, denominato appunto *capitello achèo*.

I coloni greci di Sibari, fondarono nel VII secolo la città di Poseidonia, oggi meglio conosciuta con il nome che le diedero e romani: Paestum. Essa è situata nella valle del fiume Sele, tra le propaggini occidentali dei Monti Alburni ed il mare. In essa, vennero costruiti tre templi che sono giunti fino a i giorni d'oggi e che costituiscono un'importante testimonianza dell'ordine dorico arcaico:

- Tempio di Cèrere;
- La Basilica;
- Tempio di Nettuno.

4.1.6.1 Tempio di Nettuno (V secolo.a.C.)

Si annovera come uno degli esempi meglio conservati e migliori di dorico maturo, attento alla perfezione e al rispetto delle regole. Il materiale votivo trovato negli stipi del tempio, ha permesso di ipotizzare che l'edificio sacro riportato in figura 4.3, fosse dedicato alla dea *Hera* e non a *Poseidon* (Nettuno), il dio protettore della città.



Figura 4.3: Tempio di Nettuno, Paestum, V sec a.C. (Adorno, 1986)

Come gli altri templi greci, presenta la faccia rivolta verso l'oriente e tutte le componenti architettoniche in relazione tra loro, dal punto di vista sia della logica sia delle proporzioni. Esso è periptero con 6 colonne sui fronti (*esastilo*) e 14 sui lati, aventi un interasse di 4,5 metri. La loro altezza, compreso il capitello, è pari a 8,88 metri, quella degli architravi e del fregio è rispettivamente pari a 1,488 e 1,433 metri. Le colonne sono caratterizzate da un'entasi non tanto pronunciata, con il diametro che varia da 2,052 alla base a 1,493 metri in sommità. Il peristilio, il cui calpestio è sensibilmente più in basso rispetto a quello del naos, è più largo rispetto al corrispondente spazio dei templi della Grecia metropolitana. Infatti, una caratteristica dei templi delle colonie è

quella di presentare grandi spazi, atti ad accogliere nel tempio le masse di fedeli, a differenza di ciò che avveniva nella madre-patria.

Questo tempio presenta caratteristiche più severe e più arcaiche di quelle delle coeve costruzioni della Grecia. Basta pensare al fatto che il Tempio di Nettuno è contemporaneo al Partenone, ma le novità introdotte da Fidia, tardavano a giungere in un loco come Paestum, lontano da Atene e maggiormente legato alle proprie tradizioni.

Dal punto di vista dei materiali usati, i costruttori del tempio scelsero:

1. travertino, per gli elementi strutturali;
2. arenaria, per i triglifi e le cornici del fregio.

Il travertino venne usato per realizzare gli elementi portanti della struttura a trilita, cioè colonne, capitelli ed architravi. Essi dovevano assorbire grandi sforzi ma non svolgevano alcuna funzione decorativa, coerentemente con la scarsa lavorabilità del travertino tramite scalpello. Attualmente, le colonne in travertino mostrano i segni del degrado: cavità rimaste al posto degli steli vegetali, in origine mescolati al carbonato di calcio, precipitato nelle acque paludose che per due millenni caratterizzarono la pianura malsana ed acquitrinosa del fiume Sele.

L'arenaria si distingue per il colore bruno-giallastro. Alla caratteristica di buona lavorabilità, necessaria per realizzare gli elementi con ruolo decorativo, accoppia però la scarsa resistenza al degrado, dovuta alle trasformazioni fisico-chimiche. Infatti, l'acqua entra nella pietra e deposita cristalli di sale che, rigonfiandosi all'interno dei pori, producono uno stato tensionale che tende ad espellere le scaglie superficiali. La pietra, avendo una bassissima resistenza a trazione non riesce a contenere questa spinta verso l'esterno e inoltre, nel caso in cui l'acqua lievemente acida rimanga nei capillari per molto tempo, essa reagisce con i sali minerali presenti nell'arenaria (i silico-alluminati) e li trasforma in materia argillosa di scarsissime qualità meccaniche. Si verifica così il fenomeno della sfaldatura, notevolmente favorito da una elevata microporosità, come appena dimostrato.

Da ricordare che il tempio era rivestito da uno strato di stucco chiaro che gli conferiva un aspetto marmoreo e che, nel coronamento, vi erano parti

vivacemente colorate. Quest'ultima peculiarità è tipica delle costruzioni del mediterraneo, dovuta all'intensa luminosità delle località meridionali che ha sempre costretto, fin dall'antichità, ad accentuare il valore cromatico delle superfici per superare l'abbagliamento solare.

4.1.7 Il Partenone

Quando Le Corbusier visitò l'Acropoli scrisse:- Il Partenone, questa macchina spaventosa, riduce in polvere tutto quello che esiste nel raggio di tre miglia-. (Le Corbusier, 1911)



*Figura 4.4: il Partenone, Atene, 447-438 a.C.
(Adorno, 1986)*

Situato sull'Acropoli di Atene, dopo essere stato distrutto dai persiani nel 480 a.C., l'edificio fu ricostruito tra il 447 e il 438 a.C., per iniziativa di Pericle. Il famoso scultore Fidia assunse la direzione artistica e come architetti furono scelti Iktino e Kallikrates.

Venne realizzato quindi su una zona che in passato ospitava un altro tempio che doveva essere periptero, dotato di 6×16 colonne. I due costruttori sfruttarono le colonne, smontate e rierette secondo la nuova posizione, e la vecchia platea che fu ampliata solo sul lato Nord, cioè dove il banco roccioso era affiorante, ma non ad Est, dove sarebbero state necessarie grandi operazioni di sbancamento, per la ripidità della sponda della collina.

Costruito in marmo bianco pentelico (cfr. 4.1.2), ha rappresentato per molti secoli la quintessenza della purezza architettonica ed è senza dubbio il più famoso di tutti gli edifici greci.

Il Partenone è la sintesi delle esperienze costruttive fin qui compiute dall'arte greca: vi si realizza completamente l'ideale classico di equilibrata misura.

Esso trae il nome da una sala retrostante la cella detta il *partenone*, perché durante le feste *panatenee*, vi stavano le vergini ateniesi (*parthenoi*), incaricate di servire la dea. Dato che questo ambiente presentava colonne ioniche, è uno dei primi esempi dell'unione dei due ordini: il dorico nelle parti più maestose, lo ionico in quelle più intime.

Dedicato alla dea Athèna Parthènos (Atena vergine), è periptero e in esso si attenua la pesantezza propria dell'ordine dorico, snellendo le colonne e diminuendone l'entasi. Si definisce un nuovo rapporto, che sarà poi caratteristico del periodo classico, fra il numero di colonne frontali e quello delle laterali: le seconde sono il doppio più uno rispetto alle prime. Infatti, come si nota dal fronte riportato in figura 4.4, presenta 8 colonne frontali (*octastilo*), anziché le consuete 6 e 17 sono quelle laterali. In tal modo, il tempio risulta meno lungo e perciò meno sfuggente prospetticamente.

Inoltre, al posto delle 2 colonne del pronao, di fronte alle ante della cella sono collocate 6 colonne doriche. La cella, circondata da due ordini di colonne, è più ampia del solito, per valorizzare la statua della vergine Atene, opera di Fidia. La statua originale era complessivamente alta 15 metri, realizzata in legno ricoperto di avorio e oro, il cui peso era presumibilmente di 44 talenti, cioè circa 1150 Kg. Per quanto riguarda il dimensionamento degli elementi, come consuetudine, il modulo è stato scelto pari al diametro delle colonne, che è di 1,905 metri e si ha:

- l'interasse di 4,87 metri (pari a 2,56 moduli);
- l'altezza delle colonne di 10,43 metri (pari a 5,48 moduli);
- l'altezza della trabeazione di 3 metri (pari a 1,57 moduli).

Sappiamo con certezza dagli scritti lasciatici da Vitruvio che nell'antichità, per ottenere la commissione di un edificio, i progettisti dovessero elaborare e consegnare, oltre che un tracciato geometrico che sviluppasse le superfici della costruzione, anche uno aritmetico che elencasse misure e rapporti proporzionali.

Questo è ciò che hanno fatto anche Iktino e Kallikrates per progettare il Partenone, che risulta come un organismo in cui ogni singola parte è funzionale all'insieme. Tutto è stato calcolato secondo un ordine logico: sia la pianta, sia la fronte sono state costruite in base al *rettangolo aureo*. La sezione aurea, intesa come la parte di un segmento che è la media proporzionale tra il segmento intero e la parte

restante di esso, è stata definita per la prima volta dal matematico tedesco Ohm nel 1835. Nonostante ciò, essa era uno dei fondamenti della proporzione fin dall'età greca, anche prima del III secolo a.C., quando Euclide la definì “divisione in media ed estrema ragione”.

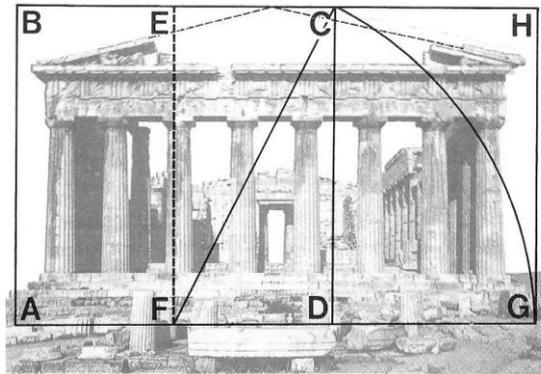


Figura 4.5: schema del rettangolo aureo relativo al fronte del Partenone (Adorno, 1986)

Con riferimento alla figura 4.5, si nota come l'altezza massima del timpano del Partenone è pari alla misura di un lato del quadrato ABCD. Se si divide verticalmente tale quadrato con il segmento EF e, adottando come centro il punto F, si traccia un arco di raggio FC, che interseca in G il prolungamento di AD, si realizza il rettangolo ABHG. Questo viene chiamato *aureo*, in quanto la base AD del quadrato è in sezione aurea, cioè è media proporzionale fra AG e DG.

Per quanto riguarda le misure del Partenone, il modulo a cui i greci si riferivano era il piede attico, pari a 19,24 cm, che rientra rispettivamente 160 e 360 volte nella larghezza e nella lunghezza dello stilobate, che è un rettangolo di dimensione 30,78×69,36 metri. Nella facciata, l'altezza è di 13,46 metri, pari a 70 volte il piede attico.

5. LO SCHEMA SPINGENTE ROMANO

5.1 L'architettura curvilinea dello stato romano

La doppia eredità culturale greca ed etrusca confluì con il regno dell'imperatore Augusto in una specifica forma romana di architettura che perdurò per oltre quattro secoli. L'architettura romana riprese e rielaborò così elementi propri della civiltà etrusca e della civiltà greca ma, al contempo, si differenziò da esse per la nuova concezione dell'opera d'arte, intesa come infallibile strumento di utilità politica e sociale. Per i romani, infatti, l'arte era propaganda politica e l'architettura, espressione del dominio e della grandezza della capitale. Trassero spunto dalle opere classiche soprattutto per quanto riguardava gli elementi di decorazione, contribuendo a diffondere in tutto il mondo l'amore per la "grecità" e, contemporaneamente, perfezionarono le capacità tecniche degli etruschi nella costruzione di strade, ponti, gallerie e, come già affermato, nella realizzazioni di coperture a volta. A tale proposito, vale la pena di ricordare che i romani assicurarono potenza e stabilità al proprio dominio politico anche grazie alle loro grandi opere di ingegneria: strade e acquedotti. Queste mirabili strutture da essi costruite furono, e sono ancora oggi, una grandiosa dimostrazione delle notevoli conoscenze tecniche possedute dai costruttori del tempo, oltre che della perfetta organizzazione amministrativa dello stato romano. In tutti i paesi conquistati, i governanti diedero ordine all'esercito di costruire edifici pubblici a scopi civili, avendo a disposizione una grande quantità di materiale da costruzione, in seguito alla produzione di laterizi nelle proprie fornaci.

Caratteristica peculiare dell'architettura romana e importante differenza rispetto a quella greca, fu l'uso sistematico dell'arco, della volta e della cupola. Questi elementi strutturali permisero di coprire grandi spazi senza sostegni intermedi, scaricando le azioni in maniera razionale, in un prevedibile rapporto di spinte e contropinte.

La linea retta, che si può considerare peculiare del sistema trilitico, ha un inizio e una fine precisi, conferendo così al tempio greco calma e staticità; invece la linea

curva, caratterizzante il modulo ripetitivo di un sistema di archi (*arcate*) o intesa come parte costituente di una volta o di una cupola, non ha né inizio né fine, incarnando con la sua dinamicità la incontrastabile tendenza all'espansione di Roma. L'architettura romana è basata quindi sul cerchio: elemento che viene dominato dal centro e che al contempo si allarga lungo il perimetro. Analogamente, il vastissimo impero si proiettava verso l'esterno dilatandosi fino alle più remote regioni, ma veniva sempre efficacemente governato dal potere centrale, localizzato a Roma, la grande e potente capitale.

Da osservare inoltre che, così come l'arco sale verso l'alto, aspirando a raggiungere altezze sempre più elevate, rimanendo saldamente fissato a terra tramite i piedritti la cui solidità è garanzia per la struttura, così i romani fondarono la propria potenza dominatrice sulla ragione e sulla *virtus*, e con la propria tenacia riuscirono a conquistare tutto il mondo allora conosciuto, espandendosi dalle Colonne d'Ercole al Golfo Persico e dall'Egitto al Vallo di Adriano.

5.2 Il Pantheon



Figura5.1: Pantheon, Roma, 118-128 d.C. (Adorno, 1986)

La cupola più grandiosa che costruirono gli antichi romani è quella del Pantheon in Roma, dove :- troviamo insieme la più alta applicazione che essi fecero della volta, cioè della più importante e della più utile innovazione di cui l'arte edilizia va debitrice ai Romani-. (Breymann, 1885)

5.2.1 La storia

Il Pantheon, situato sul Campo di Marte a Roma, fu l'edificio più importante fatto costruire da Adriano ed è, ad oggi, l'edificio romano che meglio si è conservato. In realtà, in origine venne fatto erigere da Agrippa, figlio di Lucio, tre volte console (così come cita la scritta sulla trabeazione del portico: M. AGRIPPA L.F.COS. TERTIUM. FECIT) nel 27 a.C. per glorificazione della *gens Iulia*.

Il termine Pantheon è di origine greca e significa “tutti gli dei”, infatti il tempio era dedicato alle sette divinità planetarie: Sole, Luna, Venere, Saturno, Giove, Marte e Mercurio, collegate al diffuso culto dei presunti pianeti.

Danneggiato da un primo incendio nel 80 d.C. e poi distrutto da un secondo nel 110 d.C., venne completamente ricostruito da Adriano tra il 118 e il 125 d.C. Si pensa che in questa occasione si aggiunse il pronao, oltre che la citazione a Marco Vipsanio Agrippa. La costruzione faceva parte del grande complesso delle terme di Agrippa, che vennero restaurate insieme alla vicina basilica del Nettuno. Originariamente, il corpo posteriore non era visibile, poiché nascosto da colonnati laterali che contenevano il pronao, in modo da garantire l'effetto sorpresa a chi accedesse all'interno della struttura a cupola. Al 202 d.C. si può far risalire un ulteriore restauro del complesso che prevedeva anche una piazza antistante di dimensioni maggiori rispetto a quelle attuali.

In epoca cristiana, gli ambienti collocati dietro al corpo cilindrico furono adibiti a sagrestia e cappella e, nel 609, papa Bonifacio IV trasformò il tempio pagano in una chiesa cristiana, chiamata Santa Maria della Rotonda.

Nel corso del tempo, il Pantheon fu frequentemente depredato delle sue ornamentazioni e suppellettili, in particolare dei bronzi che ornavano il timpano e il soffitto del pronao e delle tegole in bronzo dorato, sostituite poi con una copertura di piombo. La travatura bronzea del portico venne asportata nel

Seicento da papa Urbano VII Barberini, che la riutilizzò per costruire il Baldacchino di Bernini in San Pietro e per i cannoni di Castel Sant'Angelo.

5.2.2 Il modello e le imitazioni

Già prima del Pantheon, gli stessi romani, ma anche i greci, avevano eretto monumenti a pianta circolare, tra i quali vale la pena menzionare l'Arsinoeion, per la similitudine con l'opera che si sta analizzando. Questa era una *tholos* dedicata ai grandi Dei dell'isola, costruita verso il 270 a.C. a Samotracia, nell'Egeo settentrionale.

Il Pantheon riuscì ad esprimere il senso cosmico dell'armonia universale e divenne un simbolo, ancora di più che il Partenone, delle più elevate aspirazioni politiche e religiose dell'uomo. Il caratteristico accostamento di rotonda e portico fu imitato da Andrea Palladio nella cinquecentesca chiesa del Redentore a Venezia, da Antonio Canova nel tempio di Possano, costruito fra il 1819 e il 1830, da Pietro Bianchi nella chiesa di San Francesco di Paola, realizzata tra il 1817 e il 1849 in piazza del Plebiscito a Napoli e da Pasquale Poccianti nel Cisternone, realizzato tra il 1829 e il 1842 a Livorno. Comunque, a parte i singoli esempi, si può liberamente affermare che essa sia stato il modello a cui si sono ispirati e riferiti tutti i costruttori degli spazi a cupola, fino a Durbar Hall della Residenza del Vicerè, progettata da Lutyens a New Delhi, all'inizio del Novecento.

5.2.3 La geometria

Il Pantheon costituisce una creativa sintesi delle tre tendenze architettoniche più importanti del periodo:

1. attenzione alla creazione dello spazio interno;
2. sopravvivenza delle forme classiche;
3. uso del calcestruzzo.

Si tratta di un ambiente cilindrico, sormontato da un'ampia cupola emisferica, tipicamente romana, e preceduto da un pronao di derivazione greca.

Il portico antistante, largo circa 33,10 metri e profondo 15,50 metri, è caratterizzato da 16 colonne corinzie alte più di 12,50 metri, con fusto monolitico in granito grigio e rosa delle quali, otto sono sul fronte e le altre sono collocate in modo da realizzare tre navate.

Tale *pronaos octastilo* sembra a sé stante rispetto l'intera costruzione caratterizzata da un andamento curvilineo, ma è necessario ricordare che un tempo l'edificio circolare non poteva essere visto dall'esterno e che, comunque, l'ignoto progettista aveva predisposto nella parte superiore un parallelepipedo con la funzione di raccordo tra i due volumi distinti.

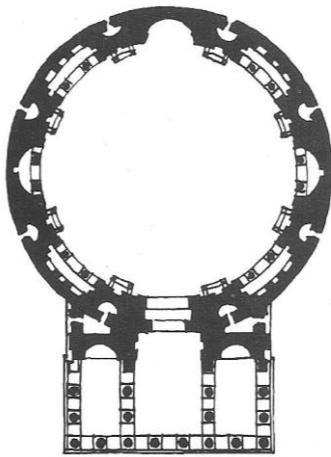


Figura 5.2: pianta del Pantheon
(Adorno, 1986)

Il corpo cilindrico presenta i muri di contorno a pianta circolare dello straordinario spessore di 6,5 metri, sopra ai quali sorge la cupola emisferica avente un diametro interno di 43,40 metri, esattamente pari all'altezza netta del tempio. Una tale luce per una cupola era senza precedenti e rimarrà unica per molto tempo, come dimostrato dal fatto che oltre 1400 anni più tardi, nemmeno Santa Maria del Fiore né San Pietro riusciranno ad eguagliarla.

Come si vede dalla pianta rappresentata in figura 5.2, la "rotonda" è movimentata da otto nicchie, realizzate nello spessore del muro e chiuse da colonnati corinzi, di cui una svolge la funzione di ingresso, mentre le altre sono cappelle. Esse sono alternate con otto edicole a timpano triangolare e rotondo e si differenziano tra loro poiché quattro sono a pianta rettangolare, mentre le restanti tre, interposte alle precedenti, sono semicircolari.

Secondo Rondelet, nell'opera "L'Art de bâtir", il rapporto tra la superficie occupata dai muri e l'area di tutta la pianta, muri compresi, è pari a $\frac{1}{4}$, mentre

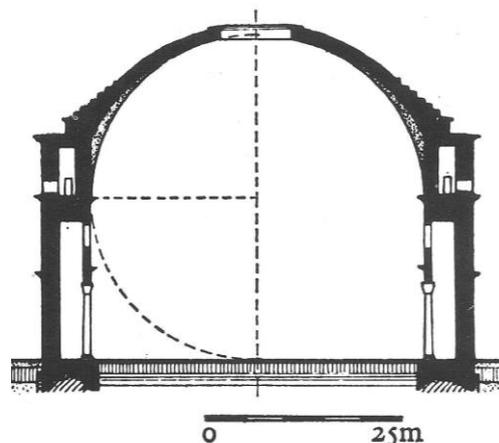


Figura 5.3: spaccato del Pantheon
(L. Benevolo)

lo spessore dei piedritti sta alla corda della cupola come 1 sta a 7.

Anche Viollet-le-Duc, nella sua opera intitolata “Entretiens sur l’Architecture” parlò del Pantheon, ribadendo il concetto, già proprio di Vitruvio, della possibilità di creare nicchie all’interno del muro, conservandone solo in maniera ideale lo spessore, ma mantenendo inalterata la sua rigidità:- Esaminiamo la Rotonda. Il diametro interno è di 43.40 mt. e il muro circolare che regge la volta ha uno spessore di 5.40 cioè 1/7 del diametro del cerchio interno. Il muro non è pieno ma svuotato da vani rettangolari e semicircolari all’interno; all’esterno nei pieni che restano sono ricavate otto nicchie semicircolari; all’altezza dell’imposta della cupola sedici finestre che si sarebbero aperte sull’esterno se non fossero state chiuse con un muro di 1.20 mt di spessore-.(Viollet-le-duc,1863-1872)

Si tratta di una forma geometrica estremamente semplice: una mezza sfera posta sopra ad un cilindro, entrambi caratterizzati dallo stesso raggio e dalla stessa altezza, come si può vedere dallo spaccato riportato in figura 5.3.

Quindi, le mirabili proporzioni di questo edificio a pianta centrale derivano dalla straordinaria uguaglianza tra altezza e diametro tale che, se la sfera fosse completa, sarebbe tangente al pavimento.

In sommità, la spettacolare cupola, decorata a cassettoni o lacunari trapezoidali (*lacunaria*), culmina con un oculo circolare di 8,50 metri di diametro, che è l’unica fonte di illuminazione per l’intero ambiente. I cassettoni sono nel complesso 140, suddivisi in 28 costole e in 5 file orizzontali, come si vede nella figura 5.4.



*Figura 5.4: cassettonato interno
(www.Tecnologos.it)*

5.2.4 La costruzione

L’anello di fondazione su cui si appoggia il cilindro è in conglomerato cementizio, composto da malta pozzolanica con scaglie di travertino e costipato mediante battitura; penetra nel terreno fino ad una profondità di 4,5 metri ed è spesso 7,3 metri.

Il muro circolare dallo spessore di 6,5 metri è realizzato con la tecnica a sacco, con un rivestimento esterno in mattoni e un riempimento interno di conglomerato, che veniva però interrotto, ogni 120 centimetri di altezza, con uno strato orizzontale di mattoni che collegavano le due cortine di laterizio, interna ed esterna.

Per tanti secoli, più precisamente dall'epoca del Brunelleschi, passando per quella del Piranesi, arrivando poi fino alla nostra, la complessa tecnica costruttiva del Pantheon è stata oggetto di studi approfonditi e di grande ammirazione. Infatti, il brillante e originale sistema costruttivo non si riesce a scrutare dall'interno, dato che il tamburo e la cupola sono stati arricchiti nella parte intradossale da ornamenti che non svolgono alcuna funzione resistente, ma coprono il sistema costruttivo vero e proprio e anzi tendono a delineare anche una falsa prospettiva.

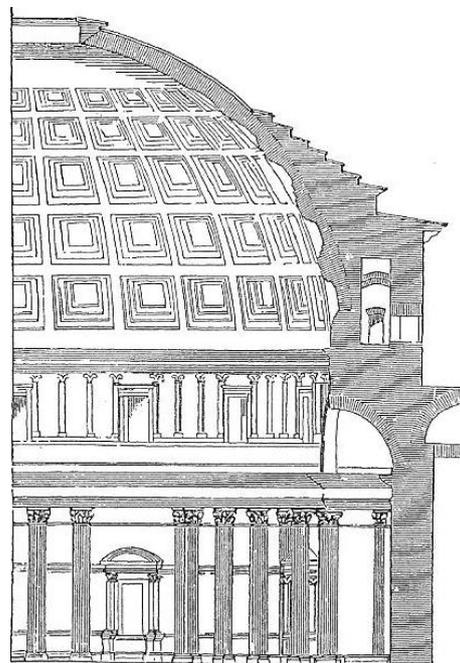
L'edificio è stato costruito con calcestruzzo realizzato con un conglomerato di vari *cementa*, in combinazioni diverse, al fine di alleggerire progressivamente la struttura via via che la si costruiva dal basso verso l'alto. Vennero usati, oltre al travertino già citato, frammenti laterizi, mattoni, tufo, ed una leggera pomice vulcanica, realizzando così una successione di strati orizzontali anulari. Per l'anello inferiore il conglomerato era composto da frammenti di laterizi, per gli anelli intermedi da mattoni e per l'anello in calotta da tufo e dalle porose pietre laviche. Tali conglomerati, si differenziano non solo per la resistenza, ma anche per il peso proprio, e per questo conferiscono all'edificio una razionale ed antisismica distribuzione delle masse. Scorrendo la sezione, in totale gli strati sono 6, ma ad essi se ne può aggiungere virtualmente anche un settimo, costituito dall'aria che entra dal grande occhio.

Lo spessore della cupola è di 6,5 metri all'imposta, pari a quello del corpo cilindrico che sormonta e, gradualmente diminuisce, fino ad arrivare al metro in sommità.

La superficie intradossale della cupola segue un andamento semisferico, mentre quella all'estradosso si può idealmente dividere in tre tratti:

1. continuazione del muro cilindrico all'imposta;
2. andamento a gradoni nella parte intermedia;
3. andamento semisferico, parallelo a quello interno in sommità.

Per la costruzione della cupola, è stato ipotizzato che i tecnici romani usarono una centina sorretta da massicci pilastri in muratura che garantivano la stabilità e la robustezza necessaria, per resistere al pesante getto di calcestruzzo colato su di essa. Inoltre, non era tanto dispendiosa in termini di legname utilizzato, rispetto ad una classica impalcatura tutta in legno che doveva coprire la grande luce ed innalzarsi dai 20 agli oltre 40 metri di altezza. L'impasto del calcestruzzo di calce, realizzato, come già precisato, con l'aggiunta di inerti di massa volumica decrescente con l'altezza, veniva gettato e poi schiacciato con bastoni. La posa in opera avveniva per strati successivi, dopo aver aspettato il consolidamento di quelli precedenti. Questi lunghi tempi di esecuzione permettevano di osservare eventuali fenomeni di cedimento o fessurazione, collegati all'assestamento della struttura lignea di supporto.



*Figura 5.5: mezzo spaccato
(Breymann, 1885)*

Da ricordare che, non essendo mai state costruite prima cupole di tali dimensioni, il Pantheon si può definire una sorta di modello sperimentale: un laboratorio a cielo aperto, su cui si potevano eseguire prove e ricerche per tentare di superare i limiti raggiunti fino ad allora.

5.2.5 La struttura portante

Come già accennato, il muro circolare che svolge la funzione di piedritto, è realizzato con muratura a sacco di laterizi triangolari faccia a vista e riempimento interno in conglomerato. Tale massa murale è a sezione variabile, per la presenza di nicchioni rettangolari e semicircolari nella parte inferiore, e di nicchie nella parte superiore del piedritto, cioè nel tamburo. Queste sezioni minorate si hanno quindi alternativamente nella parte bassa e alta del piedritto, in modo che la

sezione resistente ai carichi sia quella in muratura piena dei piloni che sono collocati tra le nicchie appena citate, indicata con ABCD in figura 5.6.

Gli arconi, posti sopra le nicchie, scaricano il peso della materia sovrastante ai veri pilastri e di conseguenza :- [...]potremmo dire che il muro di chiusura esterna dei nicchioni a pianta rettangolare, e che forma i punti di minima sezione del piedritto, non sia agli effetti statici un vero muro portante, ma un semplice muro di chiusura di vano e del tipo di quelli che nelle costruzioni civili diconsi di *sordina*-. (Milani, 1920).

Giovanni Battista Milani ha condotto, nella sua opera sull'ossatura murale, una verifica di stabilità del piedritto, dalla quale ha potuto concludere che:

1. La curva delle pressioni rimane interna nella sezione minima e di conseguenza le nicchie non hanno alcuna influenza sulla stabilità del piedritto.

2. La curva delle pressioni cade nel terzo medio anche alla base del piedritto.

I romani hanno quindi dimostrato grande senso pratico, riconoscendo le masse murali effettivamente resistenti e alleggerendo i piedritti, svuotati di quel materiale inutile, nei punti in cui non aveva nessuna funzione statica.

I pesi vengono scaricati attraverso un sistema di archi e di volte nascosto nella muratura. Infatti, le pareti della costruzione, rivestite da sottili lastre di marmo, risultano caratterizzate da archi di scarico ciechi, che ad oggi si possono vedere dall'esterno.

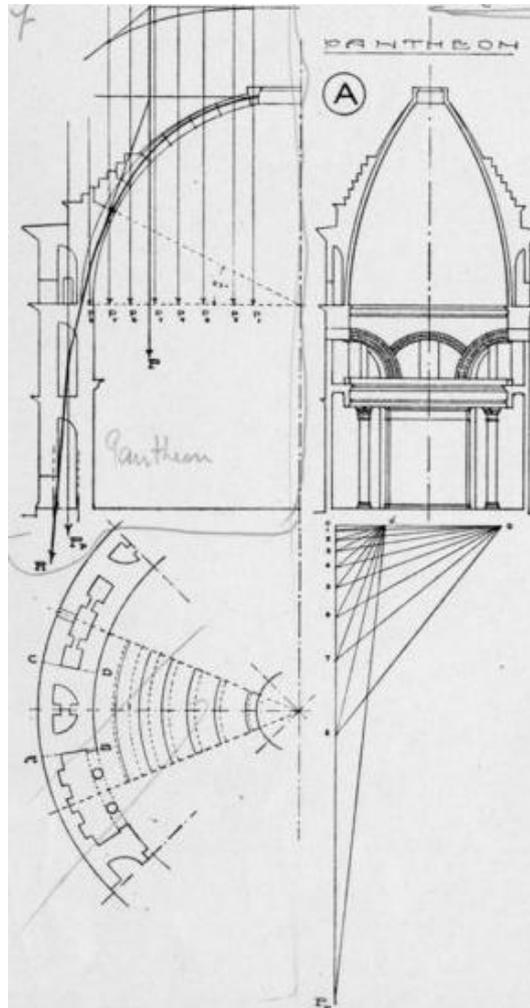
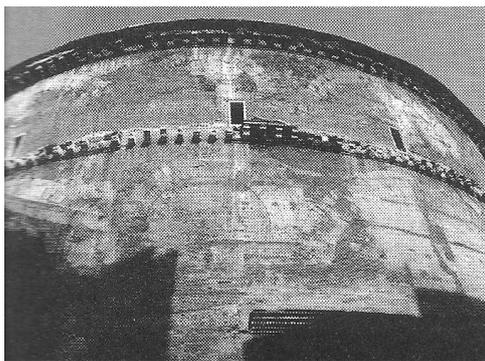


Figura 5.6: analisi di stabilità del piedritto (Milani, 1920)



*Figura 5.7: archi di scarico
(Sparacio, 1999)*

Tali archi in mattoni bipedali, riportati in figura 5.7, servivano per assorbire la spinta generata dal peso della cupola sovrastante e gli sforzi diffusi nella massa muraria, indirizzandoli in percorsi preferenziali.

Nel Rinascimento, soprattutto a causa dell'opinione di Leon Battista Alberti, si era diffusa l'idea della cupola come un unicum strutturale, cioè un tutt'uno omogeneo, realizzato con fortissime pozzolane. Sebbene all'esterno si potessero vedere i grandi archi in mattoni nella massa muraria della Rotonda, che poggiavano alle imposte sulle parti piene della muratura, tale convinzione era confermata dall'assenza di decorazioni interne che rimarcassero alcuna ossatura muraria.

Il primo che ipotizzò un'ossatura portante anche per la cupola fu il Piranesi nel 1756 che, durante i restauri eseguiti per Papa Benedetto XIV, grazie all'utilizzo di una impalcatura mobile ruotante intorno all'asse della cupola, ne scrutò ed analizzò tutti i dettagli nascosti sotto lo strato di stucco di rivestimento. Egli scoprì così trame ed ossature in mattoni all'interno del tessuto murario a concrezione, testimonianza della tendenza propria della tecnica costruttiva romana a costruire trame strutturali, scheletri portanti ed orditure in pietra rigida, per assorbire quegli sforzi che altrimenti avrebbero gravato, in maniera pericolosa, sulle parti più deformabili in cui erano inseriti.

Viollet-le-Duc riprese il lavoro fatto da Piranesi e ipotizzò la presenza di arconi in prossimità dell'imposta, scaricanti il peso della cupola sulle masse continue del piedritto. A proposito della struttura della cupola, egli scrisse:- La volta nasce a 22,50 mt. dal suolo; è costruita in mattoni e riempimento. I mattoni disegnano delle nervature annegate nello spessore della volta alleggerita da cinque ordini di riquadri svuotati nell'intradosso. Questo muro circolare, grazie ai vuoti riempiti nel suo spessore, non è altro che un insieme di archi di scarico che riportano tutto il carico sui sedici appoggi principali. La decorazione è semplicemente applicata sulla struttura; non vi è nessun legame tra la struttura statica e la decorazione [...]

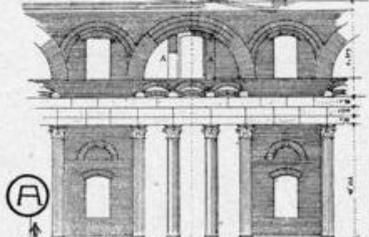
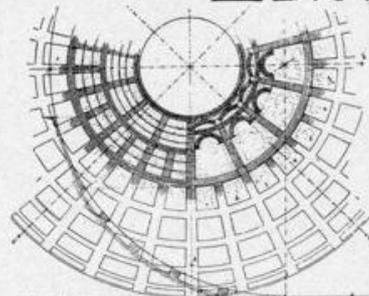
Esaminiamo con quanta cura l'architetto ha evitato l'uso di masse inutili di materiale; i vuoti stessi contribuiscono alla solidità del muro circolare riportando i carichi nei punti determinati e moltiplicando le superfici resistenti: all'imposta della cupola una serie di contrafforti che sezionano le cupole in quarto di sfera e le volte cilindriche costruite nel muro circolare inferiore sorreggono la grande calotta emisferica.- E ancora:-[...] la volta emisferica che corona il tamburo è costituita da mattoni e da conglomerati... i mattoni sono impiegati per costruire un'ossatura interna alleggerita dai cinque ordini del cassettonato ricavato nella concavità interna. Il muro circolare è vuotato nel suo spessore da nicchie che definiscono gli appoggi degli archi di scarico riportando tutto il peso sui sedici pilastri principali-. (Viollet-le-duc,1863-1872)

Viollet-le-duc aveva così colto la presenza di uno schema strutturale che garantiva stabilità e resistenza al Pantheon. Egli aveva frequentato l'Accademia di Francia a Roma, di cui faceva parte anche G. Chedanne che, asportando l'intonaco di rivestimento interno tra i cassettoni, notò la presenza di una struttura portante costituita da un sistema di arconi impostati sul tamburo e terminanti nell'oculo, collegati da una serie di archi di parete con lo scopo di trasmettere alle imposte le azioni dovute al riempimento in conglomerato, usato per chiudere i vuoti lasciati dagli archi principali.

Giovanni Battista Milani ha riportato, in una tavola riproposta in figura 5.8, le rappresentazioni assonometriche e geometriche dei due studiosi, a proposito del sistema strutturale del Pantheon.

Concludendo, si può affermare che:- In realtà - ma questo è stata appurato alla fine del secolo scorso, sebbene Piranesi ne avesse già resi noti alcuni aspetti - la struttura portante del Pantheon non coincide con la costruzione ma ne è parte-. (Di Pasquale, 2003)

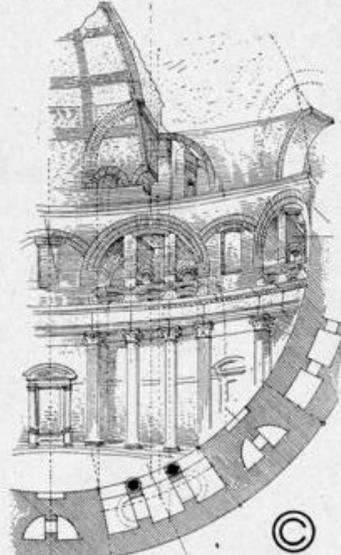
— SISTEMI MVRALI COMUNI —
ELEMENTI COSTRUTTIVI NELL'ARCH. ROMANA
 LA VOLTA A CVPOLA MVRALE
 — LA CVPOLA DEL PANTHEON —



(A) STUDIO DEL PIEDRITTO E DELLA CVPOLA (SECONDO IL PIRANESI)



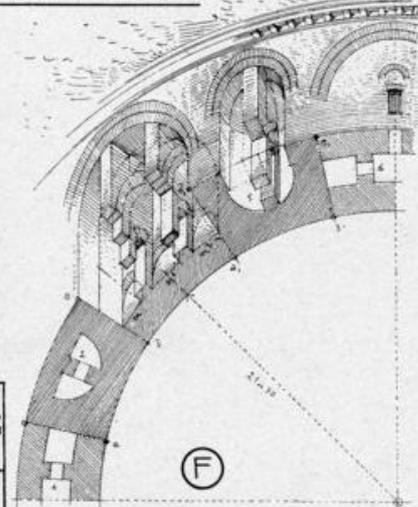
(B) COSTRUZIONE DELLA CVPOLA DEL PANTHEON (SECONDO IL PIRANESI E VIOLLET LE-DUC)



(C) VISTA ASSONOMETRICA DELLA COSTRUZIONE DEL PIEDRITTO (SECONDO RILIEVI DELL'ARCH. ARMANNINI - 1892)



(D, E) VISTA DELL'ATTACCO DEL PIEDRITTO CON L'AMBIENTE CIRCOLARE.



(F)



(G) STUDIO COSTRUTTIVO DELLA CVPOLA DEL PANTHEON (SECONDO RILIEVI ESEGUITI NEL 1892 ARCH. ARMANNINI)

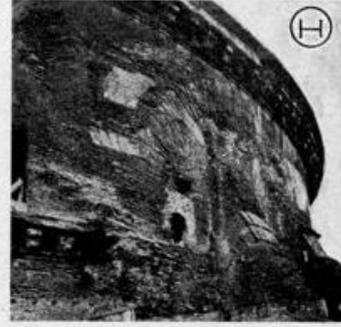


(E)

(F) VISTA ASSONOMETRICA DELLA COSTRUZIONE DELLA PARTE ESTERNA DEL TAMBURO DELLA CVPOLA (SECONDO RILIEVI ESEGUITI NEL 1892 ARCH. ARMANNINI)

(H) VISTA DEI GRANDI ARCHI DI CARICO NEL PIEDRITTO

DALL'OPERA DEL PROF. DURM. GIÀ CITATA



(H)

Figura 5.8: studi sulla cupola del Pantheon (tav. 40, parte III, Milani, 1920)

Tramite gli studi di Armanini di fine Ottocento e i saggi effettuati agli inizi del Novecento, si è potuta confermare l'esistenza di una serie ininterrotta di arconi di scarico posti sopra alle celle, alternati con archi più piccoli, lungo tutto il perimetro circolare e corrispondenti a quelli che si vedono esternamente, come riportato nel disegno di Cozzo in figura 5.9. Quello che attualmente si esclude è la presenza delle nervature verticali che collegano tali archi all'anello in sommità, come invece era ipotizzato da Piranesi e riprodotto nell'immagine B di figura 5.8.

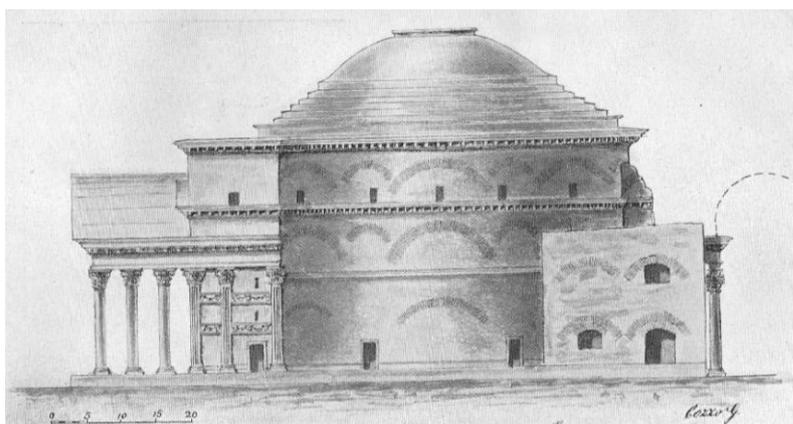


Figura 5.9: esterno del Pantheon con i tre ordini di arconi (tav.CXVI, Cozzo,

I tre registri di arconi lungo la superficie perimetrale della Rotonda, trovano una corrispondenza con le trame visibili scrostando l'intonaco interno, come si vede in figura 5.10. Bisogna sottolineare che dei tre ordini, l'ultimo è di significativa importanza oltre che statica anche costruttiva. Infatti, prima di gettare la copertura, gli ingegnosi romani, realizzarono la terza serie di archi di scarico al di sopra di quello che avrebbe dovuto essere il piano d'imposta della cupola semisferica, determinando così una nuova linea d'imposta, indicata con L-L in figura 5.11, 8 metri più in alto di quella apparente. Con tale artificio, riuscirono nel loro intento di costruire una calotta sferica (A) invece che una volta semisferica (B), come disegnato in figura 5.12. L'innalzamento del

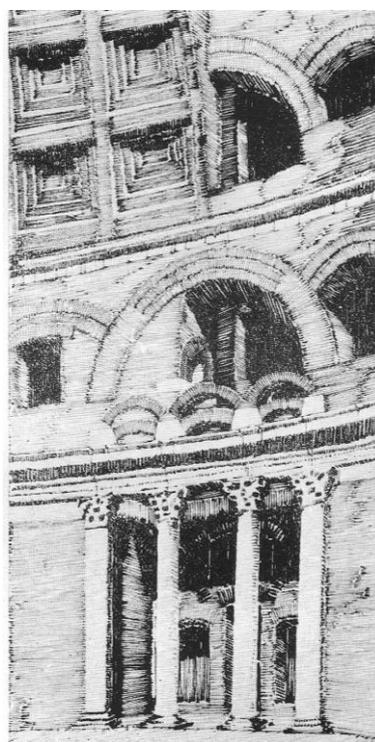


Figura 5.10: i "voltoni" dell'ultimo ordine (tav.CVIII, Cozzo,1928)

piano di imposta comportò quindi la riduzione della spinta poiché diminuì la massa della copertura gravante sul corpo cilindrico di base.

All'interno, l'intonaco e il cassettonato nascondono tutta tale trama strutturale, trasformando la cupola in una illusoria ed imponente volta semisferica.

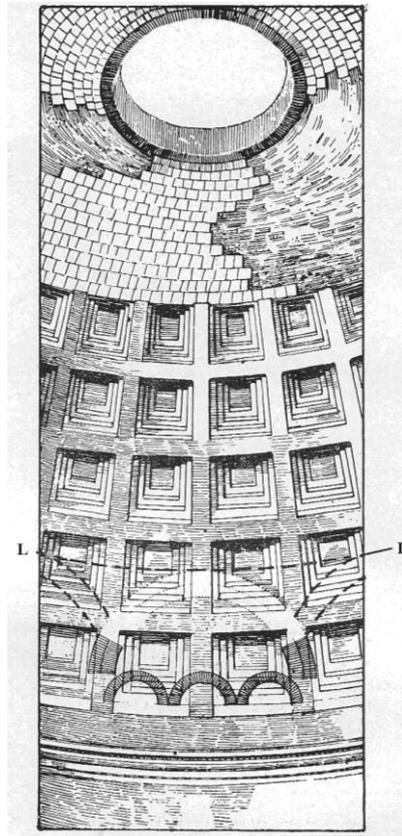


Figura 5.11: linea d'imposta reale della cupola (tav.CXI, Cozzo,1928)

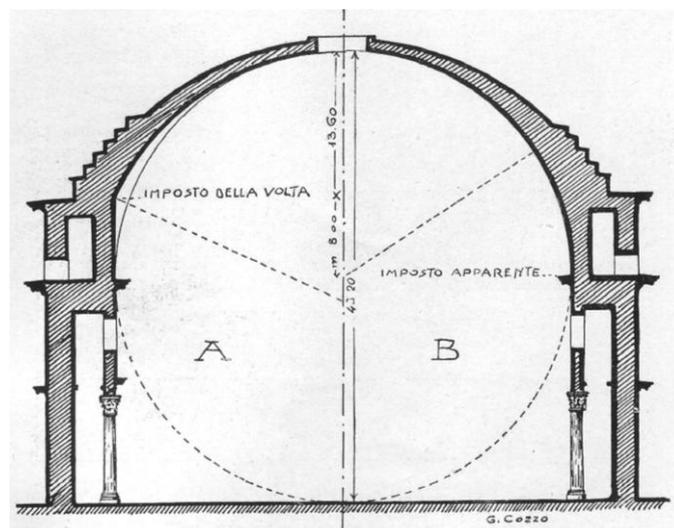


Figura 5.12: piano d'imposta reale e apparente della cupola (tav.CIX, Cozzo, 1928)

5.2.6 Gusci di rivoluzione

Si è già detto che la cupola del Pantheon è sferica ed essa appartiene alla categoria dei *gusci di rivoluzione*. Questi si ottengono facendo ruotare una curva, definita *meridiano* o *curva generatrice*, intorno ad una retta che sarà poi l'*asse del guscio*, generando così la *superficie media*. A seconda della forma di tale curva si possono ottenere diversi tipi di gusci:

- se è una curva generica → GUSCIO A DOPPIA CURVATURA;
- se è un arco di cerchio → GUSCIO SFERICO;
- se è una retta non parallela all'asse → GUSCIO CONICO;
- se è una retta parallela all'asse → GUSCIO CILINDRICO.

Per ogni punto della superficie media passa un *meridiano*, ottenuto intersecando la superficie con un piano contenente l'asse e un *parallelo*, ottenuto intersecando la superficie con un piano perpendicolare all'asse. Le tangenti al meridiano e al parallelo sono tra loro perpendicolari.

Se si considera un fascio di piani avente per sostegno la normale alla superficie media in un generico punto appartenente ad essa, questi intersecano la superficie media stessa, secondo infinite curve indicate con il termine di *sezioni normali*. Tra tutte le sezioni normali, se ne evidenziano due chiamate *sezioni principali*, poiché ad esse corrispondono i raggi di curvatura minimo e massimo, che vengono detti *raggi principali*.

L'impiego maggiore che è sempre stato fatto dei gusci di rivoluzione si ha nella realizzazione delle cupole. La loro fortuna, dimostrata dal grandissimo numero di applicazioni nella storia del costruito, è da attribuire alle notevoli capacità di resistenza, stabilità e rigidezza, dovute al fatto che la loro superficie non risulta sviluppabile.

In particolare, gli esempi di cupole forniti dai costruttori romani sono rimasti insuperati fino al XX secolo e fra tutti il più celebre è stato sicuramente quello della cupola del Pantheon, con i suoi 43 metri ed oltre di luce.

La differenza fondamentale rispetto all'arco risiede nel fatto che una cupola è sempre funicolare di un qualunque sistema di carichi distribuiti, prescindendo dalle condizioni al contorno.

Infatti, se per assicurare stabilità all'arco occorre garantire perfetta congruenza tra la propria forma e la funicolare dei carichi, una cupola risulta superficie funicolare di tutti i carichi assegnati, permanenti ed accidentali, grazie ad una distribuzione interna delle forze tra i suoi elementi componenti. L'equilibrio del guscio viene raggiunto quindi, tramite una compensazione interna degli sforzi longitudinali e trasversali, indipendentemente dalla sua forma esterna.

In particolare :- Gli archi meridiani assolvono il compito di trasferire alle imposte i carichi cui la cupola è soggetta; gli anelli di parallelo sviluppano azioni interne le cui componenti radiali contribuiscono a rendere funicolare la curva del parallelo-. (Di Pasquale, 2003)

5.2.7 Guscio sferico

Il guscio sferico, generato dalla rivoluzione di un arco di circonferenza intorno all'asse, è caratterizzato dall'aver i due raggi principali di curvatura R_φ ed R_θ coincidenti, così come i centri di curvatura C_1 e C_2 che sono entrambi collocati in O o C , centro della sfera.

Nella figura 5.13, si riporta l'elemento infinitesimo HDVL della superficie media del guscio sferico, che risulta essere delimitato da due archi di meridiani HD e VL e da due archi di parallelo HV e DL. Si indica con φ la *colatitudine*, con θ la *longitudine* e si definisce r il raggio di parallelo ed R l'unico raggio principale di curvatura.

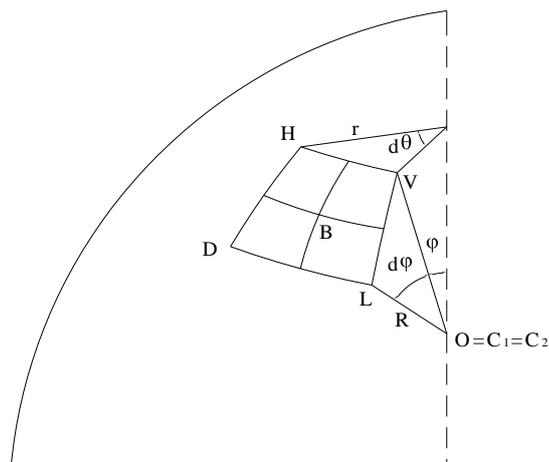


Figura 5.13: elemento infinitesimo di guscio sferico

Le caratteristiche di sollecitazione per il generico elemento infinitesimo di superficie media, compreso tra due archi di meridiano e due archi di parallelo, sono: gli sforzi normali e tangenziali membranali, i momenti flettenti e torcenti e gli sforzi taglianti. Inoltre, non bisogna dimenticare la presenza dei carichi esterni che agiscono sull'elementino e che sono forze e momenti per un'unità di superficie.

Attraverso le seguenti semplici figure si rappresentano con vettori le azioni interne ed esterne appena elencate:

- Sforzi membranali:

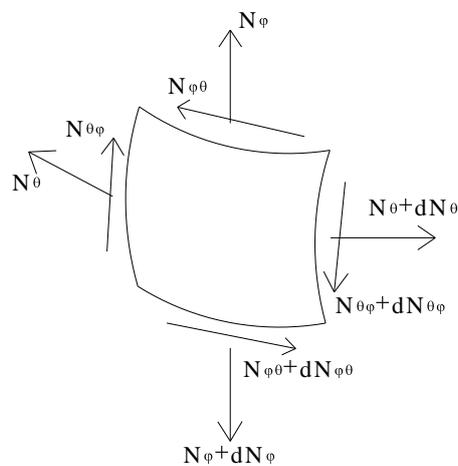


Figura 5.14: azioni di membrana

- Momenti flettenti e torcenti:

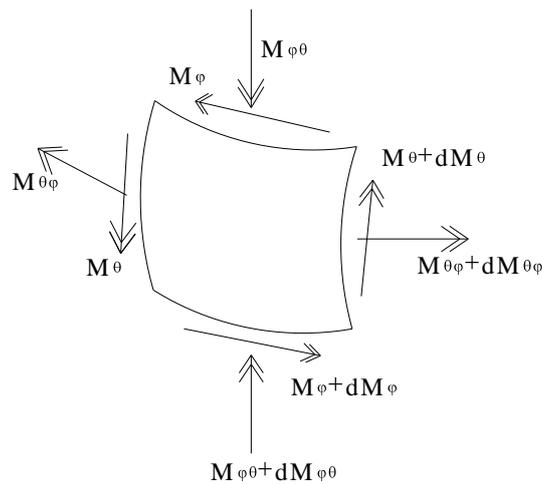


Figura 5.15: momenti

- Sforzi taglianti:

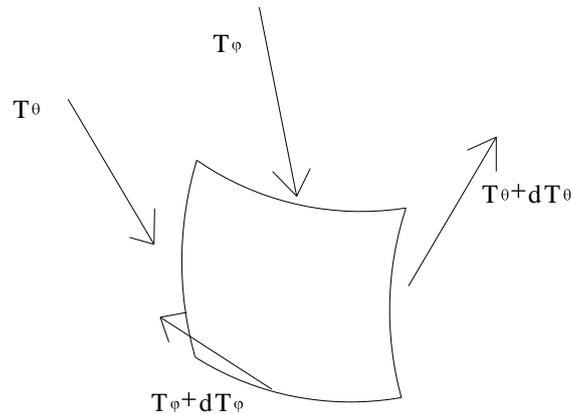


Figura 5.16: tagli

- Carichi esterni:

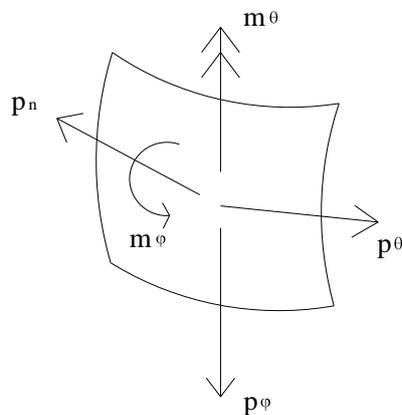


Figura 5.17: carichi applicati dall'esterno

Considerando sia il regime membranale sia quello flessionale, le equazioni indefinite di equilibrio per un guscio sferico sono le seguenti 5:

1. Equilibrio alla traslazione lungo la tangente al meridiano.
2. Equilibrio alla traslazione lungo la tangente al parallelo.
3. Equilibrio alla traslazione lungo la direzione della normale esterna.
4. Equilibrio alla rotazione attorno alla tangente al parallelo.
5. Equilibrio alla rotazione attorno alla tangente al meridiano.

Queste equazioni ricavate con il metodo diretto o con il principio degli spostamenti virtuali, anche detto formulazione alternativa dell'equilibrio, risultano essere per esteso le seguenti:

$$\begin{aligned}
t_1 &= \frac{1}{R} \frac{\partial N_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial N_{\varphi\vartheta}}{\partial \vartheta} + \frac{(N_\varphi - N_\vartheta)}{r} \cos \varphi + \frac{T_\varphi}{R} + p_\varphi = 0 \\
t_2 &= \frac{1}{r} \frac{\partial N_\vartheta}{\partial \vartheta} + \frac{1}{R} \frac{\partial N_{\varphi\vartheta}}{\partial \varphi} + \frac{2N_{\varphi\vartheta}}{r} \cos \varphi + \frac{T_\vartheta}{r} \sin \varphi + p_\vartheta = 0 \\
t_n &= \frac{1}{R} \frac{\partial T_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_\vartheta}{\partial \vartheta} + \frac{T_\varphi}{r} \cos \varphi - \frac{N_\varphi}{R} - \frac{N_\vartheta}{r} \sin \varphi - p_n = 0 \\
R_1 &= \frac{1}{R} \frac{\partial M_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial M_{\varphi\vartheta}}{\partial \vartheta} + \frac{(M_\varphi - M_\vartheta)}{r} \cos \varphi - T_\varphi + m_\varphi = 0 \\
R_2 &= \frac{1}{r} \frac{\partial M_\vartheta}{\partial \vartheta} + \frac{1}{R} \frac{\partial M_{\varphi\vartheta}}{\partial \varphi} + \frac{2M_{\varphi\vartheta}}{r} \cos \varphi - T_\vartheta + m_\vartheta = 0
\end{aligned}$$

Per capire il comportamento strutturale, ci si può soffermare in prima istanza sul solo regime membranale, affrontando così un problema più semplice, la cui soluzione però non risulta affetta da grandi errori. Infatti, se si conduce un'analisi in regime di membrana, non considerando la parte flessionale, e si considera il caso di una cupola caricata in maniera assial-simmetrica (ciò comporta l'assenza degli sforzi tangenziali), le equazioni di equilibrio si riducono notevolmente. Infatti, delle 5 appena elencate ne rimangono solamente 2 (la prima e la terza) in cui però compaiono solo gli sforzi normali di meridiano e di parallelo, oltre che i carichi esterni:

$$\begin{aligned}
t_1 &= \frac{1}{R} \frac{\partial N_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{(N_\varphi - N_\vartheta)}{r} \cos \varphi + p_\varphi = 0 \\
t_n &= \frac{N_\varphi}{R} + \frac{N_\vartheta}{r} - p_n = 0
\end{aligned}$$

Di notevole ed evidente importanza applicativa è la soluzione delle equazioni appena riportate, nel caso di cupola emisferica soggetta solamente a peso proprio. Essendo w_c , il peso per unità di superficie della cupola, si ottengono i seguenti valori di sforzi normali di meridiano e di parallelo:

$$\begin{aligned}
N_\varphi &= -\frac{w_c \cdot R}{1 + \cos \varphi} \\
N_\vartheta &= w_c \cdot R \cdot \left(\frac{1}{1 + \cos \varphi} - \cos \varphi \right)
\end{aligned}$$

Tali sollecitazioni variano, al variare della colatitudine φ da 0 a $\pi/2$, e assumono valori estremi pari a:

$$N_{\varphi}(\varphi = \frac{\pi}{2}) = -w_c \cdot R$$

$$N_{\varphi}(\varphi = 0) = -\frac{w_c \cdot R}{2}$$

$$N_{\theta}(\varphi = \frac{\pi}{2}) = w_c \cdot R$$

$$N_{\theta}(\varphi = 0) = -\frac{w_c \cdot R}{2}$$

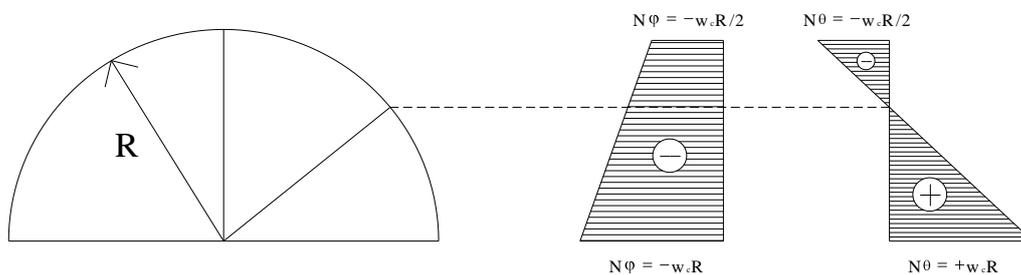


Figura 5.18: andamento dello sforzo normale di meridiano N_{φ} e di parallelo N_{θ}

Si nota che:

- gli sforzi di meridiano sono sempre di compressione; infatti $\cos\varphi$ è sempre compreso tra 0 e 1 e di conseguenza N_{φ} sarà sempre negativo in ogni punto del meridiano.
- gli sforzi di parallelo sono di trazione a partire dall'anello di imposta della cupola, diminuendo mano a mano che si sale verso l'alto, e si annullano ad una quota che dipende dalla forma del meridiano e dai carichi agenti, divenendo poi di compressione.

Nel caso della cupola emisferica soggetta al peso proprio, le azioni di parallelo si annullano in corrispondenza di una colatitudine pari a $51,82^{\circ}$.

I paralleli inferiori sono quindi soggetti a trazione e, se non si usano materiali atti a resistere a tale sollecitazione, la cupola si frattura inevitabilmente in corrispondenza delle imposte, come si vede in figura 5.19.

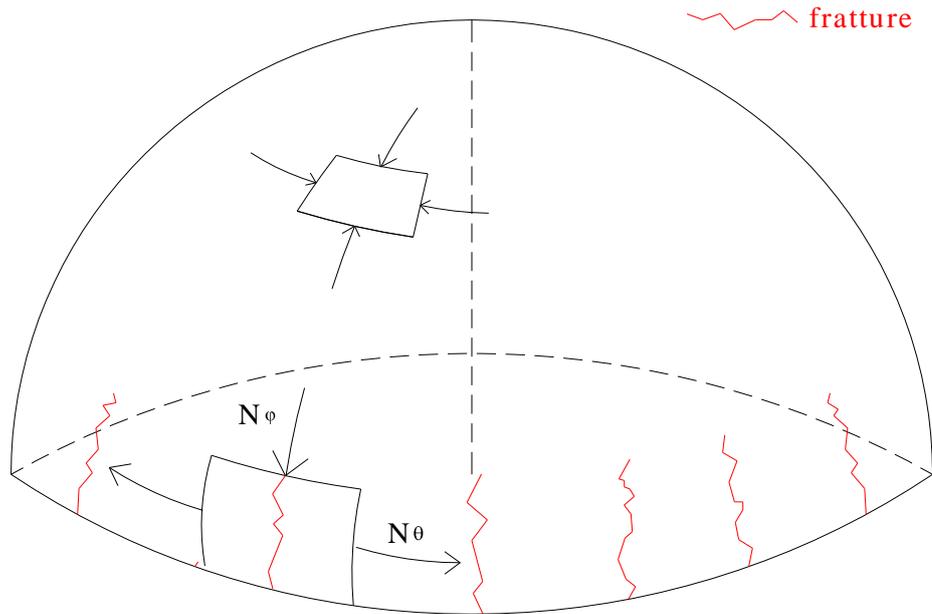


Figura 5.19: creazione delle possibili fessure all'imposta, dovute allo sforzo N_θ di trazione

Ovviamente, i concetti di meccanica dei gusci appena espressi non erano conosciuti dai costruttori antichi, poiché frutto degli approfondimenti scientifici della prima parte del XX secolo; infatti essi basavano le loro scelte tecniche sulla conoscenza degli effetti più che delle cause. Un esempio in tal senso fu l'adozione della cerchiatura, prodotto dell'esperienza di fratture, macroscopiche o meno, che frequentemente si formavano alle imposte delle cupole.

I romani avevano a disposizione però la *malta pozzolanica*, un legante straordinario che poteva assorbire notevoli sforzi di trazione, di cui si parlerà approfonditamente nel prossimo paragrafo. Senza di esso, anche se erano costruite a regola d'arte, le cupole erano sicuramente destinate a fratturarsi lungo i meridiani fino ad una certa altezza, dato che le resistenze delle malte impiegate risultavano inferiori rispetto agli sforzi di trazione in gioco. Le fratture che si formavano potevano essere di diverse dimensioni e trasformavano la cupola in un insieme di archi a sezione variabile, che si contrastavano reciprocamente nell'anello in cui iniziano a cambiare di segno gli sforzi di parallelo o, al limite, nell'ultimo anello in chiave.

5.2.8 *Opus caementitium*

I romani utilizzarono largamente la tipologia di muratura a sacco, cioè una muratura a tre strati verticali, con due fodere esterne e materiale di riempimento all'interno.

Il rivestimento esterno poteva essere realizzato con:

- pietra in blocchi poligonali, realizzanti l'*opus incertum*, se i blocchi erano disposti in maniera casuale o l'*opus isodoma*, se vi era regolarità nella forma e disposizione dei componenti lapidei;
- laterizi, definendo così l'*opus testaceum*, utilizzato nella maggior parte delle opere imperiali. I laterizi erano dei mattoni (*coctis lateres*) di forma quadrata e di dimensioni standardizzate, in cui il lato poteva essere lungo 1 piede (30 centimetri), 2/3 di piede (20 centimetri), 3/2 di piede (45 centimetri) o 2 piedi (60 centimetri) e venivano perciò definiti rispettivamente: *pedali*, *besales*, *sesquipede* e *bipedali*. Tali mattoni erano ottenuti per cottura in fornace di un impasto di argilla, sabbia fine ed acqua;
- tuffelli, costituendo l'*opus reticulatum*. Essi erano dei blocchetti di tufo a forma piramidale con base quadrata avente il lato all'incirca di 8 centimetri, disposti con il vertice all'interno della parete, in modo che le basi inclinate di 45°, tutte complanari, realizzassero la superficie esterna.

Per quanto riguarda lo strato interno, i romani abbandonarono l'usanza greca di usare piccole pietre legate da una pessima malta, ed inventarono l'*opus caementitium*. Questo si otteneva gettando tra le pareti di rivestimento esterne, o tra delle cassaforme in legno, strati alternati di componenti lapidei (*caementa*) e malta (*materia*). Per il pietrisco si utilizzavano frammenti di pietra di pezzatura piccola o media, spesso residui di cava e di lavorazione della pietra da taglio, aggiunti a cocci di laterizi, mentre per la malta si mescolavano calce e sabbia ottenendo un vero e proprio legante.

La più grande differenza rispetto al calcestruzzo moderno consiste nel fatto che i romani non gettavano l'impasto già pronto, ma stendevano alternativamente gli

strati orizzontali prima di pietrisco e poi di malta e, coperti così i frammenti di pietre, procedevano alla battitura. Realizzati tutti gli strati all'interno dei casseri o delle cortine di rivestimento, attendevano l'indurimento dell'impasto che, una volta stagionato, possedeva caratteristiche meccaniche simili a quelle del calcestruzzo di cemento attuale. Infatti, dalle prove sperimentali condotte su dei provini, prelevati da murature a concrezione di monumenti romani ancora esistenti, si sono ottenuti i seguenti valori per le tensioni di rottura:

- A COMPRESSIONE: $-25 \text{ MPa} \leq \sigma_R \leq -10 \text{ Mpa}$
- A TRAZIONE: $1 \text{ MPa} \leq \sigma_R \leq 2,5 \text{ Mpa}$

Tale impasto lapideo possedeva quindi una resistenza a compressione paragonabile a quella dei calcestruzzi odierni e una resistenza a trazione che, seppur piccola, era comunque maggiore rispetto a quella nulla delle tradizionali murature a blocchi e permetteva pertanto la realizzazione di strutture murarie in precedenza impensabili.

In particolare, le più importanti applicazioni dell'opus caementitium furono nell'ambito delle volte e delle cupole, dove i romani raggiunsero l'apice della loro abilità costruttiva. Si vede ad esempio che quella del Pantheon è in testa alla seguente classifica di cupole storiche, redatta da Sparacio nel 1999, nel libro "La scienza e i tempi del costruire:

	Diametro di imposta [m]	Anno di costruzione
<i>Pantheon</i> (Roma)	43.40	120
<i>S.Maria del Fiore</i> (Firenze)	42.20	1420
<i>S.Pietro</i> (Roma)	42.00	1564
<i>Tempio di Apollo</i> (Campi Flegrei)	35.50	II secolo
<i>S.Francesco di Paola</i> (Napoli)	34.00	1817
<i>Santa Sofia</i> (Costantinopoli)	32.60	532
<i>Cattedrale di S.Paolo</i> (Londra)	30.80	1675
<i>Tempio di Diana</i> (Baia)	29.50	II secolo
<i>Tempio di Venere</i> (Baia)	26.30	II secolo
<i>Tempio di Minerva Medica</i> (Roma)	24.50	IV secolo
<i>Tempio di Mercurio</i> (Baia)	21.50	I secolo

Tabella 5.1: diametro delle cupole storiche

Tali grandi luci comportavano una notevole spinta, per resistere alla quale non erano sufficienti gli elementi verticali di sostegno e per questo molte cupole in

muratura, in cui le imposte manifestavano segni di cedimento sotto le azioni divaricanti descritte in precedenza (cfr.5.2.7), venivano cerchiare con anelli in tondo metallico o in quadrello, per assorbire le tensioni di trazione dirette secondo i paralleli e per legare la cupola stessa.

Nel sistema spingente più semplice, l'arco a tre cerniere, la spinta è proporzionale al quadrato della luce, secondo la seguente formula:

$$H = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot f}$$

In cui compaiono

H : spinta orizzontale

q : carico uniformemente distribuito

l : luce dell'arco

f : freccia dell'arco

Di conseguenza, nel caso del Pantheon, la cupola esercita un'azione divaricante più del doppio di quella esercitata dalla cupola della cattedrale di San Paolo a Londra. Per assorbirla non potevano essere adatti né i muri del cilindro di base, anche se molto spessi, né i romani vollero armare con catene metalliche la nuova cupola, quindi pensarono di adottare il nuovo materiale capace di resistere a trazione: l'opus caementitium.

Tale agglomerato, grazie all'azione di legante svolta dalla malta, riusciva a tenere uniti gli archi-meridiani che suddividevano idealmente in spicchi la cupola, che separandosi potevano provocare il ribaltamento dei piedritti verso l'esterno. Il materiale, capace di resistere a trazione, creava un incatenamento spalmato su tutta la copertura conferendole una compattezza monolitica. Il risultato è facilmente pronosticabile:- basta pensare ad una ciotola di porcellana che, rovesciata e poggiata su un piano liscio orizzontale, e in questa posizione gravata di un carico sul fondo, riesce a sostenerlo senza il soccorso di alcuna spinta orizzontale lungo il bordo. Comportamento impensabile per una ciotola suddivisa in spicchi legati, che si appiattirebbe, ben presto, distendendosi sul tavolo-. (Sparacio, 1999).

5.3 Le fondazioni romane

Riprendendo Cozzo, studioso del primo Novecento, si possono raggruppare sinteticamente le fondazioni delle costruzioni romane nelle seguenti due tipologie:

1. Sistema a platea

Era una fondazione monolitica che permetteva di trasmettere i carichi su una grande superficie. Realizzato il piano sul terreno ove si sarebbe poi innalzato l'edificio, si copriva mediante uno strato di un certo spessore, composto da un conglomerato di malta e frammenti di tufo, di silice o di travertino.

Per esempio, il Tempio romano di Venere è eretto su di una fondazione a platea con scaglie di pietra mista a malta.

Spesso, come si è già visto nel palazzo di Cnosso, lo strato di terreno sottostante alla costruzione era usato, oltre che per appiattare le asperità naturali, anche per smorzare le vibrazioni delle frequenti scosse sismiche, con abbondanti quantità di sabbia e materiale incoerente.

2. Sistema a cavi continui

Molto più spesso, si realizzavano cavi nel terreno che venivano riempiti con muratura di pietra o calcestruzzo. Questi erano scavati al di sotto dei futuri muri del fabbricato, con uno spessore che secondo le norme vitruviane doveva essere di una volta e mezzo quello del muro corrispondente. Il riempimento avveniva una volta raggiunto il terreno solido e non potendo sondare la capacità portante con i moderni carotaggi, i romani usavano un metodo che rimase in voga fino al XIX secolo. Dopo aver realizzato pozzi ai 4 angoli del perimetro costruibile, lasciavano cadere al loro interno un masso di almeno 10 Kg; qualora il suo rimbalzo sul fondo avesse provocato un suono secco, il terreno raggiunto era adatto, se invece affondava anche solo di poco, producendo un suono sordo, era necessario cercare un piano solido a una maggiore profondità.

6. IL SISTEMA BASILICALE

6.1 L'architettura paleocristiana

Il cristianesimo, nonostante le proprie origini orientali, si diffuse a Roma nella prima metà del I secolo e subì nella capitale aspre persecuzioni, collegate alla unicità del Dio in cui credevano i cristiani che quindi, non potevano accettare la divinità dell'impero, pur rispettando l'autorità dello stato. Tali persecuzioni cessarono nel 312, quando Costantino I decise per ragioni politiche di concedere loro libertà di culto con l'editto di Milano; successivamente, l'ascesa del cristianesimo a religione di stato si compì nel 391 con l'imperatore Teodosio.

Tra i più antichi edifici adibiti al culto cristiano, le testimonianze annoverano:

- il *tablino*, cioè la tipica sala della casa romana dedicata al ricevimento di ospiti, in cui si riunirono i primi e pochi fedeli. Esempio fu quella dell'abitazione privata dei coniugi Aquila e Prisca;
- le *domus ecclesiae*, cioè luoghi pubblici risalenti al III secolo (di cui non rimangono più resti), ove la chiesa si radunava.

Da ricordare anche i cimiteri sotterranei romani, chiamati *catacombe*, utilizzati per i riti funebri, soprattutto nel III secolo, ed abbandonati a causa delle invasioni barbariche.

A partire dal IV secolo, grazie alla spinta data da Costantino, cominciarono a sorgere in tutto l'Impero nuovi edifici pubblici atti alla celebrazione del culto cristiano. A grandi linee, essi possono essere distinti in due classi:

1. edifici a pianta longitudinale;
2. edifici a pianta centrale.

6.1.1 La basilica cristiana

Alla prima delle due categorie di edifici appena citate, e cioè ai luoghi di culto a pianta longitudinale, appartiene la basilica cristiana. L'architettura di tale edificio, finalizzato ad accogliere le nuove masse di fedeli in preghiera, non trovava la

propria ispirazione nei vecchi templi pagani, accessibili solo a pochi sacerdoti, ma nella tipologia edilizia della basilica romana a navate. In origine, essa era un luogo profano destinato alle attività mercantili, alle riunioni e alle apparizioni del dio-imperatore, ma con l'avvento del cristianesimo venne trasformata nel luogo di culto cristiano per eccellenza.

Gli elementi che ricorrevano nel sistema basilicale erano sempre gli stessi:

- pianta rettangolare;
- tetto in legno sorretto da capriate;
- 3, o eccezionalmente 5 navate, di cui la centrale era maggiore per altezza e per larghezza delle altre, che erano divise dalla principale attraverso colonne arcitravate o archivoltate;
- fascia superiore lungo lo sviluppo longitudinale finestrata, con archi a tutto sesto;
- tribuna, atta ad accogliere la cattedra episcopale con l'altare antistante;
- caratteristiche di semplicità architettonica e luminosità degli ambienti.

Famoso esempio di tale impianto architettonico è la Basilica di San Giovanni in Laterano a Roma, costruita da Costantino nel 313. Oltre a possedere le caratteristiche appena elencate si può dire che, dal punto di vista dei materiali usati, era costruita in calcestruzzo e rivestita con paramento in mattoni. Attualmente, non presenta più il suo aspetto originario, poiché ristrutturata ed ampliata nel corso dei secoli; in particolare, venne interamente dotata di nuove strutture da Francesco Borromini, per ordine del papa Innocenzo X, in occasione del Giubileo del 1650.

Con il passare del tempo, la basilica paleocristiana acquisì altri elementi che arricchirono la sua configurazione, tra i quali occorre citare:

- l'*atrio*: un cortile quadrato o rettangolare con i quattro lati porticati (per questo era anche detto *quadriportico*) ed al centro una fontana, la cui acqua serviva a battezzare i nuovi credenti (*neofiti*), che altrimenti non potevano entrare nell'interno consacrato della basilica;
- l'*endonartece*: un portico intermedio tra spazio esterno ed interno dove sostavano i penitenti in attesa di essere perdonati;

- il *transetto*: un braccio trasversale che interseca il corpo longitudinale, conferendo alla pianta la forma di una croce latina. La pianta veniva definita a croce *immissa*, se il transetto era a due terzi della lunghezza, mentre era detta a croce *commissa* o *a tau*, nel caso in cui il transetto fosse collocato in fondo.

L'ingresso alla basilica avveniva tramite le 3 o 5 porte, in corrispondenza delle navate e, nella parete di fondo, dentro l'*arco trionfale*, era posta l'*abside* semicircolare, raccordata alla sovrastante parete rettilinea dal *catino absidale*, cioè una volta a quarto di sfera. Nell'edificio pagano, l'abside accoglieva la tribuna dell'imperatore con il suo baldacchino, mentre nell'epoca cristiana vi veniva posto l'altare, spesso eretto sopra il sepolcro di un martire o di un santo; dietro all'altare si trovava il *coro*, poiché lì si radunavano i cantori.

A differenza delle basiliche pagane, in cui le scale per accedere alla struttura erano poste sul lato più lungo, nell'edificio cristiano l'ingresso era simbolicamente collocato sul lato corto. Ciò era una conseguenza architettonica del forte significato religioso di cui era investita la basilica, a testimonianza del quale si può citare anche il preciso orientamento spaziale che la caratterizzava. Infatti, l'ingresso veniva sempre posto ad ovest, dove tramonta il sole, e l'altare posizionato volutamente ad est, dove nasce il sole; il percorso *ingresso-quadriporico-basilica*, che si faceva all'interno dell'edificio, rappresentava così il lungo cammino di ogni fedele che, dall'oscurità delle tenebre rinasceva a nuova vita, illuminata dalla luce della fede.

La basilica che più di ogni altra riassunse tutte le caratteristiche appena descritte e passò alla storia come la più grande tra le basiliche costantiniane, fu quella di San Pietro a Roma. La sua storia iniziò nel 160, quando papa Anacleto fece erigere un'edicola sul luogo ove era conservato il corpo dell'apostolo Pietro. Nel 333 iniziarono i lavori per trasformarla nella basilica dedicata a San Pietro, voluti da Costantino e terminati, verso la metà del secolo, dal figlio Costante. Come si vede nella ricostruzione dell'immagine 6.1, era dotata di una ampio transetto tra abside e navata, per consentire la circolazione dei tanti fedeli che giungevano da ogni parte del mondo per venerare le reliquie del Santo, situate sulla corda dell'abside sotto un baldacchino.

Nel XV secolo, poiché ritenuta pericolante, papa Nicolò V incaricò Bernardo Rossellino di realizzare un nuovo edificio al posto del vecchio. Tale progetto non venne mai realizzato e morto il pontefice, l'idea fu abbandonata fino a Giulio II che, dopo aver abbattuto l'antico edificio, incaricò Donato Bramante per la costruzione della nuova chiesa, consacrata nel 1506.

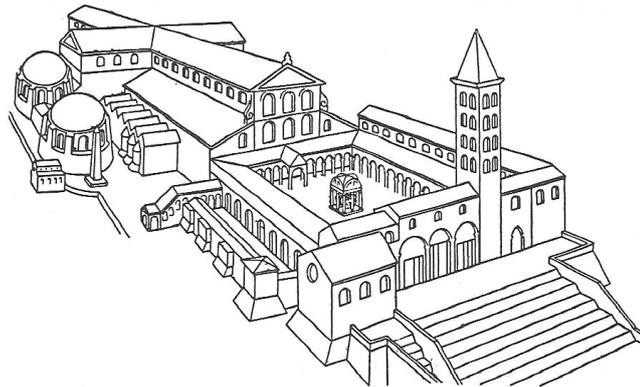


Figura 6.1: alzato della basilica di San Pietro (da G. Bovini)

6.1.2 Copertura non spingente

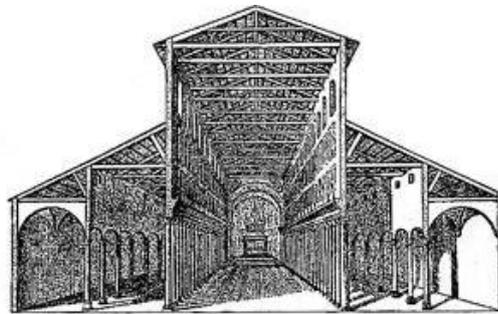


Figura 6.2: ricostruzione dell'interno della basilica di San Pietro

Significativa la soluzione circa la copertura delle prime basiliche cristiane: un tetto a spioventi coperto da tegole e sorretto da capriate, la cui ricostruzione è visibile in figura 6.2.

Le capriate sono delle coperture non spingenti, poggianti sui muri longitudinali e sostenenti gli arcarecci; erano realizzate in legno, secondo lo schema strutturale a triangolo rappresentato in figura 6.3, con i seguenti elementi:

- ✓ due *puntoni* inclinati (AB e AC), sollecitati a compressione e flessione, a causa del carico verticale trasmesso dagli arcarecci;

- ✓ una *catena* (BC), soggetta a trazione che assorbe la componente orizzontale dell'azione esercitata dai puntoni sull'appoggio; l'altra componente è quella verticale di peso che si scarica sui muri di sostegno;
- ✓ un *monaco* o *ometto* verticale, che permette di tagliare ad angolo retto l'estremità dei puntoni e garantire così il contatto lungo tutta la superficie e non su una parte di essa, cosa che porterebbe ad un considerevole aumento della sollecitazione. Il monaco deve essere lasciato libero rispetto alla catena, ma è costretto a rimanere nel piano dell'incavallatura grazie ad una staffa metallica;

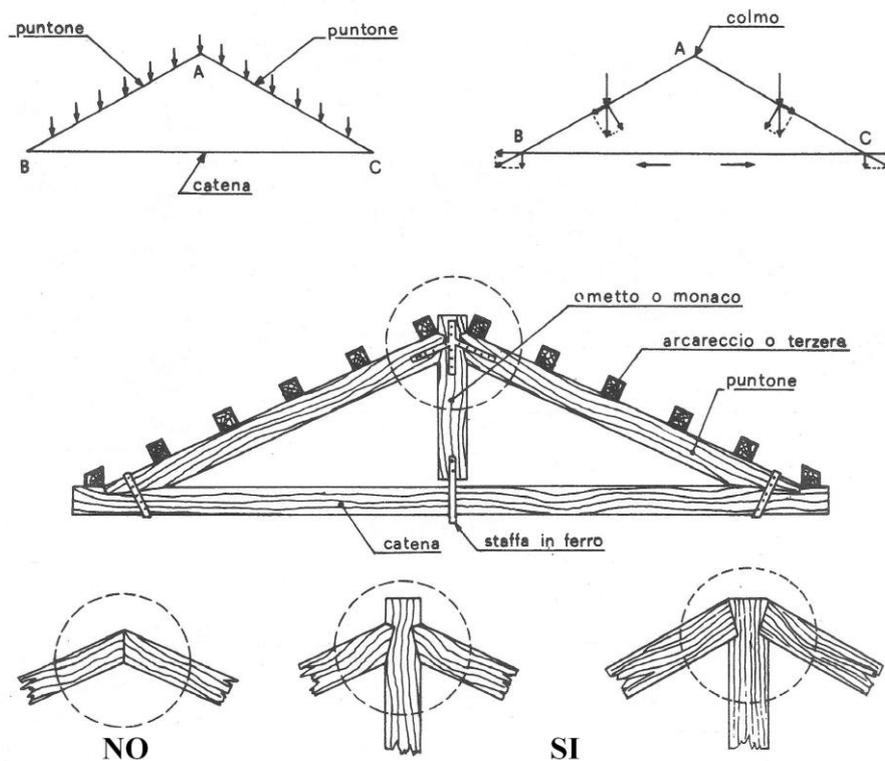


Figura 6.3: Schema strutturale di una capriata in legno (Caleca, 2000)

L'utilizzo delle volte era eccezionale vista la scarsità del legno che non si trovava in quantità tali da realizzare le centine di sostegno per la copertura voltata. Solamente dopo molti secoli, il grande rischio di infiammabilità e la limitata luce della navata centrale, che difficilmente superava i 15 metri, perché tale era la lunghezza massima di una trave in legno, favorì il ricorso di coperture a volta nelle basiliche romaniche.

7. LE CUPOLE BIZANTINE

7.1 Le cupole delle nuove capitali: Ravenna e Costantinopoli

Nel 324, Costantino fece della piccola e antica città greca di Bisanzio, la *nuova Roma*, ribattezzandola con il nome di Costantinopoli (dal 1930 ad oggi Istanbul). Essa si trovava nell'area peninsulare tra il mare di Marmara ed il Mar Caspio e, tale posizione strategicamente dominante, la rese la più importante metropoli dell'impero romano d'Oriente prima, e di quello bizantino poi.

In seguito alla morte di Teodosio nel 395, l'impero romano venne infatti suddiviso in due parti: quello occidentale con capitale Milano e quello orientale con capitale Costantinopoli. Sebbene Roma rimanesse centro insostituibile del cristianesimo, non era più la capitale che, nel 402, venne nuovamente spostata da Milano a Ravenna. Questa città, collocata sulle sponde settentrionali dell'Adriatico, poteva vantare di una maggiore facilità di contatti con la capitale orientale e, grazie al mare e alle paludi che la circondavano, risultava meglio difendibile dalle invasioni barbariche che, nel 410, colpirono anche la stessa Roma. Ravenna rimase capitale dell'impero romano d'Occidente fino al 476, anno in cui cadde la parte occidentale dell'impero, e poi con Teodorico (493-526) divenne capitale del regno goto, finché fu conquistata da Giustiniano (527-565) nel 540, quando perse il ruolo di capitale e divenne una delle tante città del vasto impero con sede a Costantinopoli.

In seguito alla crisi dell'impero romano, ci fu anche un periodo di stasi per quanto riguarda l'evoluzione scientifica e tecnologica. Ciò si tradusse in architettura, e in particolare nell'ambito della costruzione delle coperture, in una regressione verso tecniche costruttive meno complesse, come quella della capriata lignea, tipica della basilica paleocristiana, già precedentemente descritta.

Grazie all'apporto dato dalle tradizioni tecniche importate dal Medio Oriente, l'architettura bizantina riuscì ad interrompere tale periodo di aridità nel campo dell'ingegneria e riprese con vigore gli schemi costruttivi romani. Si diffuse in questo contesto la *struttura a baldacchino*: cupola su pianta quadrata o ottagonale

che, con pietre angolari e trombe d'angolo, più avanti nel tempo anche con pennacchi, veniva collegata alle arcate che raccordavano i sostegni.

La necessità di alleggerire il più possibile la copertura spaziale comportò l'adozione nella costruzione di particolari accorgimenti, che assicuravano un comportamento statico puramente in regime membranale. Infatti, alcune cupole vennero integralmente costruite con la tecnica dei *tubi fittili*, cioè elementi a forma di cilindro in terracotta che, svuotando del peso la copertura, la rendevano un vero e proprio guscio sottile.

A tal proposito, è necessario ricordare che qualunque sia la forma del guscio e la legge di carico, in certe condizioni è possibile equilibrare i carichi solamente con sforzi membranali. Tale concetto è il prodotto degli studi sulla meccanica dei gusci che hanno anche consentito di definire le ipotesi sotto le quali il calcolo degli sforzi normali, quelli tangenziali sono nulli se si considera la condizione di assial-simmetria, è sufficiente per capire come il guscio sopporta i carichi applicati, siano essi permanenti o accidentali. Le 5 ipotesi che consentono di trascurare gli sforzi flessionali nell'analisi statica dei gusci sono le seguenti:

1. vincoli su sede conica, cioè che possono trasmettere solo azioni membranali;
2. snellezza, cioè il rapporto tra lo spessore e il maggiore tra i due raggi di curvatura principali deve essere molto minore dell'unità;
3. carichi senza brusche variazioni, cioè non si accettano né carichi concentrati, né distribuiti con discontinuità;
4. spessore del guscio variabile con continuità, cioè non si accettano brusche variazioni di sezione;
5. assenza di cuspidi lungo la linea meridiana.

I più importanti edifici a cupola dell'era bizantina sono le basiliche di San Vitale a Ravenna e di Santa Sofia a Costantinopoli. Essi sono caratterizzati dall'aver una pianta che si può definire centrale e da una cupola principale, sorretta da passaggi laterali voltati e semi-cupole, che svolgono l'importante ruolo statico di assorbirne le spinte esercitate verso l'esterno.

7.1.1 Basilica di San Vitale

Derivata dalla chiesa dei Santi Sergio e Bacco di Costantinopoli, questa basilica, iniziata nel 525 e consacrata nel 547, fu il modello per l'architettura imperiale del IX e X secolo, come dimostrato dalla Cappella Palatina di Carlo Magno ad Aquisgrana.

Si tratta di una chiesa a pianta centrale, con vano centrale ottagonale (l'8 era simbolo della Resurrezione poiché era ottenuto come la somma di 7 che rappresentava il tempo, più 1 che era Dio), coperto con una cupola nascosta dal tiburio, che si imposta su un deambulatorio perimetrale con matronei. L'abside, affiancata da due cappelle, è poligonale all'esterno e circolare all'interno e si suddivide in 7 parti, una per ogni lato dell'ottagono, eccetto quella che porta al presbiterio.



Figura 7.1: Basilica di San Vitale, vista dall'alto, Ravenna, 525-547

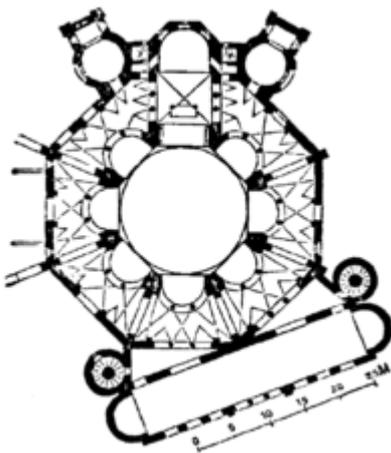


Figura 7.2: pianta della basilica

Come si nota con la vista dall'alto riportata nella figura 7.1, l'esterno risulta molto movimentato, grazie al tiburio sopraelevato e ai contrafforti separanti le facce (fig.7.3), che sono a loro volta suddivise tramite paraste e cornici dentellate. Alla alta parte centrale dell'edificio sormontata dalla cupola è circoscritta quindi la parte perimetrale a due piani. Due porte consentono l'accesso all'interno: l'una in asse e l'altra, invece, obliqua rispetto all'abside; di conseguenza, l'endornartece, invece di essere tangente al lato frontale dell'ottagono, è disposto obliquamente toccando un angolo del perimetro, come si può vedere dalla pianta riportata in figura 7.2.



Figura 7.3: particolare del contrafforte

Per quanto riguarda la tecnica costruttiva, le fondazioni sono state realizzate con calcari e trachiti posati su pali di rovere.

Dal punto di vista dei materiali è evidente la matrice orientale, sia perchè San Vitale è stata costruita con mattoni lunghi e sottili che si rifanno a quelli tipici di Costantinopoli, sia perché i marmi usati per le colonne e i capitelli provenivano dalle officine del mare di Marmara.

Di evidente derivazione occidentale è invece la tecnica adottata per realizzare la cupola, innestando l'uno nell'altro i *tubi fittili* in laterizio; in particolare, la volta della leggerissima copertura è stata costruita tramite anelli concentrici di laterizi vuoti, simili a delle anfore, che sono rappresentate nelle immagini di figura 7.4 e 7.5. Alcuni vasi sono stati collocati l'uno accanto all'altro per realizzare la muratura di riempimento, nelle reni della cupola fino alla chiave delle finestre, mentre altri sono stati posti l'uno affianco all'altro in orizzontale, per sviluppare a forma di spirale la copertura. Queste speciali anfore vuote sono state riunite insieme ad annegate nella massa murale di malta e pietrisco, intonacandole sia all'esterno sia all'interno con malta, per assicurarne la durabilità.

La cupola semicircolare poggiante sugli 8 pilastri, presenta un diametro di 19,6 metri ed è coperta da un tetto a padiglione ottagonale.

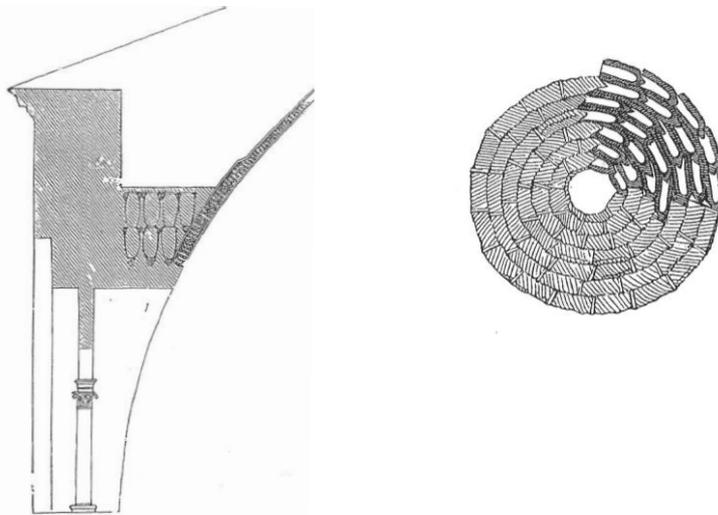


Figura 7.4: laterizi vuoti usati per la copertura

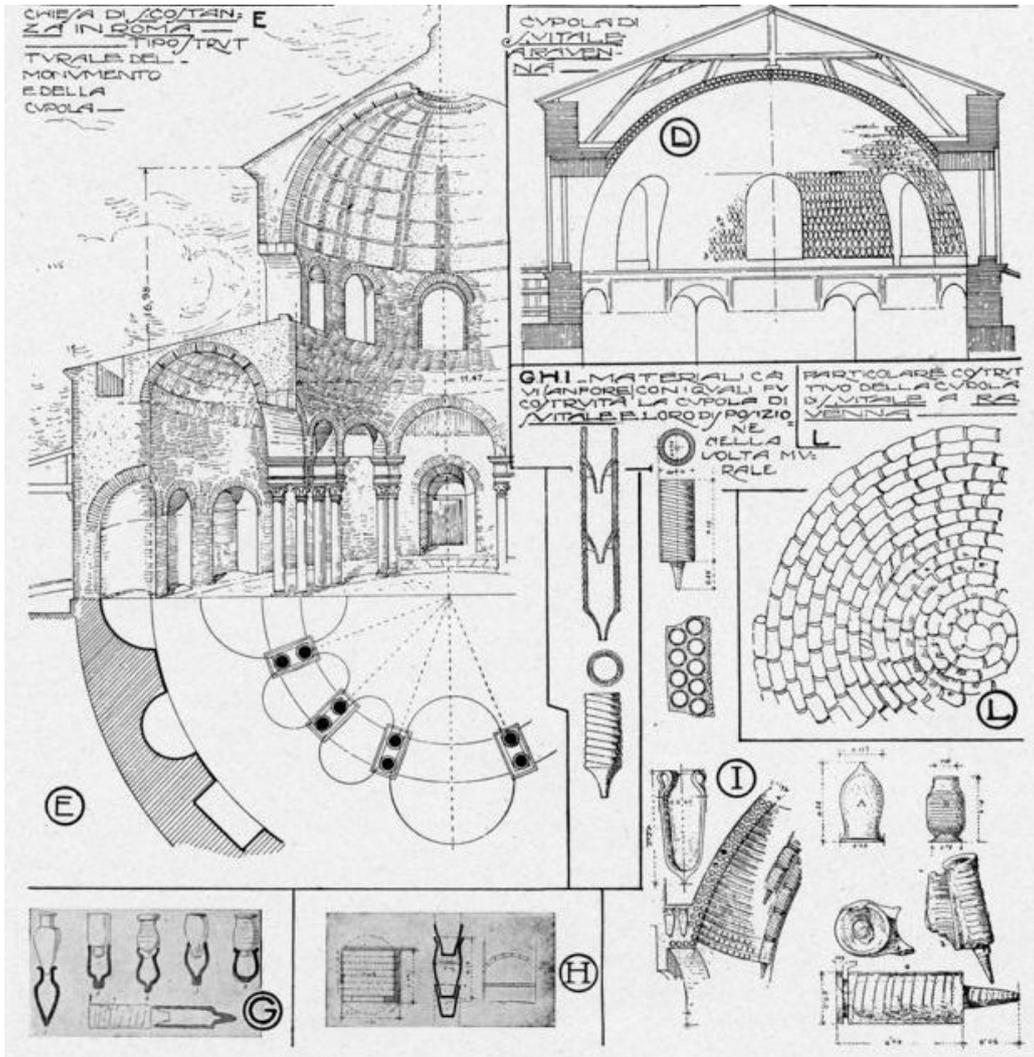


Figura 7.5: Materiali cavi per la costruzione della cupola (da tav. 45, parte III, Milani, 1920)

Per riuscire a raccordare la base circolare della cupola, alla forma di poligono ottagonale dei piedritti, si sono realizzati 8 archi. Sono stati usati anche degli speroni (indicati con S, in figura 7.6) posizionati negli 8 angoli, per garantire maggiore stabilità alla copertura.

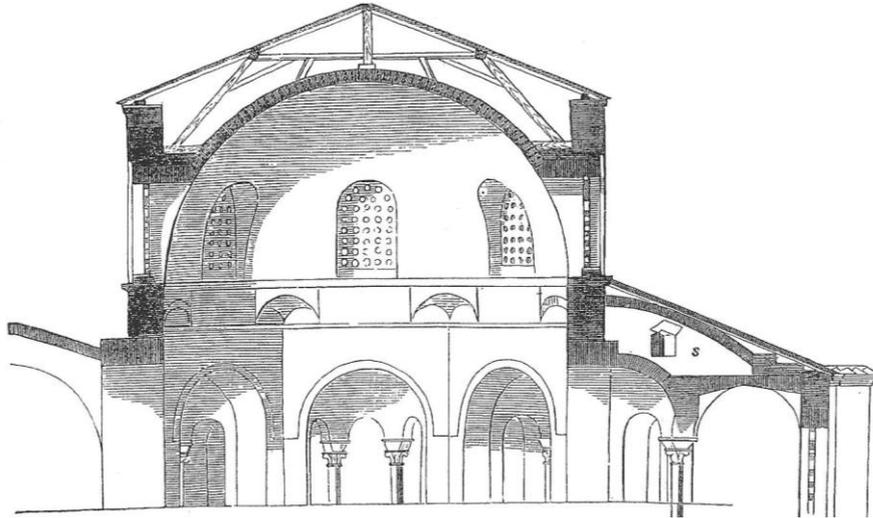


Figura 7.6: spaccato della basilica (Breymann, 1885)

Con riferimento allo spaccato riportato in figura 7.6, può essere interessante riportare le parole del Milani:-[...] si trova come il sistema di copertura sia doppio, e cioè, l'uno coprente l'ambiente ossia la cupola murale, l'altra coprente l'edificio e cioè, il tetto ligneo insistente direttamente sul muro perimetrale dell'ambiente centrale prolungato al disopra dell'imposta della cupola. Il materiale poi con cui è formata la cupola, molto leggero, e cioè di anfore vuote disposte in modo caratteristico, dimostra come si sia stato tentato da chi ha eseguito e concepito tale organismo, di diminuire il più possibile la spinta dovuta alla cupola col toglierle intanto l'ufficio suo e costruendola invece con materiale leggero e sovrapponendole un tetto. L'effetto della sua spinta, viene poi neutralizzato, in parte, dal peso sia del muro prolungato al disopra dell'imposta sia dal tetto che è indipendente dalla volta-. (Milani, 1920)

Quindi, il tetto ligneo è una seconda copertura di tipo pesante che, riducendo la spinta della cupola, favorisce la stabilità del sistema strutturale nel suo complesso,

7.1.2 Basilica di Santa Sofia



Figura 7.7: esterno della Basilica di Santa Sofia, Istanbul, 532-537

La storia della costruzione di tale basilica, dedicata alla Hagia Sophia, cioè alla sapienza divina è stata molto tormentata. La prima struttura, ad impianto basilicale e copertura lignea, venne distrutta da un incendio nel 404 e stessa sorte toccò alla sua ricostruzione voluta da Teodosio, devastata durante la rivolta contro l'imperatore, 28 anni più tardi. Nel 532, sedata l'insurrezione, Giustiniano, vide concretizzarsi il proprio desiderio di costruire la chiesa più grandiosa dell'impero, tale da superare il grande tempio di Gerusalemme del biblico re Salomone, in soli 5 anni.

Il progetto venne affidato ad Antemio di Tralles ed Isidoro di Mileto il Vecchio; non solo due architetti dell'Asia Minore, ma anche due superbi scienziati e fini matematici, eruditi dei principi propri della statica e della dinamica.

Gli architetti scelsero di adottare un compromesso tra la pianta longitudinale, tipica della basiliche occidentali, atta ad accogliere un gran numero di fedeli e quella ad impianto centrale, più comune negli edifici orientali e volta ad evidenziare la sacralità del luogo.

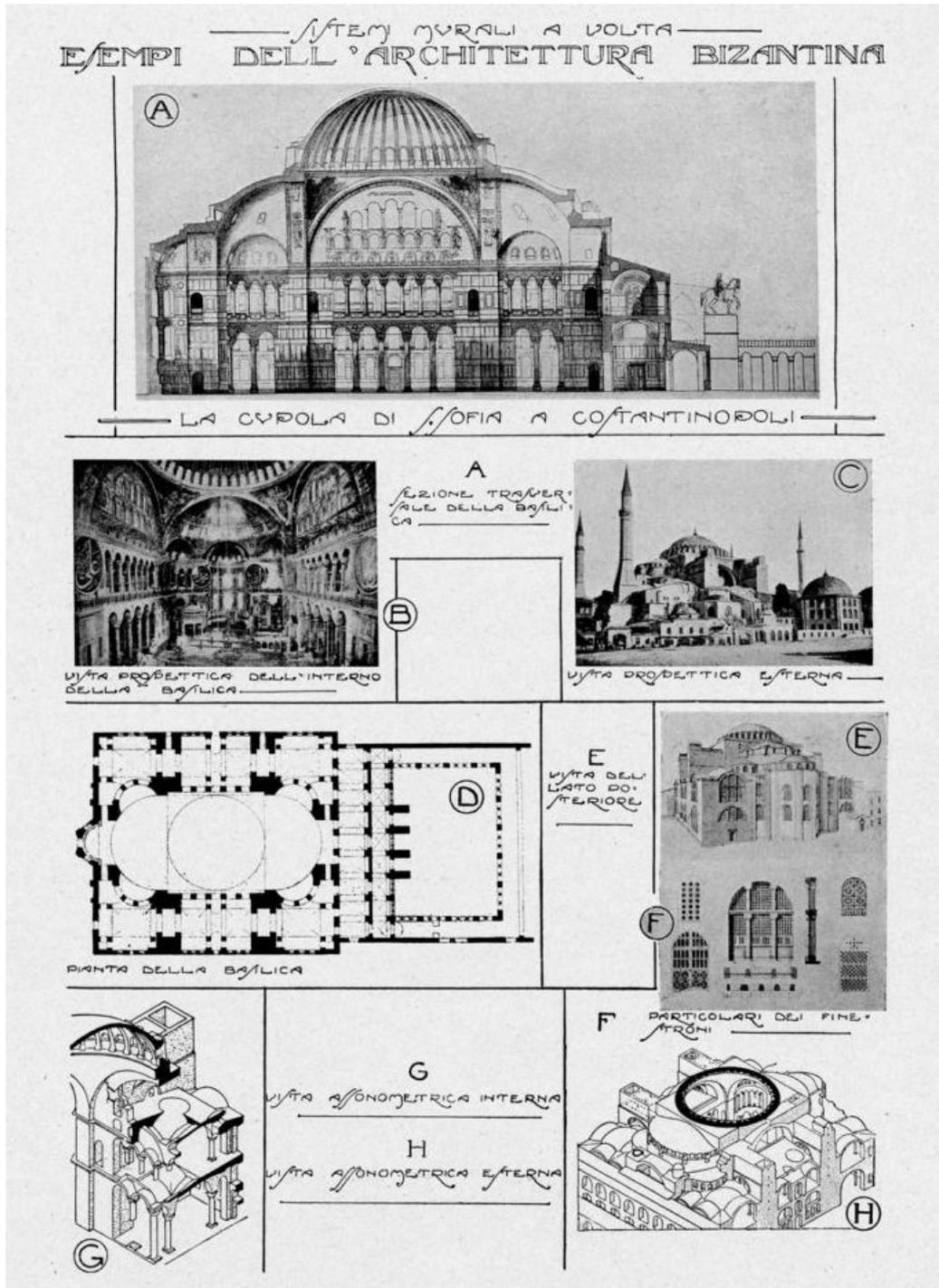


Figura 7.8: sezione, pianta, assonometria interna ed esterna (tav 44, Parte III, Milani, 1920)

Come si vede in figura 7.9, la pianta dell'edificio è un rettangolo di dimensioni 71×77 metri, con inscritto al centro un ambiente quadrato, delimitato agli angoli dai 4 piloni che sostengono la cupola emisferica. Il rettangolo è preceduto ad occidente da un doppio narcece e da un atrio, mentre ad oriente termina con un'abside.

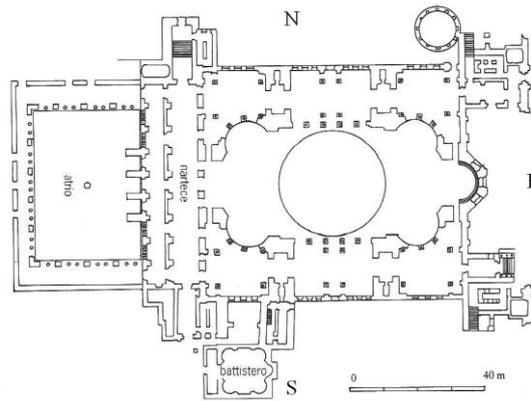


Figura 7.9: pianta (Watkin, 1999)

Per allungare longitudinalmente il quadrato centrale, si sono creati due ambienti a forma trapezoidale, rispettivamente affiancati da due esedre.

Per quanto riguarda le strutture verticali, ai 4 pilastri posti negli angoli del quadrato, si sono aggiunti così altri 4, posti ai vertici della figura formata dal quadrato centrale e dai due trapezi posti a est e a ovest. Inoltre, ci sono anche numerose colonne, tra cui quelle disposte ad esedra lungo i lati obliqui dei trapezi stessi e quelle con la doppia funzione di sostegno agli archi e di divisione delle navate.

Dal punto di vista dei materiali scelti per la costruzione, per la cupola e per le altre strutture di copertura, sono stati usati dei tipici mattoni sottili e leggeri, mentre per gli elementi strutturali verticali quali le fondazioni, i pilastri, i contrafforti e le colonne, si sono preferiti blocchi squadrati di pietra, accuratamente disposti.

7.1.2.1 La cupola

La cupola centrale di diametro pari a 31 metri ed alta 56 metri, è impostata su 4 pilastri con pennacchi sferici e la spinta orizzontale che produce è assorbita da semi-cupole ad oriente e ad occidente e da un sistema di volte a nord e a sud. Questa soluzione tecnica ha consentito una copertura inferiormente priva di muri portanti e l'apertura dell'invaso quadrato direttamente sugli ambienti che lo circondano, realizzando uno spazio con una luce dalle dimensioni senza precedenti: 61 metri in direzione longitudinale (est-ovest), e 31 metri nel senso trasversale (nord-sud).

Infatti, se sui lati nord e sud, le due navate laterali sono separate da quella centrale tramite uno scenografico diaframma, in cui colonne in marmo sorreggono i due ordini di archi, sui restanti due lati non vi è alcun elemento di sostegno né di separazione con le semicupole di rinfianco. Queste presentano il medesimo diametro della cupola principale e si articolano in basse absidi semicircolari. Quindi, per quanto riguarda la direzione ponente-levante, i due architetti pensarono di trasferire la spinta della cupola fino a terra, utilizzando le semicupole appena citate e le volte più piccole poste dietro di esse. Per motivi architettonici però, non scelsero la medesima soluzione tecnica per l'altra direzione e pensarono così di ridurre la luce, aumentare lo spessore degli arconi posti a nord e a sud, di inserire un arco di supporto nascosto sotto di essi e di rafforzare i pilastri principali collegati da tali arconi, con un sistema di volte che scaricavano la spinta su dei contrafforti. Secondo Milani, Santa Sofia è il più mirabile esempio di cupola sferica impostata su di una ambiente quadrato dell'architettura bizantina. Egli rileva che:- l'equilibrio della copertura dell'ambiente principale, ossia la cupola, è affidato oltre che ai 4 quattro piloni d'angolo, anche ad un vero e proprio sistema organico di volte e relativi piedritti, disposti nel modo più utile al disimpegno di tale ufficio statico.[...] Nella tavola 23 abbiamo procurato di rappresentare in proiezione assonometria le varie parti del *sistema resistente*-. (Milani, 1920)

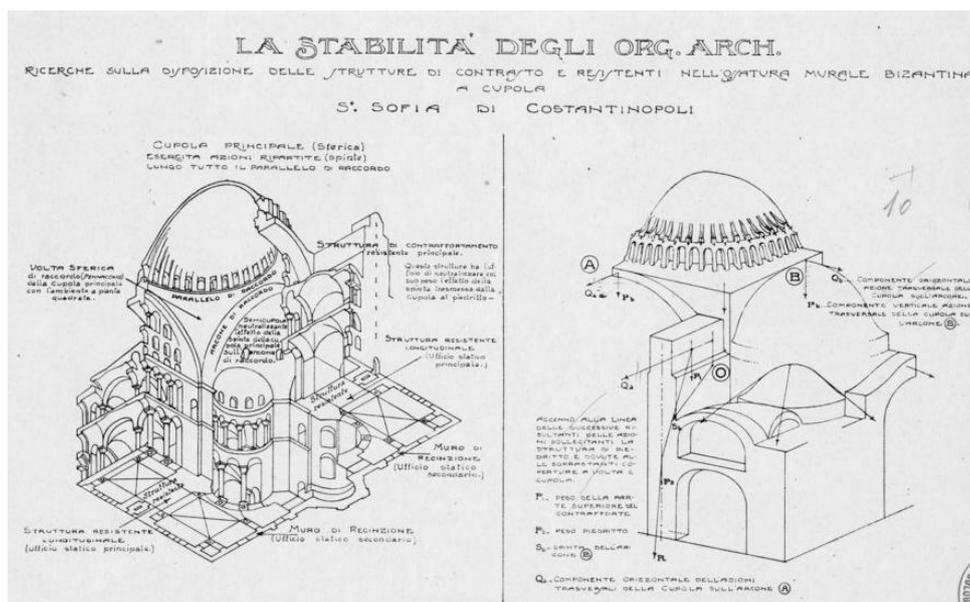


Figura 7.10: strutture di contrasto e resistenti (tav.23. parte I. Milani. 1920)

7.1.2.2 Costruzione e crollo della cupola

Circa la costruzione della cupola, a partire dai 4 piloni collegati dai 4 arconi, si realizzarono dapprima i 4 pennacchi, cioè i triangoli sferici aventi curvatura pari a quella della sfera di diametro uguale alla lunghezza della diagonale dello spazio da coprire; raggiunto poi il limite di tangenza con la chiave dei 4 archi, si veniva a definire una circonferenza che diventava il cerchio su cui impostare la cupola, come si vede dal particolare H della figura 7.8. Si costruì poi la grande cupola dal profilo ribassato, con mattoni sottili, che contribuì a peggiorare il già precario equilibrio statico della fabbrica. Infatti, gli arconi avevano già pericolosamente deformato le strutture sottostanti, tra le quali i 4 pilastri, che avevano iniziato ad inclinarsi verso l'esterno.

La principale causa dei dissesti che la basilica subì durante le fasi della sua realizzazione fu lo scivolamento ed il ritiro delle malte adoperate. È dimostrato che gli edifici bizantini del VI secolo venivano costruiti con mattoni spessi solo 4-5 centimetri, collegati da un'eccessiva quantità di legante, in giunti che potevano raggiungere i 5-7 centimetri di spessore. Ciò comportava la necessità di lunghissimi tempi di asciugatura che, molto spesso, non venivano rispettati, come nel caso di Santa Sofia, eretta solamente in 5 anni. Comunque, anche nei casi in cui si rispettava il giusto periodo di asciugatura, i carichi e le spinte delle strutture sovrastanti, molto di frequente, provocavano dissesti nella muratura, in seguito agli schiacciamenti, deformazioni e scorrimenti plastici del tanto legante.

A conferma di ciò e dell'inadattezza del sistema di contrasto delle azioni divaricanti in direzione nord-sud, nel 558 la grande cupola crollò inesorabilmente in seguito ad un sisma che colpì Costantinopoli, allargando le tante fessure presenti fin dal tempo della sua realizzazione.

Giustiniano affidò la ricostruzione ad Isidoro il Giovane, nipote del precedente progettista e suo collaboratore. Egli pensò che il crollo della copertura fosse dovuto alla eccessiva spinta verso l'esterno che la sua bassa curvatura provocava e per questo scelse di realizzare una cupola non ribassata, come i suoi predecessori, ma più alta di 6 metri rispetto alla precedente. Oltre a renderla fisicamente più slanciata, riuscì in tal modo a ridurre la spinta laterale del 30%.

Secondo Salzenberg, egli realizzò una cupola a costoloni, elevantesi su di una corona d'imposta di 30 metri di diametro e costruita in pietra da taglio, che parte con uno spessore di 75 centimetri e termina in serraglia con uno di 62. In totale, sono presenti 40 costole, sporgenti di 18 centimetri dall'intradosso e che da una larghezza di 1 metro alla base, si rimpiccioliscono verso l'alto, scomparendo in chiave, ove si ha una parete liscia che copre un diametro di 10 metri. All'imposta della cupola, le costole sono unite tra loro da archi, all'interno dei quali si aprono finestre larghe 1,49 metri, come si vede dalla figura 7.10.



Figura 7.10: veduta dell'interno (Watkin, 1999)

7.1.2.3 L'insostenibile leggerezza di Santa Sofia

La storia di tale copertura è stata molto travagliata, segnata da crolli parziali e numerosi dissesti, seguiti da interventi di restauro e rinforzo, tra cui l'inserimento

di una tirantatura metallica con la funzione di cerchiatura, dopo il terremoto del 1847.

I fenomeni di dissesto che hanno caratterizzato la storia di Santa Sofia, costruita circa 400 anni dopo il Pantheon, sembrano contrastare con quella concezione della tecnica come un continuo ed irrefrenabile percorso costellato di successi e miglioramenti, tendente alla perfezione. In realtà, tale visione positivista è in parte salvaguardata considerando che, sebbene anche Roma non sia stata indenne da eventi tellurici, Costantinopoli è stata soggetta ad un'attività sismica senza paragoni.

Inoltre Giustiniano, volendo emulare la cupola del Pantheon, che sembrava così leggera da riuscire a librarsi nel vuoto e fluttuare diafana senza evidente struttura di sostegno, addirittura la superò, con scelte che il tempo ha dimostrato erranee dal punto di vista strutturale:

1. cupola sorretta da arcate che aprivano il tamburo, invece che dalla spessa muratura;
2. mattoni leggeri e sottili, invece che il pesante calcestruzzo dell'architettura imperiale;
3. minori spessori strutturali.

Due di queste, in particolare la prima e la terza, si possono facilmente riscontrare nella figura 7.11.

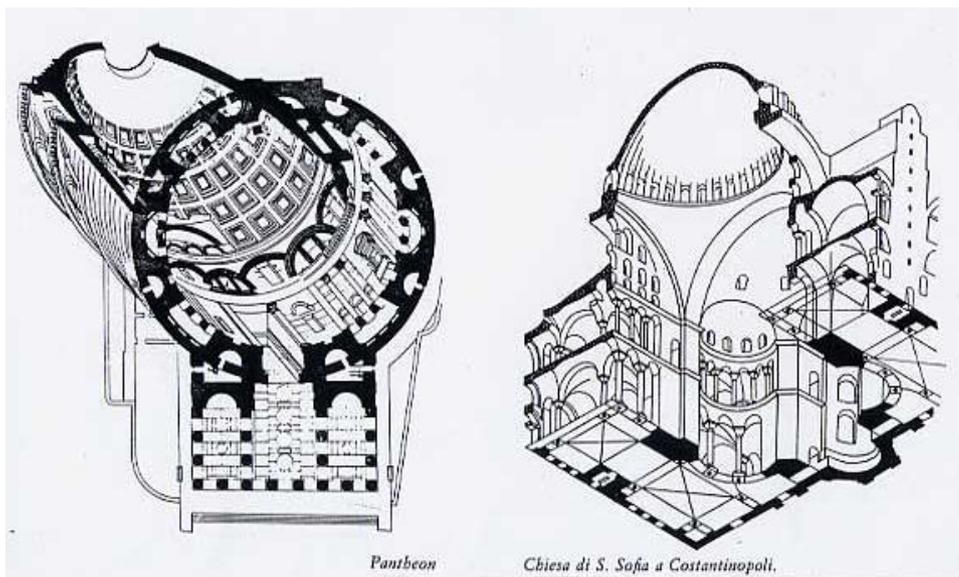


Figura 7.11: confronto tra Pantheon e Santa Sofia (www.casadellarchitettura.it)

Significativa è la descrizione dell'opera lasciataci da Procopio di Cesarea, lo storico di Giustiniano:- La cupola è meravigliosa nella sua grazia, ma, per l'apparente fragilità della sua consistenza, provoca un vero senso di terrore. Sembra infatti galleggiare nell'aria non sostenuta da alcuna solida base, librarsi in alto a rischio di chi si trova all'interno[...]. Non sembra posare su solida muratura, ma coprire lo spazio con la sua volta dorata sospesa dal Cielo-
(Procopio, VI secolo)

Si può annoverare tale edificio come il primo in cui si è costruito basandosi sul principio dell'ottimizzazione dei materiali: ottenere il massimo risultato, con la minore quantità possibile di materia prima adoperata. Nel contempo, giova ricordare anche che, Santa Sofia è uno dei monumenti più costosi di tutti i tempi; quindi tale principio non doveva essere inteso nel senso moderno di economicità e risparmio, ma finalizzato alla volontà di Giustiniano di sorprendere con l'originale realizzazione di cupole come bolle magicamente sospese a mezz'aria.

8. SISTEMI ORIENTALI

8.1 Verso l'oriente

Nel periodo definito Alto Medioevo, che va dal VII secolo all'XI, la produzione edilizia occidentale subì una notevole frenata, dovuta alle difficoltà politico-sociali seguite alle invasioni barbariche. Infatti, dopo l'invasione longobarda del 568, cessò l'unità tra l'Italia e l'impero romano d'Oriente ed il territorio rimase suddiviso in maniera non molto netta tra i dominatori longobardi e i bizantini. Nell'VIII secolo, i franchi succedettero ai longobardi e costituirono il Sacro Romano Impero, che venne riconosciuto solo quando nell'800, papa Leone III incoronò Carlo Magno nuovo imperatore, fino allora re dei Franchi. Ammiratore della romanità e profondamente cristiano, diede impulso agli studi classici con la *Schola palatina* e diede inizio ad una fase di ripresa delle forme classiche, chiamata poi "rinascita carolingia". L'edilizia monumentale subì una forte spinta, estendendosi anche oltre i confini italiani, come dimostrato dalla Cappella Palatina di Aquisgrana (790-905), che riprendeva le forme di San Vitale e dall'abbazia imperiale di Lorsh (765-774), di cui resta solamente l'ingresso trionfale (Torhalle).

Se questo fu un periodo di difficoltà per la storia dell'edilizia occidentale, fatta eccezione per le opere caroline, nel contempo, in oriente si stavano sviluppando nuove culture e civiltà, tra le quali prima fra tutte quella islamica, che arricchirono l'umanità di opere straordinarie.

8.2 L'architettura islamica

Maometto (570-632), fondatore della religione islamica, riuscì ad unificare le numerose tribù della penisola arabica e, dopo la sua morte, i *califfi* (successori) costituirono un vasto impero che nel 632 si estendeva dai confini con l'India al sud della Spagna.

Caratteristico dell'architettura islamica è il grande uso di cupole a bulbo e di archi eccedenti, carenati, polilobati ed intrecciati. Altra peculiarità è l'assenza di raffigurazione antropomorfe, dovute al divieto sia di rappresentare Allah con sembianze umane, sia di raffigurare qualsiasi essere vivente, ad eccezione delle piante che, con i motivi geometrici e le scritte in caratteri cufici, sono le uniche decorazioni presenti.

Nei nuovi territori conquistati, in un primo tempo i musulmani si limitarono a convertire in moschee gli edifici adibiti ai culti locali, mentre nei luoghi di particolare rilevanza simbolica per la propria storia, cominciarono ad erigere nuove moschee.

La casa di Manometto a Medina fu la prima moschea islamica ad essere costruita: luogo in cui vi era sepolto il profeta e in cui vi alloggiarono i primi califfi. In tale edificio, si svolgevano molte funzioni e per molte di esse vennero poi realizzati altri settori, con il passare degli anni. Infatti, la moschea era il luogo ove, oltre ad avvenire la preghiera comune e collettiva, si compivano trattative politiche e si facevano riunioni, ma al contempo era anche una scuola di teologia, un tribunale, un ospedale e un'abitazione per i credenti senza dimora.

8.2.1 La moschea

In origine, la moschea (dall'arabo *masjid*: luogo dove ci si prostra) si configurava come un semplice appezzamento di terreno recintato. Con il passare del tempo si articolò in una sala ipostila (*haram*) con il tetto piatto (*zulla*), caratterizzata da un muro privo di aperture di derivazione ebraica (*qibla*), orientato in direzione della Mecca, dove era nato Maometto. A partire dalla fine del VII secolo, questa parete venne arricchita con una nicchia (*mihrab*) destinata al sacerdote (*imam*), frequentemente affiancata da colonne e sormontata da un arco.

Ispirandosi alla copertura di rami di palma tipica delle abitazioni arabe, serie di archi collegavano i pilastri della sala, disposti sia parallelamente sia perpendicolarmente rispetto alla *qibla*.

L'impianto della basilica cristiana, caratterizzata dall'atrio antistante, influenzò l'architettura della moschea islamica, che venne infatti dotata di un cortile circondato da colonnati con al centro la fontana per i lavacri e arricchito dall'XI secolo in poi con monumentali portoni di ingresso (*iwan*).

Elemento distintivo della moschea è l'alta torre del minareto (dall'arabo *minar*: luogo del fuoco) dal quale il mujaeddin si sporge per richiamare i fedeli alla preghiera. Esso si presenta come una struttura a torre con sezione quadrata o circolare, dotata in sommità di piattaforme balconate. Si pensa che derivi dalle torri chiesastiche della Siria bizantina e si ispiri anche alle ziggurat mesopotamiche, come dimostrato palesemente dalla forma del minareto della Grande Moschea a Samarra, nell'attuale Iraq, databile tra VIII e IX secolo. Si può notare dalla figura 8.1, che si tratta di un minareto in mattoni alto 55 metri derivante, con la sua forma a spirale,

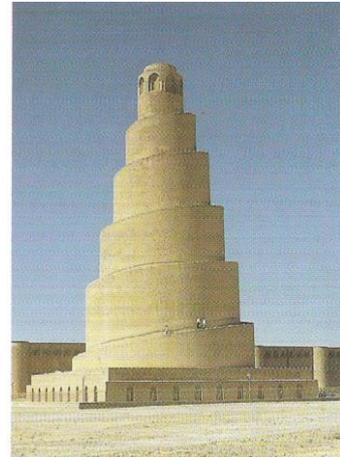


Figura 8.1: Minareto a spirale, Samarra, VIII-IX secolo, (Melrose, 1996)

dalla ziggurat di Babilonia, probabilmente conosciuta dai musulmani grazie ai contatti con la Persia sassanide. Per poter rivaleggiare con le strutture sacre delle altre religioni, i musulmani sopperirono la mancanza di una propria tradizione costruttiva, riprendendo ed elaborando elementi architettonici classici, paleocristiani, persiani, ed indiani, come evidenziano le numerose derivazioni, citate nella descrizione della tipologia di edificio islamico più diffuso.

8.2.2 La Cupola della Roccia

La Cupola della Roccia venne costruita per volere del califfo Abd al-Malik, che desiderava rendere Gerusalemme centro religioso dell'Islam, al pari della Mecca e di Medina. Per erigere il monumento, che avrebbe dovuto competere con i tanti

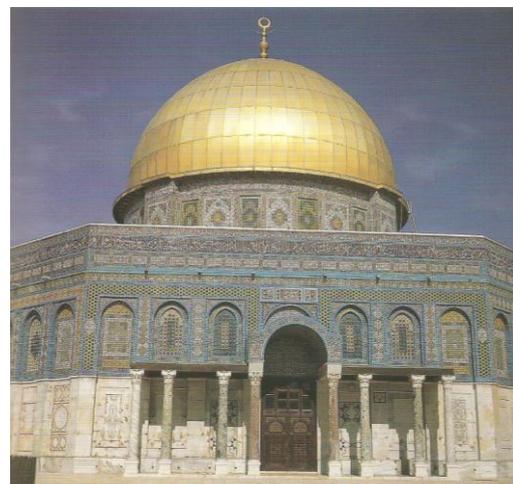


Figura 8.2: esterno della moschea, Gerusalemme, 687-692

luoghi di culto cristiani presenti nel territorio, scelse simbolicamente la zona dell'Haram al-Sharif, luogo caro alla tradizione ebraica, cristiana ed islamica per differenti motivi:

1. vi sorgeva il Tempio di Salomone;
2. avvenne il famoso episodio biblico in cui Abramo, obbedendo agli ordini divini, stava per sacrificare il figlio Isacco;
3. iniziò il viaggio mistico di Manometto.

Si tratta di un edificio a pianta ottagonale (non rivolto verso la Mecca), con doppio deambulatorio che consente ai fedeli di ammirare il sasso-reliquia posto al centro, attraverso due percorsi concentrici. All'esterno, quattro porte,

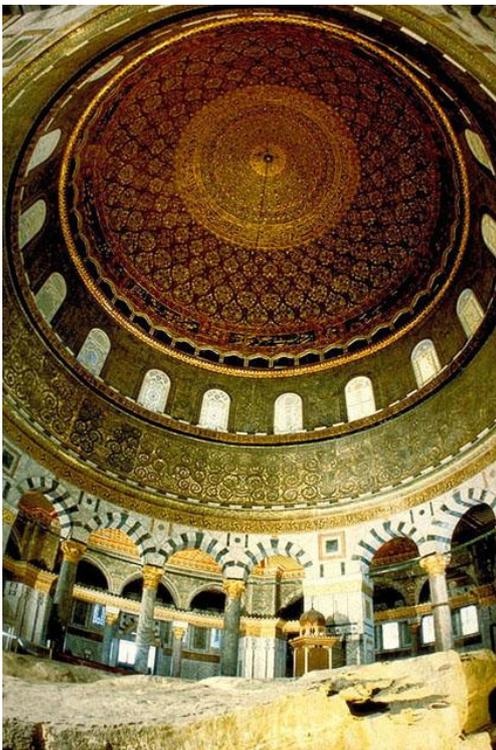


Figura 8.3: interno della cupola

corrispondenti ai quattro punti cardinali, consentono l'accesso, mentre all'interno, una grandiosa cupola dorata si imposta sul peribolo centrale. La cupola è di fattura lignea, con la calotta rivestita da lastre di ottone, e poggia su di un tamburo in muratura, dotato di 16 finestre. La struttura di sostegno dell'edificio è costituita, oltre che dalla muratura perimetrale, anche da 12 pilastri e 28 colonne disposti sia lungo la circonferenza subito attorno alla reliquia, sia lungo il perimetro dell'ottagono più esterno.

L'edificio venne costruito tra il 687 e il 692; trasformato in chiesa cattolica dai crociati nel XII secolo, successivamente venne riconvertito in moschea. In particolare, nel 1552 il sultano Solimano I fece realizzare 40 finestre a grata nell'ottagono e ordinò di decorare l'esterno con colorate piastrelle di maiolica turca.

8.3 I castelli nel deserto

La dinastia dei califfi omayyadi costruì, sul margine occidentale della cosiddetta mezzaluna fertile, i famosi “castelli nel deserto”. Tali costruzioni svolgevano il doppio ruolo di presidio militare e di postazioni per la bonifica dell’arido terreno, riprendendo i caratteri politico-militari dell’impero romano e poi bizantino che ormai stava decadendo e, di conseguenza, retrocedendo.

Nell’attuale Libano si trovava la città di Anjar, costruita all’inizio del VIII secolo, con caratteri tipicamente romani, evidenziati nel proprio impianto urbanistico, nelle terme e nella struttura del palazzo. Infatti, l’insediamento fortificato è basato sullo schema del *castrum* romano, con il territorio diviso in quadrati (*insulae*) e con strade coperte da portici, caratterizzati da colonne romane e capitelli decorati, che si sviluppavano lungo il *cardo* e il *decumano*. In particolare, oltre alla moschea, il califfo al-Walid I fece costruire il palazzo governativo, ispirandosi alla tradizionale “villa rustica” romana, e due edifici destinati ai bagni termali, ancora serviti da acquedotti romani.

Altri esempi di “castelli nel deserto” sono:

- il castello di Minyah, vicino al lago di Tiberiade, risalente alla stessa epoca di Anjar;
- il castello di Mshatta in Giordania, i cui resti sono esposti a Berlino;
- il palazzo di Qusayr Amra, sempre in Giordania, dove si trova la cupola del *calidarium* delle terme, risalente al 711, finemente decorata con l’immagine del cielo e i segni dello zodiaco che, si è dimostrato, derivino da manoscritti di astronomia greci;
- la città di Khirbat al-Mafjar in Palestina, i cui resti dimostrano la derivazione da schemi architettonici bizantini.

8.4 La montagna di pietra: Borobudur



Figura 8.4: tempio di Borobudur visto dall'alto, Indonesia, VIII-IX secolo

Il tempio di Borobudur, costruito nell'isola di Giava tra il 760 e l'847, è il più importante di tutta l'Indonesia. Si tratta di una montagna alta 45 metri, realizzata con 55000 metri cubi di pietra. Presenta una pianta quadrata su cui sono disposte decine di stupa, secondo un razionale schema geometrico, sopra terrazzamenti concentrici di andamento rettilineo che, dal sesto in poi diventano circolari, fino ad arrivare all'unico grande stupa situato nel punto più alto. Da evidenziare la presenza sia delle quattro scalinate disposte assialmente che permettono l'ascensione, sia dei muri, tra una terrazza e quella successiva che, rialzati oltre al piano calpestabile, fungono da balaustra e forniscono lo spazio necessario per i 1300 rilievi, narranti la vita del Buddha.

8.5 La giungla di pietra: Angkor



Figura 8.5: il tempio di Angkor Wat, Cambogia, XII secolo

La città di Angkor, fondata nell'802, è stata scoperta oltre 1000 anni dopo, nascosta sotto la lussureggiante vegetazione della giungla e privata di molte preziose opere scultoree. Essa era la capitale dell'antico impero khmer, la cui civiltà realizzò strutture architettoniche talmente sorprendenti, da poter oggi annoverare la Cambogia come il sito archeologico più vasto del mondo dopo la Muraglia cinese e comunque come uno dei più affascinanti. Infatti, la città comprende un territorio di 40 chilometri quadrati in cui vennero realizzate opere di notevole rilevanza strutturale quali templi e monumenti, ma anche sofisticati sistemi idraulici, volti alla canalizzazione degli 80 milioni di metri cubi di acque provenienti nel Mekong.

In particolare, il tempio di Angkor Vat, esterno alla città di Angkor Thom, risalente al periodo compreso tra il 1112 e il 1150, è l'edificio sacro più grande del mondo. È costruito secondo la metafora religiosa della montagna sacra, rappresentata dalla torre centrale alta 65 metri, circondata da quattro torri minori, situate negli angoli del primo dei tre recinti-galleria concentrici.

Il tempio si estende complessivamente per più di un chilometro quadrato ed è difeso da un fossato largo 200 metri.

9. LO SCHEMA SPINGENTE ROMANICO

9.1 *Il romanico*

Il termine “romanico” è stato coniato da due studiosi francesi dell’Ottocento, per indicare il movimento artistico europeo che si sviluppò tra l’XI e il XII secolo, istituendo un parallelo con la tradizione *romanza*, di derivazione romana, in contrapposizione con la natura *germanica* dell’architettura “gotica”, dei due secoli successivi.

Sebbene filtrato attraverso i monumenti della rinascita carolingia, già dal nome si intuisce la grande influenza esercitata dalla tradizione costruttiva del mondo romano, di cui venne ripreso soprattutto l’arco a tutto sesto, usato per collegare il complesso sistema di colonne e pilastri alternati. D’altro canto è necessario ricordare che la definizione di romanico non è del tutto esatta, poiché tale stile non si diffuse solamente nei popoli di matrice culturale romana, ma anche nei territori popolati dai germani, riuniti tutti insieme sotto l’impero franco.

Da ricordare anche che il romanico francese e italiano ebbe caratteri architettonici molto differenti a seconda della regione in cui sviluppò, poiché le lotte per il potere tra i vari stati, il papa e l’imperatore non consentirono la nascita di uno stile unitario, come invece si ebbe in Inghilterra, sotto il forte dominio dei normanni.

9.1.1 *Le chiese*

Lo stile romanico si presenta come sobrio e severo, con chiese e monasteri simili a fortezze dagli spessi muri, volte a difendere i principi cristiani durante un’epoca di disordini politici e di decadenza sociale. Le finestre rimpicciolite, le decorazioni ridotte ai minimi termini e la pietra priva di rivestimenti rendono la costruzione estremamente semplificata e la struttura ben visibile. Ad esempio, il *capitello romanico*, privo di ornamenti, era realizzato con dadi che mostravano palesemente la propria funzione di punto d’incontro tra i sostegni (le colonne) e il peso gravante della copertura (la volta).

Le chiese romaniche sono ad impianto basilicale, il cui spazio è definito dal modulo quadrato della campata che stabilisce le proporzioni della navata principale, delle navatelle, del transetto, del narcece e dell'atrio, se presente. Per quanto riguarda l'esterno, rispetto alle precedenti basiliche, vi è la trasformazione della zona absidale, arricchita dal coro e da più absidi, e la presenza di una torre di crociera all'intersezione tra navata e transetto.

La facciata, decorata in alcuni casi con il rosone, che insieme agli archetti pensili (o *beccatelli*) costituiscono i pochi elementi di abbellimento presenti, può essere di diverse tipologie:

1. monofastigata (o a capanna semplice) dotata di un tetto a due spioventi;
2. monocuspidata (o a capanna composta) con la zona centrale, corrispondente alla navata centrale, più alta rispetto alle parti laterali;
3. a due torri, poste agli estremi della facciata.

Le prime due tipologie si sono diffuse in Italia e nel sud della Francia, mentre l'ultima, antecedente della facciata gotica, si è diffusa nella Francia Settentrionale, in Germania e in Spagna.

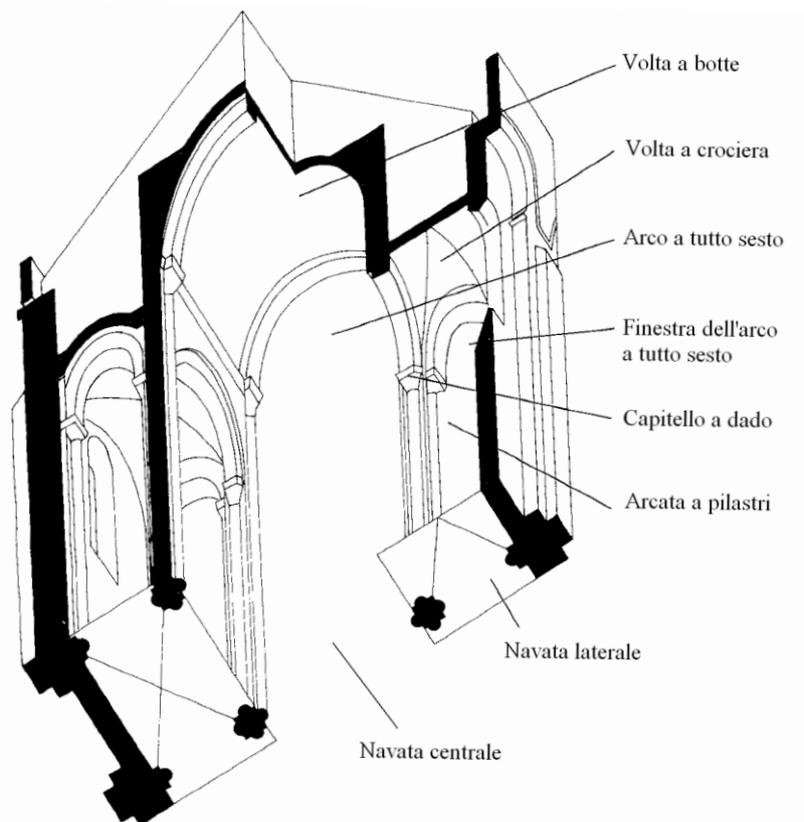


Figura 9.1: isometria della cattedrale di Poitiers (Melhose, 1999)

Per quanto riguarda l'interno, che in parte è stato riprodotto in figura 9.1, il matroneo, nato come loggiato interno, posto sopra le navate laterali e riservato alle donne, viene trasformato con il passare del tempo nel *triforio* cieco, con fini puramente decorativi e sormontato dal piano illuminato del *cleristorio*.

Le coperture sono di fattura lignea o in mattoni e, al posto del tetto piano tipico della basilica paleocristiana, si fa largamente uso delle volte soprattutto a botte, ma anche a crociera.

9.1.2 Basilica di Sant'Ambrogio



Figura 9.2: esterno della basilica di Sant'Ambrogio, Milano, XI-XII secolo

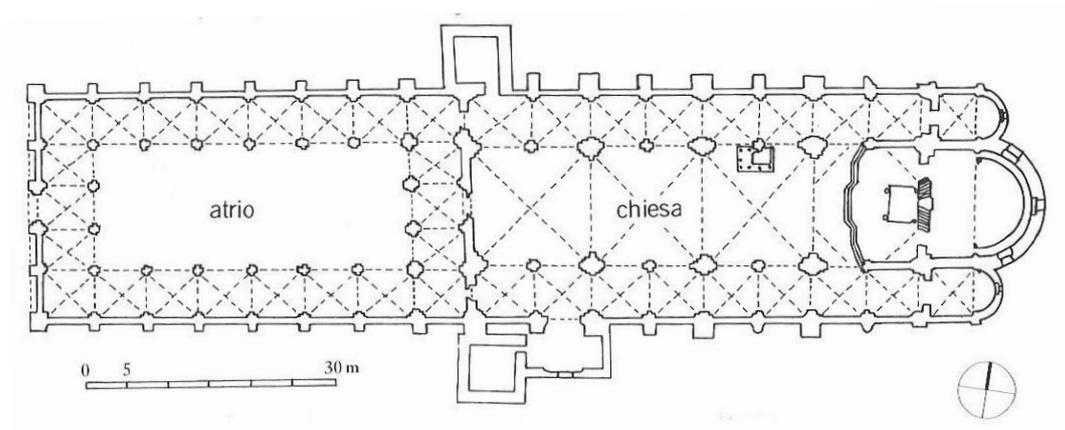


Figura 9.3: pianta della basilica (Watkin, 1999)

La basilica ambrosiana è di notevole importanza, in quanto riassume tutte le caratteristiche del romanico appena elencate, tra cui la facciata a capanna, la decorazione sobria con beccatelli, l'uso dell'arco a tutto sesto e la presenza del matroneo.

Come si vede dall'immagine 9.3, possiede una pianta articolata in tre navate absidate senza transetto, di cui la maggiore è il doppio rispetto alle laterali, e un interno preceduto da un quadriportico antistante che, escludendo le absidi, ne riprende esattamente le dimensioni. Lungo il perimetro sono predisposti dei contrafforti che fuoriescono dalle pareti e si distinguono tra quelli che svolgono la funzione di sostenere la spinta delle volte a crociera del quadriportico e delle navate laterali e quelli, molto più grandi, che assorbono l'azione maggiore esercitata anche dalle volte a crociera della navata centrale.

La maggiore differenza rispetto alle basiliche paleocristiane, dotate di un tetto piano o a capriate lignee, è la copertura composta da volte a crociera, realizzate in pietra e cotto, materiali che evidenziano i costoloni e i 4 archi posti al di sopra dei lati delle campate quadrangolari.

I pilastri sono *polistili*, in quanto costituiti da un pilastro centrale (a base quadrata) e da 4 semi-colonne (a base circolare) accostate in modo da formare un fascio; analogamente ai contrafforti esterni, anche i pilastri si dividono tra quelli più aggettanti che sostengono anche la campata centrale, e quelli più piccoli che sorreggono solo il peso proveniente dalla copertura delle navate laterali.

Rispetto alle ricche basiliche bizantine della vicina Ravenna, i materiali utilizzati, cioè pietra e mattone, sono molto più poveri e privi di decorazioni. Il motivo di tale scelta è



**Figura 9.4: pilastro polistilo dell'atrio
(foto di Dall'Orto)**

molteplice e non si esaurisce con il minore costo e la maggiore disponibilità di tale materia prima, ma risiede anche nella razionale volontà di evidenziare lo schema statico dell'edificio. Infatti, la pietra, con l'alternanza del cotto, è stata

usata per costruire le membrature portanti, mentre il mattone, intonacato o meno, per gli elementi senza alcuna funzione strutturale.

9.1.3. Le volte su nervature a crociera

È necessario ricordare che la basilica di Sant’Ambrogio, fondata nel IV secolo, fu ricostruita in stile imperiale nel 1080, ma la copertura venne realizzata solamente dopo il terremoto verificatosi nel 1117; tale datazione è di notevole importanza, poiché permette di annoverare le grandi volte costolonate a crociera della navata, tra i primi esempi del genere in tutta Europa. Questo primato conferma come nel sistema spingente romanico fu l’adozione delle volte a botte a essere usuale mentre, come si vedrà in seguito, le coperture a crociera divennero tipiche del sistema gotico, differenziandosi dalle milanesi poiché impostate sull’arco a sesto acuto e non sull’arco a tutto sesto.

La volta a crociera, che nasce dall’intersezione di due volte a botte, era nota fin dall’antichità romana, come dimostrato dai corridoi interni del Colosseo, coperti da volte oltre che a botte anche a crociera, spesso costolonate, in opus caementitium. I sapienti romani, quindi, avevano già intuito il grande vantaggio tecnico di tali coperture che, a differenza della volta a botte, in cui i pesi vengono scaricati in maniera continuativa lungo le due pareti longitudinali di sostegno, scaricano le azioni puntualmente nei 4 angoli, come si nota dalla fig. 9.5. Il carico viene trasmesso ai 4 punti grazie ai costoloni, cioè due archi che si incrociano lungo le due diagonali e concentrano su di sé tutti gli sforzi, assolvendo da ogni compito resistente i 4 triangoli, chiamati *vele*, che completano la copertura.

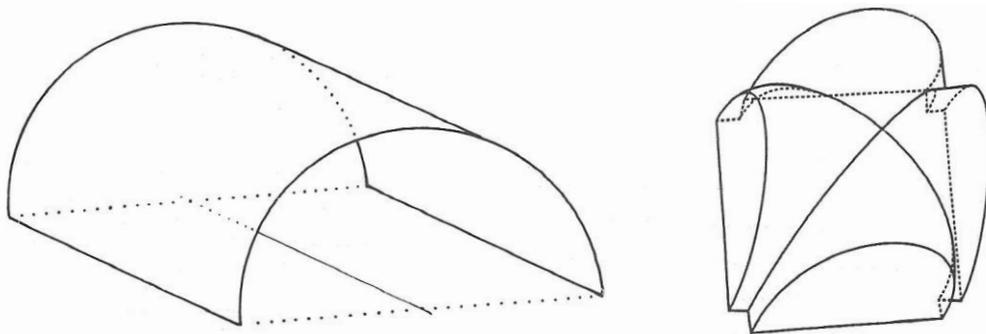


Figura 9.5: schema della volta a botte e a crociera (Adorno, 1986)

10. LO SCHEMA STRUTTURALE GOTICO

10.1 L'arco

Si è già affermato che l'arco, assente nell'Oriente antico e nella Grecia classica, venne utilizzato in maniera sistematica dai romani e fu ripreso durante il Medioevo, particolarmente adottato nello stile gotico. Se *l'arco a tutto sesto* era il tipo di arco caratterizzante le opere romane, l'arco proprio dell'architettura gotica era *l'arco a sesto acuto*, dotato di due centri a livello delle imposte e di una luce minore della freccia. Si pensa che esso derivi dagli archi presenti nelle costruzioni islamiche.

10.1.1 Statica grafica

Dopo avere affrontato nei paragrafi precedenti il problema delle origini del sistema spingente (cfr. 3.5.3.1) e aver descritto le caratteristiche dell'arco (cfr. 2.3.1), si cerca di capire ora, come un solido, formato da tanti blocchi disposti uno accanto all'altro lungo un asse curvilineo tra le due spalle, possa resistere al proprio peso e addirittura ai carichi gravanti su di esso, senza crollare.

A tal fine, si utilizzano i concetti della statica grafica, disciplina nata nel 1855 con il tedesco Karl Culmann, che per primo rappresentò la forza come un segmento orientato equipollente, cioè come un vettore con direzione, verso e modulo esattamente uguali a quelli dell'azione reale.

Si consideri l'immagine 10.1, in cui è rappresentata solamente la metà sinistra di un arco, che riceve in chiave una azione esercitata dalla parte destra di arco mancante, indicata con H . L'equilibrio del primo concio sarà garantito da una forza R_1 , ricevuta dal concio di sinistra, che chiude il triangolo delle forze che agiscono su di esso e cioè: H , R_1 e il peso proprio del concio P_1 . Data la validità del terzo principio della dinamica, si avrà una forza uguale in modulo, avente la stessa direzione, ma di verso opposto a R_1 , che agisce sul secondo concio, e si

indicherà con R_2 , la forza che garantisce la chiusura del triangolo con la stessa R_1 e il peso del concio P_2 . Analogamente, effettuando il medesimo procedimento di composizione vettoriale per ogni concio i -esimo, dalla chiave all'imposta, si determina la curva delle pressioni, cioè il luogo delle successive risultanti R_i . Le intersezioni di tale curva con i giunti si dicono *centri di pressione* e se tutti questi punti si trovano entro il nocciolo centrale d'inerzia dell'arco, la struttura arcuata è sollecitata da soli sforzi normali di compressione. In tale caso, l'arco è costruibile secondo la configurazione analizzata, accostando l'uno all'altro conci di materiale non resistente a trazione, anche lisci, poiché non è richiesta alcuna resistenza d'attrito, fatta salva la imprescindibile condizione che le spalle reggano alla spinta.

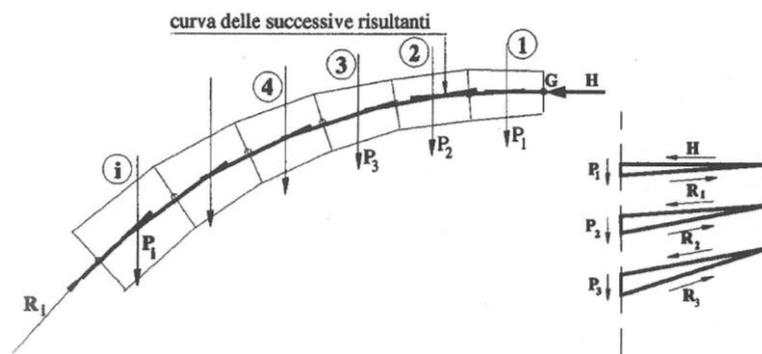


Figura 10.1: Composizione grafica delle risultanti (Sparacio, 1999)

A diversi valori di H , corrispondono tante curve delle pressioni che danno tutte origine a situazioni equilibrate, ma se la struttura è iperstatica, come nel caso dell'arco a due cerniere, l'equilibrio non consente di trovare la soluzione statica. Infatti, tra le infinite configurazioni equilibrate, l'unica soluzione reale è quella congruente; essa deve cioè soddisfare l'equazione di congruenza imposta, nel momento in cui si elimina il vincolo sovrabbondante e si rende così la struttura da iperstatica ad isostatica, per poterla risolvere con sole condizioni di equilibrio.

Suggestiva è l'applicazione di tale procedimento sul blocco lapideo centrale di un arco primitivo, situato in Sardegna, proposto in figura 10.2.

Sia P il peso proprio del blocco in questione, R_d la forza che riceve dal concio di destra ed R_s quella che riceve da quello di sinistra. È necessario ricordare che nella statica grafica, i vettori disegnati hanno una lunghezza che rappresenta

l'entità del modulo della reale forza, attraverso un'opportuna scala introdotta nel disegno. Il blocco in chiave sarà in equilibrio se i tre vettori equipollenti si incontrano in un punto e il triangolo delle forze che definiscono si chiude.

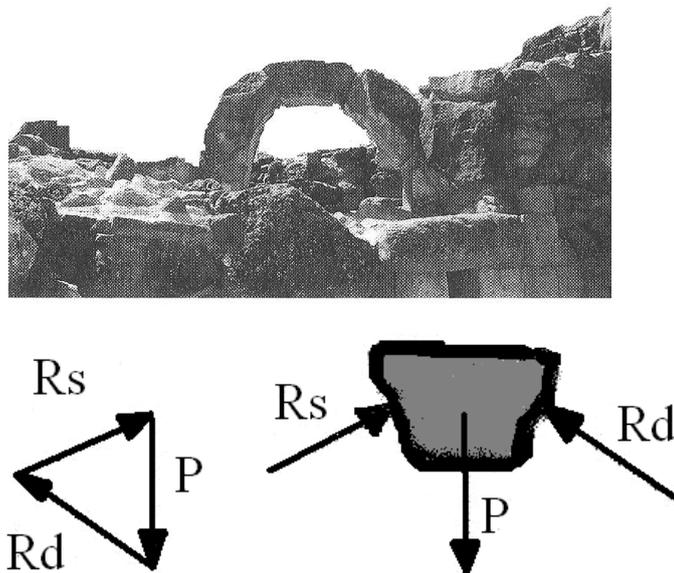


Figura 10.2: applicazione elementare di statica grafica (da Sparacio, 1999)

10.1.2 Primo metodo di dimensionamento

Se si pensa che nei trattati settecenteschi le forze venivano ancora rappresentate con delle piccole mani che tiravano funi, si capisce come tutte le sopraccitate considerazioni non erano di certo patrimonio dei costruttori del passato, anche se Vitruvio aveva intuito la presenza di un effetto spingente degli archi sui piedritti, che per questo motivo dovevano essere sovra-dimensionati.

Infatti, l'assenza della spinta assorbita dai piedritti rende irrealizzabile l'arco, poiché non permette l'equilibrio dei conci. Di ciò avevano fatto esperienza gli antichi, accortisi della difficoltà di realizzare un arco, i cui blocchi tendevano a scivolare inesorabilmente verso il basso, mano a mano che ci si avvicinava alla chiave e avevano erroneamente ipotizzato un aumento della gravità con l'avanzare della costruzione.

Secondo Viollet le-Duc, “gli ingegneri” gotici erano dotati di una brillante sensibilità che suggeriva loro di conformare gli archi in maniera tale che, la curva delle pressioni, di cui ignoravano l'esistenza, coincidesse con il proprio asse

curvilineo. In pratica, per ottenere tale risultato si basavano su considerazioni geometriche che permisero la diffusione di una regola empirica per il dimensionamento dei piedritti, sopravvissuta fino ai tempi moderni.

Data L , la luce dell'arco di sinistra nella figura 10.3, ed s lo spessore dei pilastri reggi-spinta, si individuano i tratti AB , BC e CD , che sono tre parti di lunghezza pari ad $L/3$. Definita la corda che sottende la porzione di arco AB , la si riporta a partire da A e si individua il punto E e, procedendo analogamente per la corda CD , si individua F . Tracciando i segmenti verticali per i punti trovati E ed F , si definiscono gli spessori dei piedritti. Tale regola vale per archi di luce modesta, ma può essere adottata anche per archi a sesto acuto, nei quali si ottengono spessori s più ridotti, dovuti alla minor spinta esercitata da tale tipo di arco a parità di luce.

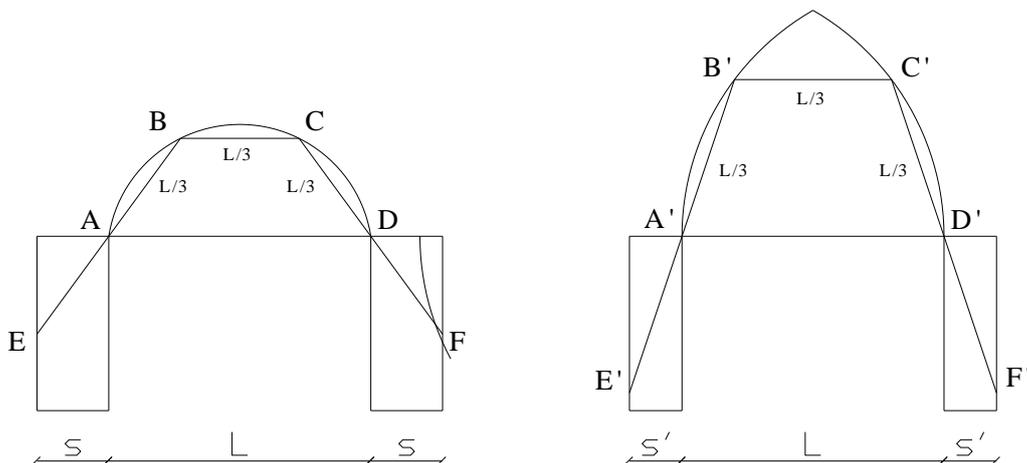


Figura 10.3: rappresentazione grafica del primo metodo di dimensionamento piedritti

10.1.3 L'arco a sesto acuto

I tecnici gotici adottarono sistematicamente l'arco a sesto acuto che divenne un vero e proprio elemento caratterizzante dello stile, necessario per costruire monumenti sempre di maggiore altezza, simboli dell'aspirazione dell'uomo verso Dio. La minor spinta esercitata sugli appoggi rispetto all'arco a tutto sesto, consentiva di sopportare carichi maggiori e di realizzare pilastri meno massicci; mentre la forma acuta, permetteva l'apertura di alte finestre e di accentuare la verticalità dell'edificio.

Tale arco, come tutti quelli costruiti nel passato, si presenta come un arco a conci (*arc clavè*), cioè costruito con una serie di blocchi lapidei, tagliati in modo da essere inseriti a cuneo tra gli altri e di bloccarsi a vicenda. La particolarità dell'arco a sesto acuto (*arc brisé*) è di essere un arco policentrico, costituito da due archi di cerchio che si incontrano in chiave, dotati di una raggio maggiore di metà della luce.

Gli studiosi del Rinascimento criticarono aspramente l'architettura gotica, definendola in senso dispregiativo appunto gotica, nel senso di barbaro, come dimostrato dalla lettera del 1529, scritta dall'allora ispettore delle belle arti, Raffaello Sanzio a papa Leone X; in essa, l'urbinate giudicava negativamente: -la maniera dell'architettura tedesca, lontanissima dalla bella maniera dei romani-. (Raffaello, 1529).

Eppure, l'arco a sesto acuto, tanto utilizzato da quei rudi barbari, riduceva notevolmente l'azione divaricante trasmessa ai sostegni rispetto all'arco a tutto sesto, tanto caro ai sapienti romani. Per quantificare la riduzione della spinta, si riporta un calcolo ripreso dal testo "La scienza e i tempi del costruire" di Renato Sparacio, in cui la minor spinta esercitata viene quantificata tramite il rapporto tra la freccia di un arco a sesto acuto e la freccia di un arco a tutto sesto di eguale luce, rappresentati in figura 10.4.

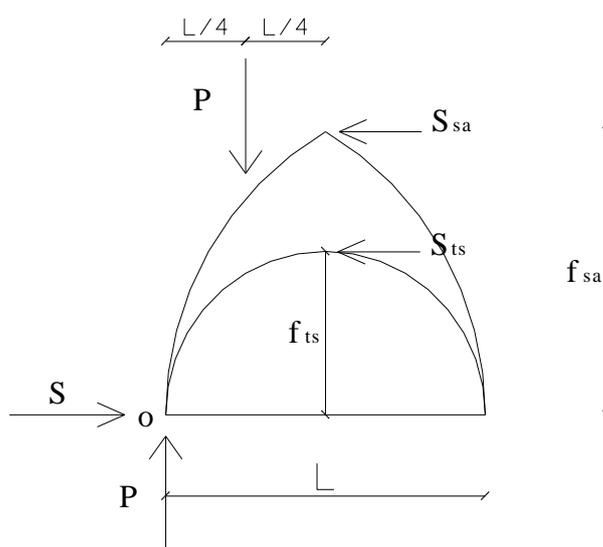


Figura 10.4: arco a tutto sesto e a sesto acuto impostati sulla medesima luce

Entrambi sono di luce L e vengono sottoposti al medesimo carico puntuale pari a P , posizionato ad $L/4$.

Si scrivono le equazioni d'equilibrio alla rotazione, assumendo come polo il punto O:

- $S_{sa} \cdot f_{sa} - P \cdot \frac{L}{4} = 0$ per l'arco a sesto acuto (*sa*)
- $S_{ts} \cdot f_{ts} - P \cdot \frac{L}{4} = 0$ per l'arco a tutto sesto (*ts*)

Si ottiene quindi:

$$S_{sa} \cdot f_{sa} = S_{ts} \cdot f_{ts}$$

Da cui si ricava che il rapporto tra le spinta esercitate dall'arco a sesto acuto e la spinta esercitata dall'arco a tutto sesto è uguale al rapporto tra la freccia dell'arco a tutto sesto e la freccia dell'arco a sesto acuto; in formule:

$$\frac{S_{sa}}{S_{ts}} = \frac{f_{ts}}{f_{sa}}$$

Se per esempio l'arco a tutto sesto ha un a freccia pari a 0,87 L, il rapporto sarà :

$$\frac{S_{sa}}{S_{ts}} = \frac{f_{ts}}{f_{sa}} = \frac{0,5 \cdot L}{0,87 \cdot L} = 0,575$$

Pertanto, l'arco a sesto acuto comporta una riduzione del 42,5% della spinta rispetto ad un arco a tutto sesto, a parità di carico e di luce; in altre parole, l'arco gotico esercita sui piedritti un'azione spingente pari a poco più della metà di quella dell'arco a tutto tondo, impostato sulla medesima corda.

Altra proprietà molto positiva dell'arco a sesto acuto è la possibilità di ottenere varie forme di arco, usando sempre i medesimi conci disposti con una data curvatura. Infatti, da conci dotati di una curvatura $1/R$ costante si possono costruire sia un arco a tutto sesto con $L = 2R$, sia una infinita gamma di archi a sesto acuto aventi una luce generica L_i , a seconda di dove si pongono i centri dei due semi-archi che li costituiscono. Ad esempio, si può costruire l'arco a sesto acuto di luce pari al raggio ($L = R$), ottenuto dall'intersezione dei due semi-archi tracciati puntando il compasso in corrispondenza delle imposte. Tale arco fu quello maggiormente adoperato nelle strutture gotiche e si definisce *equilatero* poiché ad esso si può inscrivere un triangolo appunto equilatero.

Questa caratteristica permise una standardizzazione delle sagome e delle centine di sostegno che comportò una notevole semplificazione e una maggiore

economicità nella lavorazione del materiale e nella posa in opera. Inoltre, si poteva risolvere il frequente problema delle irregolarità nell'allineamento dei muri di imposta, senza cambiare la curvatura dei conci componenti l'arco e senza conseguente variazione della freccia, provvedimenti inevitabili nel caso di arco a tutto sesto.

A partire dal triangolo VCO di riferimento, avente come vertici:

V: chiave dell'arco

C: centro del semi-arco

O: proiezione del punto di chiave sulla corda

per classificare i vari archi a sesto acuto, i medievali facevano uso del rapporto CO/VC , che diveniva quindi un parametro quantificante l'acutezza dell'arco.

Essendo VC pari a R in tutti i casi, tale rapporto risulta:

- nullo per l'arco a tutto sesto, poiché $C \equiv O$;
- paria ad $1/2$ per l'arco a sesto acuto equilatero, perché $CO = L/2 = R/2$;
- pari a $1/4$ nel caso in cui C sia posto ad $L/3$, in quanto $CO = L/6 = R/4$.

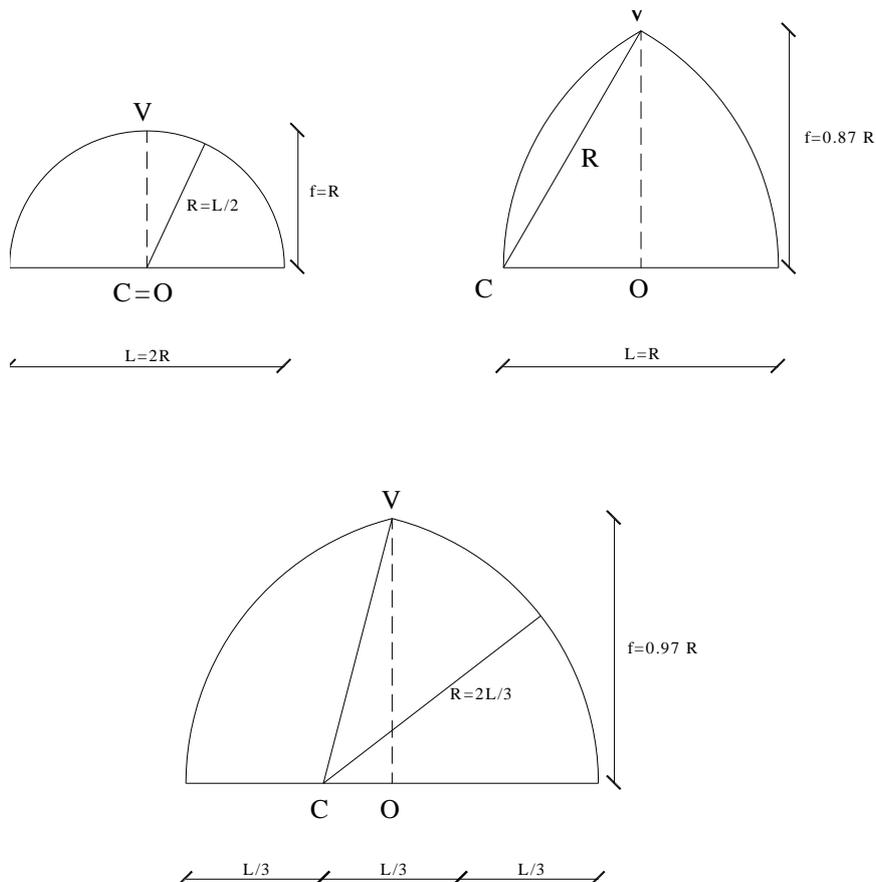


Figura 10.5: archi con diverse acutezze

Autorevoli studiosi del gotico hanno osservato che nelle cattedrali del periodo, per motivi estetici, non vennero mai usati archi a sesto acuto con acutezza maggiore di $1/2$, corrispondente all'arco equilatero; a differenza delle cattedrali anglo-normanne del medesimo periodo, in cui costruttori si spinsero oltre tale limite, pur di usare lo stesso raggio di curvatura per tutti gli elementi voltati della struttura.

10.1.4 Villard de Honnecourt

Discendente da una famiglia di ingegneri edili, fu attivo nel XIII secolo, quando lavorò come architetto nella sua terra natale: Honnecourt-sue-Esaut, in Piccardia. L'unica opera che di certo produsse, conservata ad oggi nella Biblioteca Nazionale di Parigi, è il suo taccuino di disegni, intitolato "Livre de portature", ricco di racconti e schizzi effettuati durante i suoi viaggi per le città europee, dove poté assistere alla costruzione di molte cattedrali gotiche.

Con il famoso disegno dei due lottatori, dimostrò grande sensibilità nell'aver compreso la natura spingente del sistema arcuato; l'immagine contenuta nel taccuino e che si può vedere in figura 10.6, divenne fonte d'ispirazione per lo stesso Leonardo, che affermò come due semi-archi, di per sé deboli, si equilibrano opponendosi l'uno all'altro in chiave e danno origine alla "fortezza causata da due debolezze".



Figura 10.6: "uomini che lottano" (Villard de Honnecourt, 1220-1235)

Riguardo al tracciamento dell'arco a sesto acuto, egli comprese la straordinaria potenzialità, insita in tale elemento costruttivo, di ottenere diverse forme con la medesima apertura del compasso. In tante pagine dimostrò il proprio parere a favore dell'arco a sesto acuto, per esempio quando affiancò la bozza di una finestra ad arco equilatero, posta tra due pilastri nella Cattedrale di Reims, all'immagine della Madonna con Bambino, entrambe dotate di quel senso di acutezza, tipico del gotico.

10.2 Il gotico

Intorno alla metà del XII secolo, la scuola architettonica dell'Ile-de-France elaborò un nuovo stile che in breve si affermò al posto del romanico, prima in Francia e poi in tutta Europa.

A partire dal 1180, nel solo territorio francese vennero costruite qualcosa come 80 cattedrali e 500 abbazie in soli 90 anni, delineando quella straordinaria fase nella storia delle costruzioni, che venne definita a posteriori “crociata delle cattedrali”.

Le ragioni che spinsero i medievali a realizzare tali grandiose opere furono molteplici. Prima fra tutte fu la fede che portò mercanti, artigiani, corporazioni e comunità a tassarsi per finanziare la costruzione di chiese, degne della Gerusalemme celeste e della custodia di sacre reliquie. Grande impulso venne dato anche dalla dinastia dei Carolingi che voleva consacrare il proprio potere e legittimare la feconda alleanza con la chiesa. Non bisogna dimenticare inoltre, che la suddivisione della Francia in tante contrade fece nascere una tacita gara a distanza tra le città nell'erigere cattedrali sempre più alte, con primati che venivano continuamente superati:

- ✓ 34,50 metri di Notre-Dame a Parigi nel 1163;
- ✓ 36,50 metri di Chartres nel 1194;
- ✓ 37,50 metri di Reims nel 1212;
- ✓ 41,70 metri di Amiens nel 1221;
- ✓ 46 metri di Beauvais nel 1272.

10.2.1 Le origini

Ciò che si sa con certezza è che il gotico nacque in una zona nei dintorni di Parigi, chiamata l'Ile-de-France che, grazie ai Capetingi riusciti ad unificare il paese, divenne il polo per i progressi scientifici e culturali di tutta la Francia.

Secondo gli studiosi del XIX secolo, la chiesa dell'abbazia di Saint-Denis fu la prima vera e propria cattedrale gotica, in cui nel 1140, l'abate Suger fece sostituire lo stretto coro con una diversa costruzione, dotata di deambulatorio, più

grandiosa, colorata e luminosa. Influyente consigliere della monarchia francese, l'abate viene ricordato come un personaggio di spicco nell'ambito politico, ma anche come uno dei grandi costruttori del XII secolo; egli concepì l'opera architettonica come un mezzo per raggiungere Dio e, partendo dalle istanze stilistiche del romanico, ne arricchì gli spazi essenziali con decorazioni, sculture, vetrate e riuni, per la prima volta in maniera organica, elementi formali burgundi e normanni, come l'arco a sesto acuto e la volta a costoloni.

Sebbene Saint-Denis sia annoverato come il primo esempio di fabbrica gotica, la "teoria della foresta", elaborata da James Hall nel 1797, ha identificato le origini dello stile nelle primitive costruzioni in legno dei germani.

Da ricordare che il termine "gotico" non detiene alcun significato storico ed è stato introdotto nella lingua francese da Rabelais nel 1533, con il significato spregiativo di "barbaro", nel senso proprio di: selvaggio distruttore della grandiosa tradizione classica; in effetti, veniva usato dai rinascimentali per indicare l'età buia del medioevo che aveva cancellato lo splendore dell'impero romano. A dimostrazione di ciò, si cita una famosa affermazione del Vasari:- Non erano ancora venuti i Goti e l'altre nazioni barbare e straniere, che distrussero insieme con l'Italia tutte l'arti migliori-. (Vasari, XVI secolo)

Il termine quindi indicava il disarmonico e selvaggio mondo nordico, contrapposto a quello latino, depositario di gusto e senso dell'armonia; tale radicata opinione rimase immutata fino al XVIII secolo.

10.2.2 Eugene Viollet-el-Duc

Viollet-le-Duc (1814-1879) nel 1854 cominciò a scrivere il proprio "Dictionnaire", in cui trattava il gotico come l'unico stile architettonico che coniugava razionalmente l'aspetto formale alle prestazioni strutturali del materiale lapideo utilizzato. Fu il primo a scomporre l'edificio nelle sue parti costituenti, per delineare il ruolo statico che esse svolgevano all'interno dell'organismo complessivo. Basandosi sulle conoscenze tecniche di metà Ottocento, condusse una elaborata analisi strutturale che aveva come oggetto il tipo di edificio secondo lui più adatto a delineare l'ossature portante: la cattedrale gotica. A tal proposito,

va rilevato che:- [...] nessuno prima di lui aveva cercato di estendere a un intero edificio le analisi allora limitate, al più, e in occasione della costruzione di ponti, alla stabilità del complesso arco-piedritto; che nessuno aveva tentato, prima di lui, di tradurre quei sentimenti di leggerezza, di meraviglia, di stupore, che avevano accompagnato la riscoperta e la rilettura del gotico durante tutto il Settecento e fino alla polemica tra classicisti e goticisti di metà Ottocento, in un linguaggio meno fantasioso e più rispondente alla natura meccanica dei nuovi problemi che quel modo di costruire poneva, e risolveva, rispetto alla eredità del mondo classico-. (Di Pasquale, 2003)

10.2.3 Dalla chiesa romanica alla cattedrale gotica

Qoèlet, re di Gerusalemme e figlio di Davide, per esprimere una verità assoluta, ripeteva spesso la seguente frase:- ciò che è stato, sarà, e ciò che si è fatto si rifarà -. In altre parole, non c'è niente di nuovo sotto la luce del sole. Tale semplice concetto presenta molte sfaccettature ed interpretandolo secondo l'ottica di un ingegnere, consente di affermare che:- La saggezza dei costruttori che per secoli hanno utilizzato sempre gli stessi materiali è manifestata dall'idee che, ridotti i fatti alla loro essenza, si rivelano costanti. Così è per la volta ogivale e per le crociere che ne derivano: esse sono reperibili un pò ovunque nel bacino mediterraneo e più in là, a Oriente, in aree culturali islamiche fino all'India; nè è da escludere che altri studi possano produrre nuove informazioni o far spostare temporalmente all'indietro le improbabili date cui taluni, come scrive il Panofsky appendono i propri arazzi della storia-. (Di Pasquale, 2003)

A conferma di tale autorevole opinione, si può ricordare che alcuni tra i più importanti elementi caratteristici dell'architettura gotica e cioè:

- arco a sesto acuto,
- volta a crociera costolonata,
- contrafforte,
- arco rampante,
- pilastro composto polistilo,

fossero presenti anche in costruzioni erette in tempi e luoghi differenti, rispetto a quelli che si definiscono propri del gotico. Quello che è certo è che tali soluzioni tecniche trovarono una propria sistematica organizzazione nello stile diffusosi nel nord Europa tra il XII e il XIII secolo, costantemente adottato per la costruzione di cattedrali ed abbazie.

La necessità di una più intensa illuminazione degli ambienti, insieme a quella di una più accentuata verticalità, determinò il passaggio dall'architettura romanica a quella gotica.

Nelle chiese romaniche venivano molto usate le volte a botte, le cui spinte gravavano sulle pareti longitudinali delle navate e soprattutto sui muri perimetrali dell'edificio, che dovevano reggere le azioni esercitate dalle volte sia della navata centrale, sia di quelle laterali. Infatti, la mezza volta a botte che copriva il matroneo serviva per equilibrare la spinta laterale della copertura centrale, scaricandola sul muro esterno, anche perchè quello interno non poteva fornire una grande resistenza, a causa delle aperture che consentivano il passaggio tra la navata e le navatelle. La conseguente impossibilità di realizzare delle finestre sul muro perimetrale, essendogli totalmente affidata la stabilità della copertura, aggiunta alla presenza del matroneo (o *tribuna*) al secondo piano, rendeva scarsamente illuminati gli interni delle chiese del periodo.

Nelle chiese gotiche invece, venne raggiunta una maggiore illuminazione grazie all'utilizzo della *volta a crociera*, i cui costoloni assorbivano la spinta e la scaricavano sui pilastri della navata centrale e di quelle laterali, consentendo l'apertura di finestre nei muri perimetrali che, privati della funzione di sostenere l'azione divaricante, non correvano più il pericolo di ribaltarsi e potevano diventare così più sottili. Inoltre, i costruttori gotici scelsero di sacrificare la tribuna per realizzare le alte vetrate del *cleristorio* ed un piccolo, ma luminoso corridoio, chiamato *triforio*, che si affacciava sulla navata centrale.

Lungo lo sviluppo longitudinale delle chiese romaniche, le pareti erano esternamente irrigidite da *lesene* che si estendevano in verticale dal piano campagna fino alla linea di gronda, determinando un incremento di spessore nei muri laterali. Queste però non erano sufficienti a sopportare l'azione spingente di una copertura voltata e quindi furono progressivamente trasformate in *contrafforti*

che, sporgendosi molto di più dalla parete, garantivano la stabilità al sistema spingente, grazie al principio delle resistenze passive (cfr.2.3). Nel periodo gotico, la sempre maggiore altezza della navata centrale rispetto a quella delle laterali, raggiunta grazie all'utilizzo dell'arco a sesto acuto, richiese l'innalzamento dei contrafforti e l'introduzione di elementi strutturali che raccordassero questi alle alte pareti finestrate. Nacque così *l'arco rampante*, un semiarco che, scavalcando la navata laterale, aveva la funzione strutturale di esercitare una contropinta equilibrante a quella della copertura della navata centrale, secondo il principio delle resistenze attive (cfr.2.3); posto all'esterno della fabbrica, e articolato su vari livelli nel caso di più di due navate laterali, divenne uno dei simboli caratterizzanti lo stile gotico.

A proposito di archi rampanti Viollet-le-Duc, alla voce *Arc* del suo "Dictionnaire", disegnava gli schizzi di figura 10.7 e affermava che:- Gli archi rampanti primitivi sono generalmente formati da un quarto di cerchio, ma i loro conci sono spessi e pesanti; resistono all'azione della spinta delle volte con il loro peso, e aggiungono un nuovo carico sulle pile in A, a quello delle volte. Allorché si comprende meglio la funzione degli archi rampanti si vede che si può opporre alla spinta obliqua una resistenza obliqua; e non soltanto evitare di sovraccaricare il pilone d'un nuovo peso ma addirittura alleggerirlo di una parte di quel peso. D'altra parte era stato osservato che gli archi rampanti, essendo tracciati con archi di cerchio, si rialzavano in B quando la spinta delle volte era considerevole e quando il peso dei conci dell'arco non era esattamente calcolato per conservare la curvatura. Perciò gli archi rampanti furono centinati con un arco di cerchio con centro all'interno della navata; assolvevano

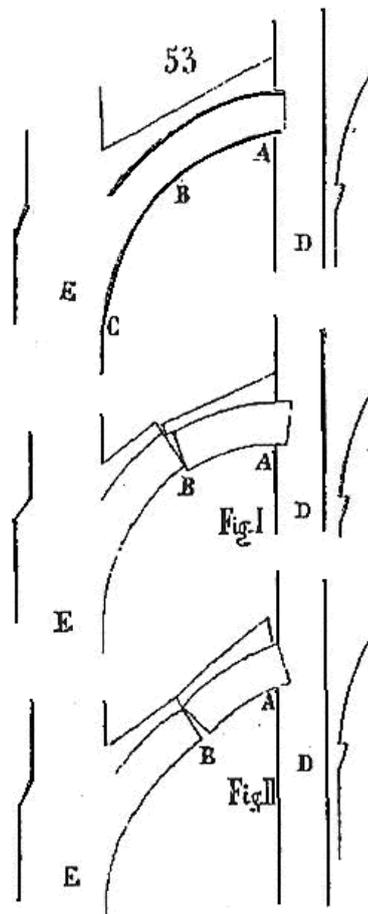


Figura 10.7: arco rampante
(Viollet-le-Duc, 1854)

così la funzione d'un puntello non opponendo più una forza passiva a una forza attiva, ma sopportando una parte del peso della volta e, contemporaneamente alla funzione di azione laterale, scaricando il pilastro. Se per ragioni di economia, o altro, le spalle non potevano avere un grande spessore, gli archi rampanti diventarono dei veri e propri pilastri inclinati, leggermente incurvati, opposti alle spinte una resistenza considerevole e riportando queste spinte quasi verticalmente sui contrafforti-. (Viollet-le-Duc, 1854-59)

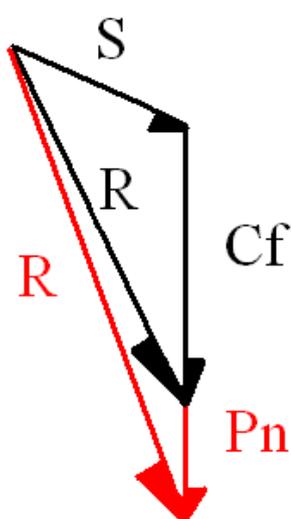


Figura 10.8: risultante spinta-contrafforte-pinnacolo

Altri elementi costruttivi caratteristici introdotti dal gotico furono i *pinnacoli*, che svolgevano una funzione stabilizzante secondo il principio delle resistenze passive, aggiungendo al contrafforte il proprio peso in modo da aumentarne la resistenza al ribaltamento. Infatti, se si considera la composizione delle forze in gioco, riportata in figura 10.8, si nota come il peso della statua o della guglia, posta sopra al contrafforte (P_n), si somma ad esso (C_f) e con la spinta S dà origine ad una risultante R (in rosso) più vicina alla verticale.

Bisogna anche evidenziare che la presenza di costoloni nelle volte a crociera determinò la trasformazione dei pilastri che, nel periodo trattato, subirono una notevole

complicazione della sezione. Dal semplice pilastro *cruciforme*, si passò a quello *quadro* affiancato da semicolonne, per arrivare a quello tipico del gotico: il *pilastro composto polistilo*, riportato nell'immagine 10.9. Questa forma era correlata alla presenza delle nervature intradosali della volta che assorbivano i carichi della copertura e fasciavano il pilastro, per scaricare i flussi di forze fino al terreno.

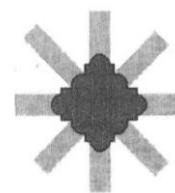


Figura 10.9: sezione pilastro composto polistilo (Sparacio, 1999)

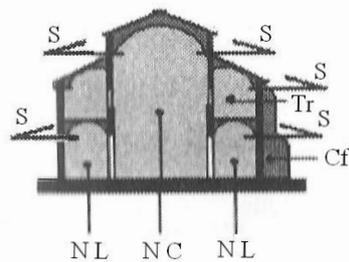
È chiaro che ogni elemento formale utilizzato era scelto in virtù di una motivazione funzionale:

- arco a sesto acuto → ridurre la spinta alle imposte e permettere una maggiore altezza;

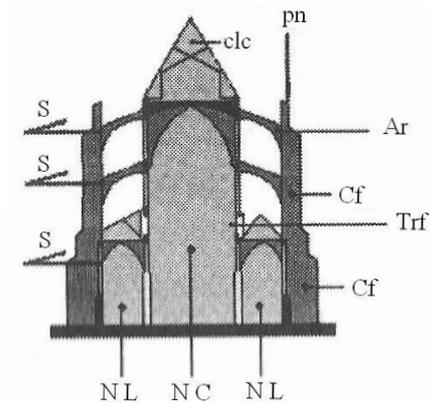
- volta a crociera costolonata → convogliare i carichi ai 4 vertici della campata e assolvere i muri da oneri strutturali;
- pilastro composto polistilo → trasmettere gli sforzi al terreno tramite le colonnine (prolungamenti delle nervature della volta);
- arco rampante → contrastare la spinta della copertura e trasmetterla ridotta e verticalizzata al contrafforte;
- contrafforte → aumentare le dimensioni del piedritto per garantirne la stabilità.

Si possono osservare le caratteristiche appena descritte nella figura 10.10, che riporta il confronto tra le sezioni tipiche di una chiesa romanica ed una gotica, essendo:

NL: la navata laterale; NC: la navata centrale; S: la spinta; Tr: la tribuna; Cf: il contrafforte (nella chiesa romanica è riportato ma non era sempre presente); Trf: il triforio; Ar: l'arco rampante; pn: il pinnacolo; clc: la carpenteria in legno del tetto.



Sezione di chiesa romanica



Sezione di chiesa gotica

Figura 10.10: confronto tra sezione di chiesa romanica e gotica (Sparacio, 1999)

Nella cattedrale gotica non rimaneva nulla del carattere massiccio e pesante della chiesa romanica, ma anzi la materia sembrava dissolversi, data l'assenza di muri perimetrali sostituiti da vetrate, la struttura portante messa in mostra nella sua essenzialità e la copertura che appariva sfidare le leggi della gravità. Inoltre, l'articolazione verticale della parete, con i pilastri a fascia simili a frecce puntate verso l'alto e le strette finestre inserite all'interno degli archi a sesto acuto, faceva apparire l'interno più alto di quello che era nella realtà. Entrando nelle "cattedrali

di Dio”, definite così da Le Corbusier, il semplice visitatore si sentiva esterrefatto per la loro altezza e luminosità, ma al contempo allibito e forse impaurito, temendo un improvviso crollo dell’edificio, che sembrava librarsi verso la patria celeste senza un adeguato sostegno terreno. Infatti, la realizzazione e la disposizione degli elementi costruttivi appena descritti era conforme ad un criterio di economia delle masse resistenti e perciò conferiva all’edificio un grande senso di leggerezza, ma garantiva nel contempo una sicurezza a livello statico pari, se non addirittura superiore, a quella dei massicci edifici precedenti.

10.2.4 Volte costolonate a crociera

Come si è già detto, lungo gli spigoli delle volte costolonate a crociera (o *crociere ogivali*), che nascono dall’intersezione di due volte a botte, si delineano degli elementi lineari emergenti con funzione portante, chiamate *costole* o *nervature*.

A tale proposito si può dire che:- Il sistema della volta quindi da *unico*, come era nell’epoca Romana e Bizantina e Latina, diventa agli effetti della stabilità *doppio*. Composto cioè da una parte che chiameremo *ingabbiamento* o *scheletro* dovuto alle nervature e quindi avente un vero ufficio statico costituendo essa la parte portante della volta. Poi da una serie di pannelli potendo considerarsi per la loro intima struttura come staccati dallo scheletro e soltanto appoggiati sulle nervature, dando luogo ad un sistema privo di ufficio statico principale e costituendo così la parte portata della volta-. (Milani, 1920)

Si nota una forte similitudine tra le coperture a volte costolonate di tali chiese e la struttura lignea delle barche, le cui *ordinate maestre* a vista sono state sicuramente un modello di riferimento per il progetto delle costole emergenti. In effetti, se si pensa alla forte assonanza tra i termini “nave” e “navata”, non si può non pensare all’esistenza di fitti rapporti e scambi culturali, tra costruttori edili e carpentieri navali.

Le navate delle chiese gotiche sono coperte da volte a crociera che, nate dall’intersezione tra la copertura in direzione longitudinale e quella trasversale, risultano tante quante sono le campate. Quindi, come si vede in figura 10.11, ogni campata è coperta da una volta a crociera, composta da:

- 4 vele (*voutains*);
- 2 nervature emergenti lungo le diagonali (*croisèes d'ogives*);
- 4 archi di bordo, di cui 2 longitudinali (*formerets*) che separano la campata dalle navate laterali e 2 trasversali (*doubleaux*), che dividono una campata dalle altre due in direzione est-ovest.

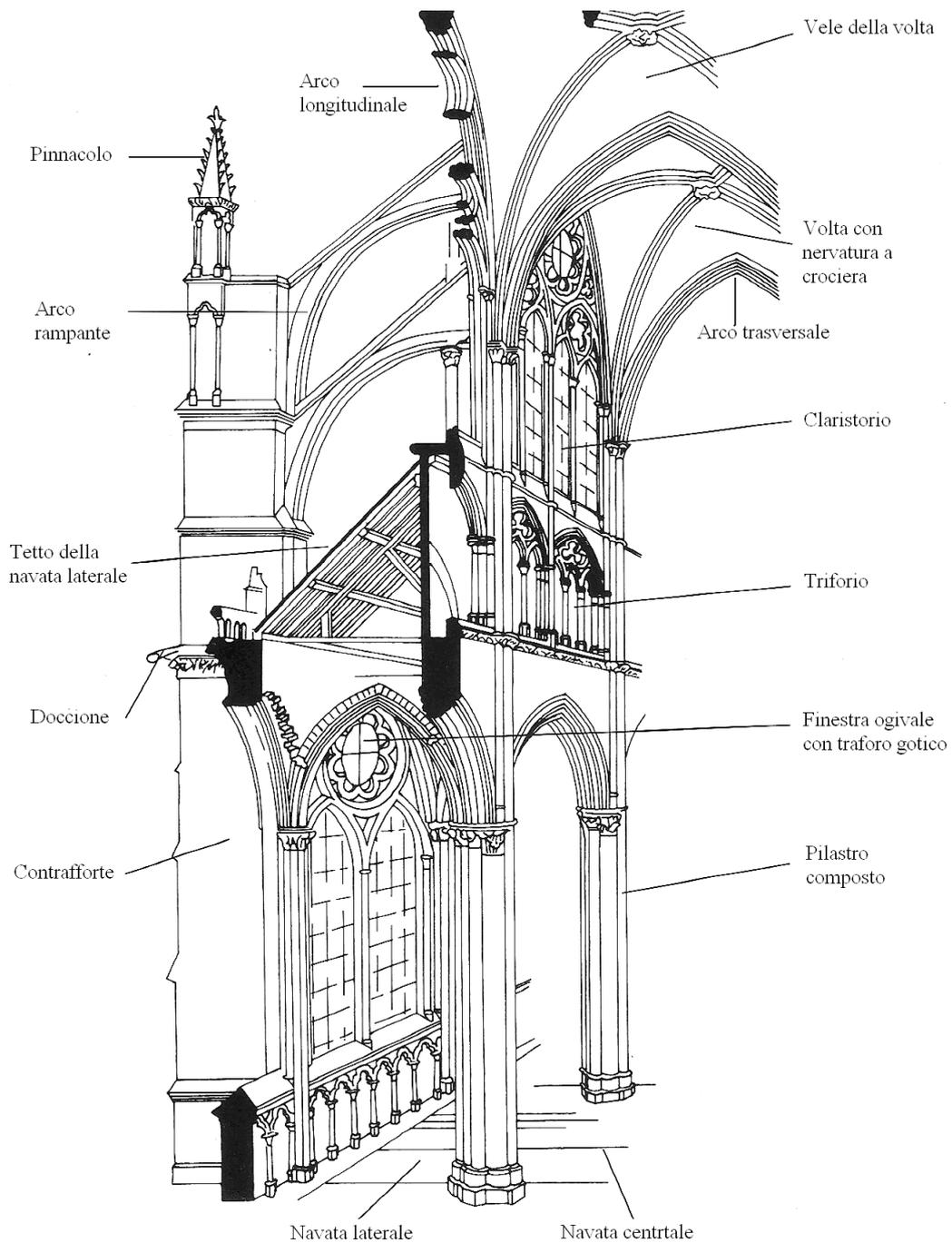


Figura 10.11: sezione della cattedrale di Amiens (Melhose, 1999)

Se oltre alle nervature diagonali, si ha una terza costola trasversale, cioè parallela agli archi *doubleaux*, la volta risulta divisa in 6 e non in 4 spicchi e per questo viene definita *esapartita*. In tal caso, sono necessari altri pilastri di sezione minore, che vengono alternati rispetto a quelli principali, con la funzione di appoggio per la nervatura aggiunta. Oltre a dimezzare la luce tra i pilastri, essi permettono alla volta di incurvarsi due volte per ogni lato, raddoppiando così il numero degli archi *formerets* e delle finestre del *claristorio*.

10.2.5 Morfologia dell'architettura gotica

L'edificio da sempre considerato il modello dell'architettura gotica è la cattedrale, chiesa in cui ha sede la cattedra del vescovo e un tempo luogo destinato all'incoronazione e alla sepoltura dei re di Francia. I documenti medievali dimostrano, come già precedentemente affermato, che la sua onerosa costruzione veniva sostenuta anche dai singoli cittadini che la consideravano, oltre che una forma di esaltazione del potere regio, anche una concreta testimonianza della loro fede e un motivo di vanto per la propria città.

Dal punto di vista strutturale, la cattedrale gotica si può annoverare come il primo edificio nella storia dell'edilizia in cui la struttura, intesa come l'insieme di elementi volti a trasferire i carichi al terreno, è mostrata nelle sue trame, ben visibile anche all'osservatore non ferrato in materia, e volutamente separata dalle parti della costruzione con soli fini di riempimento e di decorazione.

Al variare della planimetria, la cattedrale può essere di tre tipologie:

1. Basilica
2. Chiesa a sala (Hallenkirche)
3. Chiesa ad aula unica (Saalkirche)

1) BASILICA

Possiede una pianta a croce latina ed è articolata in almeno tre navate, che possono arrivare anche a sette, come nel caso della cattedrale di Anversa. Di esse, la navata centrale è la più alta e viene illuminata direttamente dal *claristorio*, ma può anche essere priva di aperture e in tal caso la struttura si definisce *pseudo-*

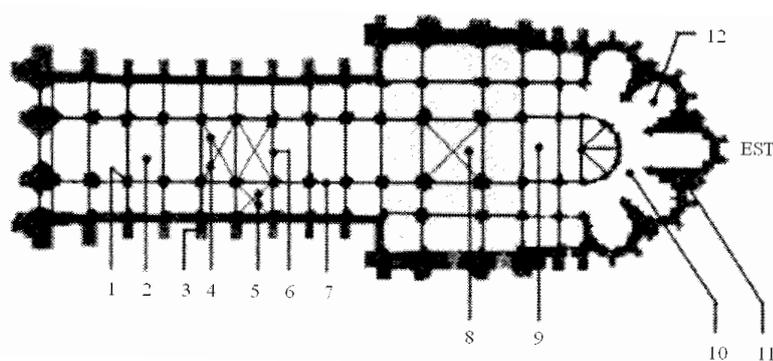
basilica. In alcuni rarissimi casi come quello di Magdeburgo, i contrafforti esterni possono non essere presenti.

Dalla tabella 10.1, si possono valutare le altezze, le larghezze o luci, e i rapporti tra queste due dimensioni della navata centrale, di alcune famose cattedrali gotiche. I primi due parametri sono notevolmente significativi per l'analisi strutturale, data la loro influenza rispettivamente sulla stabilità dell'edificio e sulla capacità portante delle volte, mentre il terzo è indicativo della verticalità della navata centrale.

Cattedrale	Altezza (h)	Luce (l)	h/l
Beauvais	46.00 m	15.00 m	3.067
Amiens	41.70 m	14.40 m	3.896
Reims	37.50 m	14.65 m	2.560
Bourges	37.00 m	14.00 m	2.640
Chartres	36.50 m	16.40 m	2.226
Parigi, Notre Dame	34.50 m	14.65 m	2.355
Saint Denis	29.00 m	11.75 m	2.468
Sens	24.40 m	15.25 m	1.600

Tabella 10.1: dimensioni cattedrale gotiche (Sparacio, 1999)

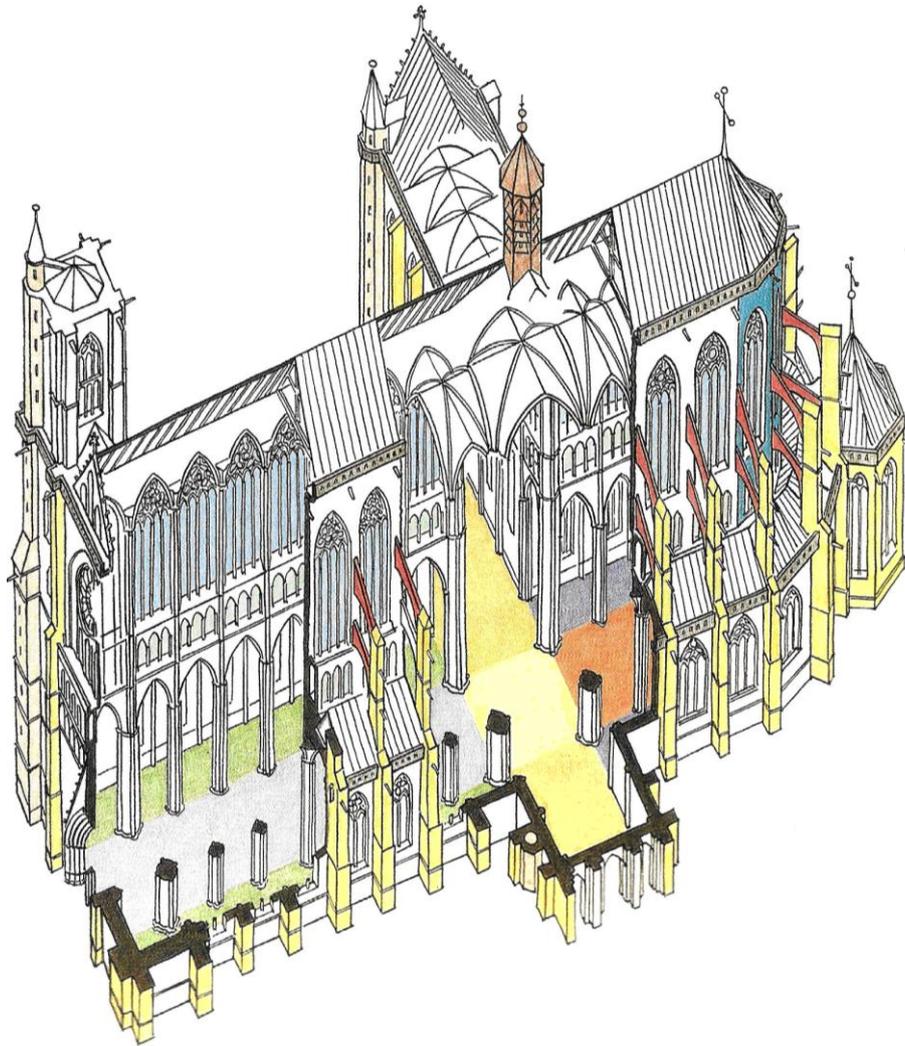
Si riporta la pianta di una basilica in figura 10.12, tipologia più comune di cattedrale gotica, caratterizzata da quegli elementi costruttivi che furono una costante dello stile.



- | | |
|---|---|
| 1.pilastro, | 7.arco longitudinale (<i>arc-formeret</i>), |
| 2.campata della navata centrale | 8.volta centrale a crociera o torre del |
| 3.contrafforte, | transetto, |
| 4.volta su nervatura a crociera su | 9.coro, |
| campata centrale, | 10. deambulatorio, |
| 5.volta su nervatura a crociera su | 11. abside, |
| campata laterale, | 12. cappella radiale, |
| 6.arco trasversale (<i>arc-doubleau</i>), | |

Figura 10.12: pianta tipo di cattedrale gotica (Sparacio, 1999)

Per maggiore chiarezza, si rappresenta anche un'assonometria dell'interno e dell'esterno della basilica (figura 10.13), nella quale si possono osservare gli elementi architettonici raffigurati in pianta ed inoltre quegli elementi, quali il *claristorio* e gli *archi rampanti*, caratterizzanti lo sviluppo verticale.

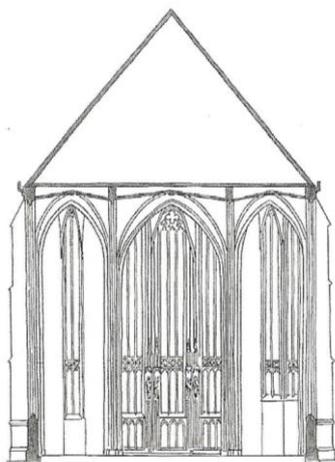


	Arco rampante		Navata principale
	Contrafforte		Navata laterale
	Claristorio		Coro
	Sezione		Deambulatorio
	Braccio del transetto		Torretta

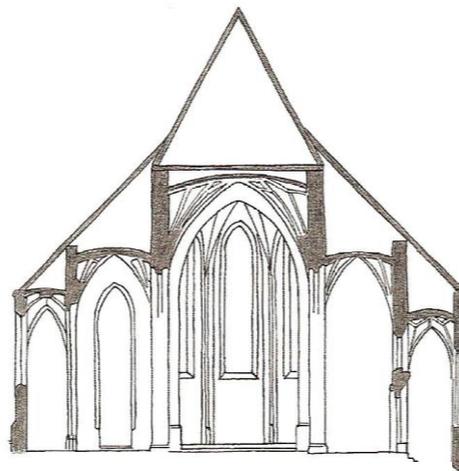
Figura 10.13: assonometria esterna-interna (Pablo de la Riestra, 1990)

2) HALLENKIRCHE

La chiesa a sala può possedere da due a cinque navate della medesima altezza, ma di solito ne ha tre delle quali, quella centrale riceve indirettamente la luce proveniente dalle finestre di quelle laterali. La costruzione, diffusa particolarmente in Germania, si configura come un unico grande spazio la cui struttura è sostenuta dal contatto reciproco tra le navate e rinforzata all'esterno da soli contrafforti, senza la necessità di archi rampanti. Nel caso in cui la navata centrale sia più alta delle altre, si parla di chiesa a sala a gradoni (Staffelhalle).



Sezione di Hallenkirche
(Chiesa a sala)



Sezione di Staffelhalle
(Chiesa a sala a gradoni)

Figura 10.14: sezioni di Hallenkirche e Staffelhalle (Pablo de la Riestra, 1990)

3) SAALKIRCHE

Si tratta di un edificio dotato di un unico ambiente, cioè non suddiviso in navate, dal quale si possono distinguere solamente il coro e la sacrestia.

Aula unica	
Coro	
Sacrestia	

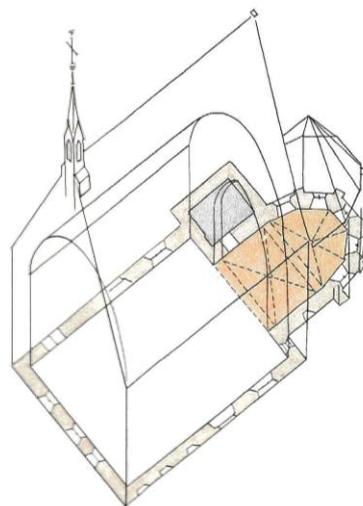


Figura 10.15: Saalkirche di Norimberga (Pablo de la Riestra, 1990)

10.2.6 I materiali

Tutte le soluzioni tecniche descritte furono adottate dai gotici, oltre che per esigenze strutturali e simboliche, anche per la scarsità di mano d'opera e la poca disponibilità di materiali.

Al fine di ottimizzare e razionalizzare la costruzione, la stessa scelta dei materiali era ponderata, data la consapevolezza dell'influenza delle caratteristiche meccaniche della pietra sulla risposta statica della costruzione. Al pari dei greci di Selinunte, anche i medievali selezionavano con cura le cave da dove estrarre le pietre che spesso erano scelte lontane dai cantieri, nonostante gli alti costi per il trasporto, come dimostrato dalle pietre arrivate dalla Normandia per erigere cattedrali in Inghilterra.

Per nervature e colonnine si adoperavano pietre tagliate dai blocchi rocciosi più resistenti, poiché in tali elementi si andavano a concentrare gli sforzi maggiori, mentre per le vele delle volte si sceglievano pietre di caratteristiche più scadenti. Già i romani sapevano che, accostando materiali con proprietà meccaniche diverse, predeterminavano la distribuzione delle tensioni che si concentravano sulle parti più forti, alleggerendo quelle meno; in altre parole, gli elementi più rigidi attiravano su di sé una porzione di carico maggiore.

Oggi si sa che ciò è vero se lo stato di deformazione è *congruente*, cioè il contatto tra gli elementi risulta continuo, senza scorrimenti, distacchi e sovrapposizioni, come dimostrato rigorosamente dalla meccanica del continuo deformabile, grazie alla legge di Hook (1635-1703).

Lo scheletro portante costituito dalle nervature comportava un notevole vantaggio durante la posa in opera, poiché permetteva una riduzione della quantità delle centine lignee; infatti, esse venivano poste a sostegno solo delle costole della copertura e non anche delle vele, che si potevano appoggiare alle nervature della volta realizzate per prime. Questo garantiva ai costruttori una notevole semplificazione dei lavori, data la scarsità di legname in quella epoca di deforestazione e le proibitive altezze alle quali dovevano essere realizzate le centine per le coperture. A tale proposito, bisogna ricordare che i materiali

venivano sollevati grazie a grandi pulegge rotanti, spinte da almeno tre uomini, che salivano continuamente su gradini posti nella loro parete interna.

Una così grande difficoltà nel sollevare il materiale da costruzione, implicava la

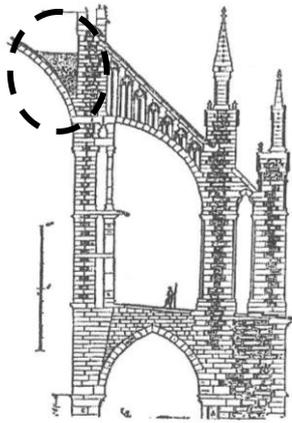


Figura 10.16: rinfiango gotico (Viollet-le-Duc, 1854)

presenza di forti motivazioni alla base della scelta progettuale di innalzare tonnellate di peso per realizzare i riempimenti spesso presenti sulle reni delle volte (evidenziato con il cerchio tratteggiato in figura 10.16); ottenuti con materiale che veniva murato con calcine di scarsa qualità o apparecchiato a secco, questi riempimenti erano disposti lungo tutta la navata centrale e superavano i due terzi della freccia dell'arco all'estradosso. Secondo Salvatore Di Pasquale, i notevoli costi aggiuntivi dovuti al sollevamento di tanto materiale non erano da imputare al caso, così

come non lo era la scelta dell'altezza del rinfiango, che si sapeva non dovesse superare un determinato limite, e ne diede una motivazione strutturale, basata sulla conoscenza degli effetti che i tecnici acquistavano in cantiere. I medievali erano consapevoli che il momento più importante fosse quello del disarmo, quando la struttura muraria, privata dei sostegni provvisori, era affidata a sé stessa e di conseguenza allentavano molto lentamente le zeppe di appoggio della centina, per evitare crolli repentini e per verificare la capacità di autoportarsi della copertura. Infatti, un piccolissimo abbassamento della centina era sufficiente per capire se la struttura fosse stabile o se il peso dei conci la trasformasse in un meccanismo, con la formazione di cerniere plastiche.

Nel caso dell'arco, il meccanismo comportava un abbassamento della chiave e un sollevamento delle reni dell'arco, presentando 5 cerniere, di cui: 2 all'estradosso delle imposte, 2 all'intradosso delle sezioni a 45° e l'ultima estradosale in chiave, come si vede dalla figura 10.7

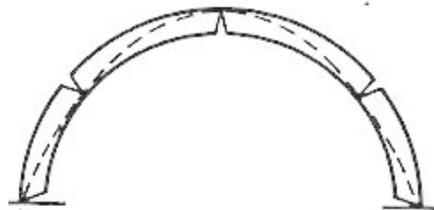


Figura 10.17: meccanismo di collasso a 5 cerniere

Siccome all'abbassamento della chiave non vi era rimedio praticabile, si pensò di contrastare il lavoro positivo compiuto da carichi su tale porzione di arco che scendeva, con del peso applicato sulle parti che si sollevavano, insaccando del materiale tra i muri laterali e la volta, secondo il basilare principio della leva. In altre parole:- [...] poiché tutta la parte dell'arco che va dalle imposte alle reni tende a sollevarsi e poiché ciò accade contemporaneamente all'abbassamento della parte centrale, se si blocca o si limita uno dei due movimenti si blocca o si limita anche l'altro; si può tentare di contrastare il movimento complessivo aggiungendo dei sovraccarichi là dove essi verrebbero ad essere rialzati, vale a dire proprio tra le imposte e le reni dell'arco: è un ragionamento molto semplice, fondato sull'esperienza della stadera, la leva semplice che qualsiasi operatore di cantiere conosce per l'uso continuo che ne fa-. (Di Pasquale, 2003)

10.2.7 I tre organi strutturali

Secondo Giovanni Battista Milani, con il sistema gotico, la struttura resistente dell'ossatura basilicale a volta ha subito una evoluzione passando da continua, come era nelle costruzioni romane, a discontinua. Infatti, nelle chiese gotiche, l'ufficio statico è compiuto da tre organi distinti che hanno consentito di organizzare più liberamente la pianta dell'edificio, sgombrando l'interno di quelle masse murali che ostacolavano la libera visuale. Essi sono:

1. *il piliere gotico* (parte interna del piedritto), che è sollecitato da azioni verticali e per questa ragione Milani lo definisce organo di sostegno; non dovendo sostenere alcuna spinta, la sua sezione può essere notevolmente diminuita;
2. *il contrafforte*, su cui si scarica la spinta esercitata dalle volte delle navate e perciò lo chiama organo di appoggio;
3. *l'arco rampante*, che trasmette l'azione spingente dalle volte al contrafforte, assolvendo così l'organo di sostegno da azioni diverse da quelle verticali e, per tale motivo, lo indica come l'organo di trasmissione delle spinte.

Si riporta una tavola dello studioso (figura 10.18), in cui destano notevole attenzione i disegni di un tipo particolare di centina a curvatura variabile usata dai costruttori di volte (E), ma soprattutto i tre esempi di raccordo tra piliere e nervature della volta a crociera (A,B e C).

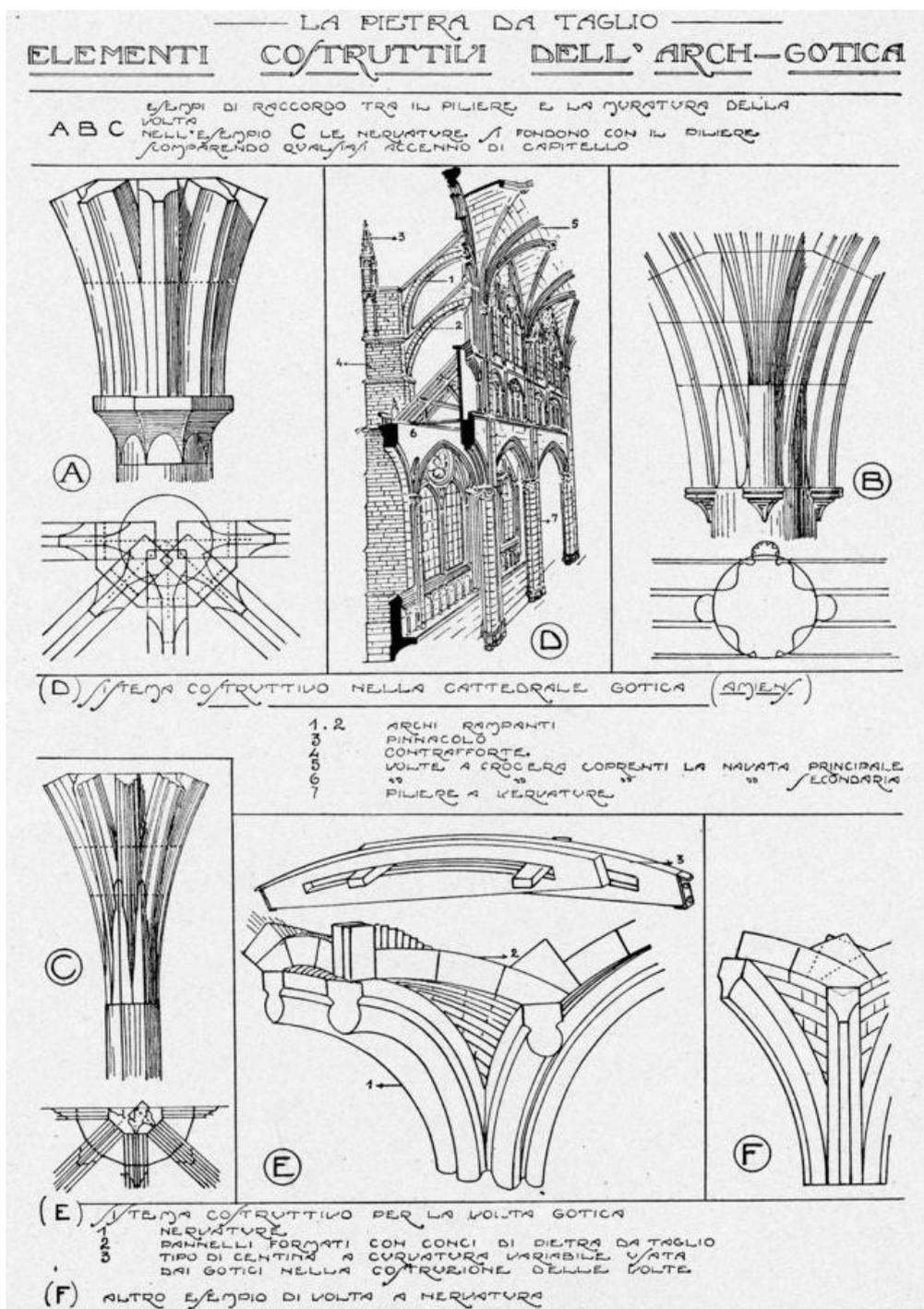


Figura 10.18:elementi costruttivi del gotico (tav.19, parte III, Milani,1920)

10.2.8 Ricostruzione di Saint-Denis

Il già citato abate Suger, primo ministro di Luigi VI e poi di Luigi VII, contribuì a fondare, dal punto di vista politico, la monarchia assoluta che sarebbe culminata con Luigi XIV e, dal punto di vista architettonico, lo stile gotico con la ricostruzione dell'abbazia di Saint Denis.

Egli incarnava il saldo legame tra la tradizione ecclesiastica e la il potere regale francese, fondato sulla convinzione che il re fosse il rappresentante terreno, divinamente legittimato, del piano di salvezza divino. La reciproca intesa tra potere spirituale e temporale veniva dimostrata dall'abbazia che, oltre ad essere il luogo di sepoltura di Santi, era anche il mausoleo dei re francesi e merovingi.

Secondo la sua opinione, la chiesa carolingia di Saint-Denis, risalente al VII secolo, necessitava di un restauro, dato lo stato rovinoso in cui versava, e di un allargamento, dati i tanti pellegrini che la affollavano per adorare le reliquie del patrono di Francia, San Dionigi.

Gli interventi di restauro auspicati e diretti dallo stesso Suger, riguardarono la testata occidentale e la zona absidale e si svolsero all'inizio del XII secolo. Il corpo longitudinale fu progettato, ma venne edificato solo nel XIII secolo, secondo forme gotiche.

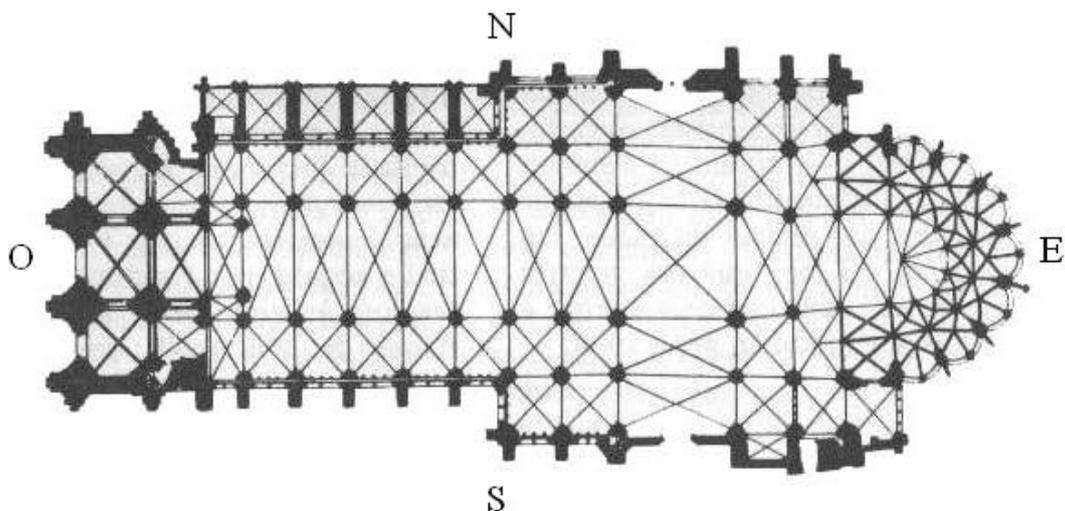


Figura 10.19: pianta di Saint-Denis

10.2.8.1 Il narcece

Come si vede dalla pianta di figura 10.19, il corpo occidentale fu eretto su una superficie con larghezza di tre campate e profondità di due e venne dotato di una facciata che divenne poi una costante nello stile: una coppia di torri con al centro un rosone. Come si può notare confrontando le figure 10.20 e 10.21, attualmente

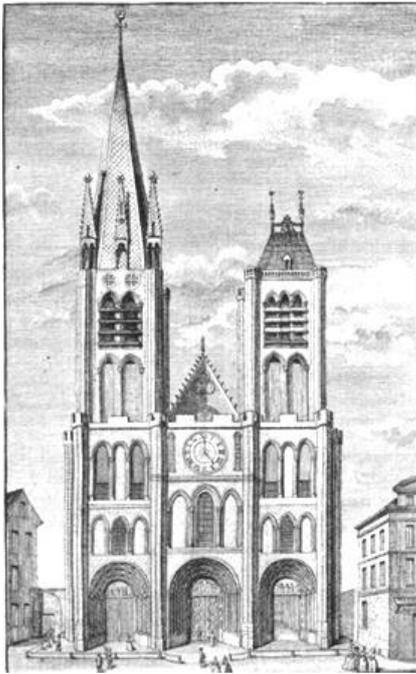


Figura 10.20: disegno dell'originale facciata di Saint-Denis

la torre settentrionale non è più presente poiché demolita tra il XVIII e il XIX secolo, dopo un restauro fallito. Dall'immagine 10.19, si osserva che all'interno del narcece la funzione portante è svolta dai pilastri fascicolati e dalle costole delle volte, mentre all'esterno i 4 robusti contrafforti frontali (ce ne sono anche e 4 laterali) aiutano ad assorbire le spinte della copertura e movimentano la facciata, riccamente ornata nella sua parte inferiore con una merlatura. Tale decorazione che circonda i tre ampi portali è come un *drappeggio*, intagliato in profondità nella pietra, con simboli e figure del Vecchio Testamento.



Figura 10.21: attuale facciata di Saint-Denis

10.2.8.2 Il coro

La costruzione del nartece iniziò nel 1130 e prima del suo completamento, l'abate Suger pensò alla costruzione di un nuovo coro che realizzò poi tra il 1140 e il 1144, le cui alte parti alte rischiarono di crollare nel 1231 e per questo furono sostituite.

Lo stretto ambiente del vecchio coro venne ampliato e valorizzato quale elemento centrale del culto, fondendolo con le nicchie delle cappelle laterali. Grazie alla collaborazione del suo ignoto architetto, Suger sostituì le pesanti pareti divisorie delle precedente chiesa con sottili colonnine, in modo da consentire alla luce di fluire liberamente all'interno dalle grandi finestre, che arrivano quasi a toccare il pavimento.

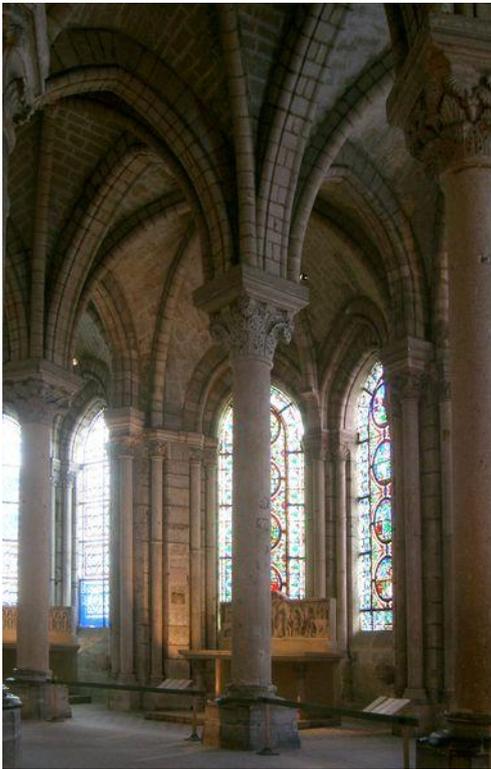


Figura 10.22: porzione del coro

Egli stesso scrisse nel proprio diario:- [...] successione circolare di cappelle radiali, in virtù della quale l'intera chiesa risplende di una luce meravigliosa e continua che entra dalle finestre luminosissime, pervadendo l'interna bellezza-. (Suger, XII secolo)

Realizzò un doppio deambulatorio le cui due navate erano separate da colonne monolitiche, fatte arrivare appositamente da Roma e poste a sostegno della leggiadra volta a costoloni.

Dal punto di vista dei materiali usati, Suger ha raccontato l'affannosa ricerca, nei boschi dei dintorni parigini, di tronchi adatti per le centine con cui realizzare la

copertura. Una volta trovati i dodici alberi tanto desiderati, ha raccontato che :- Li facemmo trasportare con gioia nella santa basilica e sistemare sulla copertura della nuova fabbrica, a lode e gloria del Signore Gesù che se li era riservati, e dei suoi Martiri, che li avevano voluti salvaguardare dai ladri-. (Suger, XII secolo)

Da ricordare che a Saint-Denis, i costoloni svolsero per la prima volta nella storia una effettiva funzione portante e come tali, vennero costruiti prima rispetto alle vele, intese unicamente come superfici di riempimento. Le forme architettoniche presenti nel deambulatorio quali, l'arco a sesto acuto, le volte a costoloni e le cappelle radiali intorno all'abside, divennero tipiche del gotico, ma prese singolarmente si ritrovano anche in costruzioni precedenti. L'importanza di questa basilica, annoverata come il prototipo di cattedrale gotica, fu il modo con cui tali elementi sono stati sistematicamente combinati, per conferire alla costruzione una maggiore luminosità ed una inaudita leggerezza.

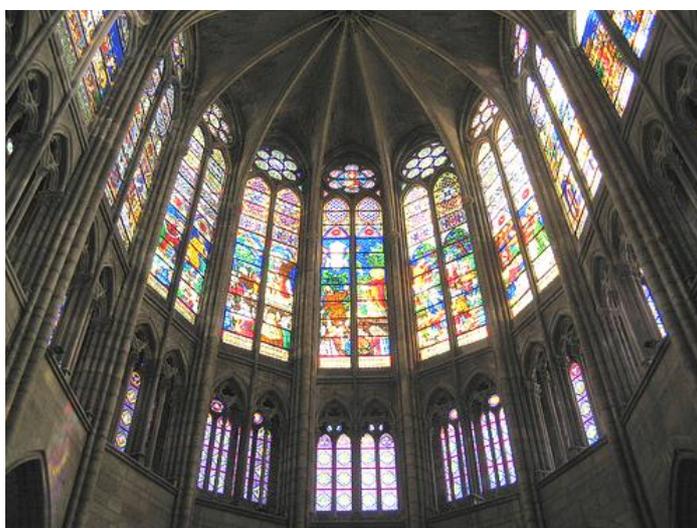


Figura 10.23:vetrate del capocroce

Il capocroce di Saint-Denis costituì un importante modello di riferimento anche per le vetrate colorate: oggetto di contemplazione e contemporaneamente fonte di una misteriosa luce, quasi ultraterrena. Svolgevano anche una funzione analoga a quella degli affreschi nelle chiese romaniche, erano cioè *Bibliae pauperum*, narranti le vicende delle Sacre Scritture. Le vetrate riflettevano la diffusa concezione di Dio come “Luce trascendente”, derivante dalle opere di Giovanni Scoto, e la volontà dei medievali di interpretare tutto in chiave religiosa, compreso l'architettura. A conferma di tale visione, per l'abate Suger, gli stessi elementi costruttivi avevano una valenza cattolica: Gesù era la chiave di volta che permetteva il collegamento di un muro con l'altro, mentre le colonne erano gli apostoli e i profeti, posti a sostegno del cristianesimo.

11. LA CUPOLA DOPPIA DEL RINASCIMENTO

11.1 La rinascita

Il termine Rinascimento indica il periodo, compreso tra il XV e gli inizi del XVI secolo, in cui si ebbe una fioritura della cultura fondata su di rinnovato interesse per la classicità, in contrapposizione con la produzione artistica medioevale, giudicata allora come disarmonica e sgraziata. Si può definire come un fenomeno culturale italiano che investì tutte le arti tra cui l'architettura, i cui germi si erano già potuti intravedere nelle costruzioni medievali del Bel Paese, dotate di un senso di armonia e proporzione lontano dagli eccessi del gotico tipico del Nord Europa. Tanto è vero che, nonostante la datazione, quell'architettura italiana, con il suo articolarsi di linee orizzontali più che verticali e i suoi palazzi municipali dalle forme armoniose, viene definita appartenente al cosiddetto *protorinascimento*.

Dal punto di vista politico-sociale, nelle ricche città-stato i detentori del potere non erano più né il clero né la nobiltà, ma la nuova borghesia formata da commercianti, artigiani e bancari dotati di virtù concrete: l'operosità, la parsimonia, il saper fare. La nuova classe di funzionari laici si dedicò agli studi classici ed umanistici, meritevoli della dignità dell'uomo e fautori del passaggio dalla visione teocentrica medioevale, in cui l'uomo poteva e doveva aspirare solamente al veloce superamento della misera vita terrena, a quella moderna, in cui l'uomo, fatto ad immagine di Dio, era capace di rendere il mondo razionalmente ordinato e bello. Il sapere cessava quindi di essere subordinato alla fede e diveniva un prodotto della ragione, spesso basato sull'osservazione dell'armonia presente in natura.

Nel periodo in questione, ci fu la sistematica diffusione dei dieci libri del "De Architettura", scritti dall'ingegnere-architetto romano Vitruvio nel 25 a.C., e tramandati con continuità negli anni medioevali. Tale trattato divenne il manuale ufficiale sull'arte del costruire nell'antichità e, fornendo anche una dettagliata descrizione della professione dell'architetto, contribuì alla formazione della nuova concezione del saper costruire, come una vera e propria arte.

Il rinnovamento del modo di costruire rinascimentale si basò sulla ripresa del linguaggio architettonico proprio del mondo greco-romano. In particolare, dall'antichità vennero ripresi molti elementi costruttivi, anche se rielaborati con varianti innovative, che vengono riportati nel seguente elenco, suddivisi nei due sistemi strutturali maggiormente adottati nel periodo:

1. Lo schema trilitico, cioè non spingente:

- trabeazione con architravi, metope e triglifi;
- colonne e capitelli, secondo gli ordini antichi (dorico, ionico, corinzio, tuscanico e composito);
- lesene e paraste.

2. Lo schema arcuato, cioè spingente:

- arco a tutto sesto, invece che arco a sesto acuto;
- volta a botte o a vela, invece che volta a crociera;
- volte a lacunari.

Per quanto attiene la decorazione degli edifici, anche se tale argomento esula dai fini dello studio che si sta conducendo, vale la pena ribadire che i rinascimentali preferirono di gran lunga il senso del ritmo e della proporzione al proliferare, spesso incontrollato e disarmonico, degli ornamenti gotici.

Durante il periodo medievale, la costruzione basilicale a cupola rimase conforme alle proprie origini latine, mentre la costruzione ogivale con volte a crociera, che prendeva spunto dagli impianti termali romani, fu dotata di una carattere tipicamente nordico, divenendo il sistema costruttivo per eccellenza in Francia, Germania ed Inghilterra. Secondo l'opinione di Milani, il sistema statico della cupola murale doppia, tanto diffusa nel Rinascimento, si raccordava direttamente a quello delle ossature basilicali a cupola italiane, il cui senso strutturale perdurò durante gli anni medievali, attraverso esempi quali: San Vitale a Ravenna, San Giovanni in Fonte (il Battistero) a Firenze e il Battistero di Cremona. Pertanto, questa chiara origine permette di escludere una totale ed unica derivazione delle cupole rinascimentali, che dal 1450 al 1750 sorsero in Italia e in Europa, dalle strutture romaniche e gotiche del Medioevo.

11.1.1 La cupola di Santa Maria del Fiore

La prima fra tutte le cupole rinascimentali è quella di Santa Maria del Fiore a Firenze, la più grande mai costruita senza l'impiego di centine a sostegno della muratura. Progettata da Brunelleschi, venne costruita tra il 1420 e il 1436, per coprire l'intersezione ottagonale tra le navate e le tribune absidali della chiesa, iniziata da Arnolfo di Cambio nel 1296.



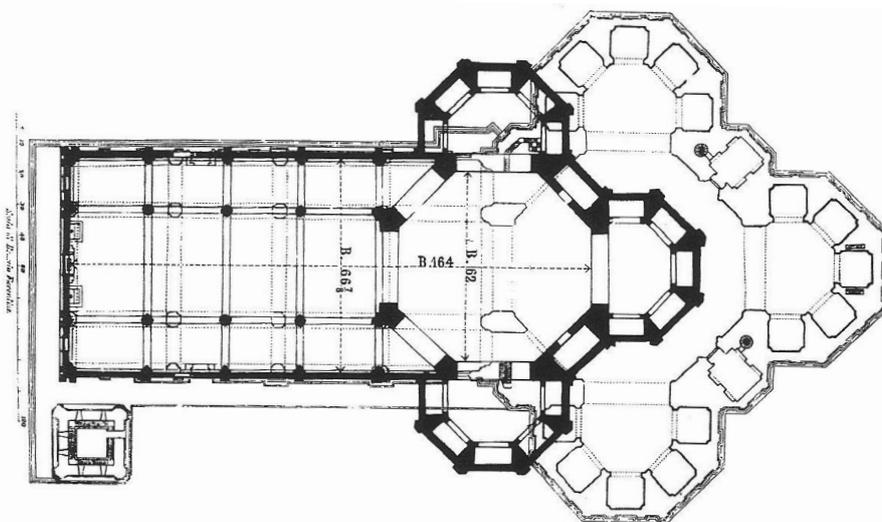
Figura 11.1: Vista del Duomo, XIV-XV secolo, e del Battistero, V-VI secolo, Firenze

11.1.1.1 Il modello

Nello studio che si sta conducendo, si passa dall'analisi della cupola di Santa Sofia a quella di Santa Maria del Fiore, compiendo un salto nel tempo di 900 anni. In questo lasso temporale, quasi millenario, sono state costruite altre cupole, come quella di San Marco a Venezia nel X secolo, dei duomi di Pisa e di Siena e dei battisteri di Pisa, Cremona e Parma tra il XII e il XIII secolo, ma di esse, non vale la pena effettuare uno studio approfondito dal punto di vista strutturale, poiché non presentano alcuna innovazione rispetto la copertura realizzata a Costantinopoli nel VI secolo.

L'unica cupola che si può annoverare come modello a cui si ispirò Brunelleschi è quella che aveva sempre sotto gli occhi, cioè quella del Battistero di Firenze. Anche essa, copre uno spazio a pianta ottagonale con una volta a padiglione, conclusa con un occhio su cui è posta la lanterna, che lascia filtrare la luce all'interno; nonostante risalga al V secolo, presenta il germe di quella struttura a due manti, uniti da costole trasversali, che sarà tipica delle cupole doppie rinascimentali. Infatti, è caratterizzata da una cupola interna e una copertura lapidea piramidale, collegate tra loro da un sistema di costole verticali e archi anelli disposti lungo i paralleli, con una tecnica romana un tempo utilizzata per realizzare le ossature di sostegno della cavea negli anfiteatri, che non venne però ripresa dal Brunelleschi,

11.1.1.2 Il problema



*Figura 11.2: Vecchia chiesa di Santa Reparata e ampliamento del Talenti
(ricostruzione Boito-Guasti)*

Dopo aver iniziato personalmente la costruzione delle fiancate e della facciata della chiesa, nel 1302 Arnolfo morì e il completamento della “maggior chiesa fiorentina” fu protratto per molti anni, con interventi di altri architetti, tra i quali Giotto e Francesco Talenti (figura 11.2). Finalmente consacrata nel 1436, la cattedrale di Firenze rispecchiava il progetto arnolfiano, essendo una basilica a tre

navate, con la copertura realizzata da volte a crociera su pilastri cruciformi e tre absidi poligonali, disposte a trifoglio, in luogo del classico transetto.

E' certo che già il primo progettista avesse previsto la cupola, che avrebbe portato ad una sintesi perfetta le tre navate con le tre absidi, con un diametro pari a quello del corpo longitudinale. Ciò è dimostrato dall'affresco del Bonaiuti, riportato in figura 11.3, risalente al 1355 e situato nel Cappellone degli Spagnoli in Santa Maria Novella, grazie al quale si può asserire che Arnolfo aveva pensato ad una cupola dalle forme simili a quella del Brunelleschi, che all'epoca del dipinto ancora non era neanche nato. Quella rappresentata a coronamento del Duomo di Firenze si distingueva da quella che poi venne effettivamente realizzata, per l'assenza del tamburo, che infatti risale agli inizi del Quattrocento, e per la presenza dei "gattoni", al posto dei costoloni.

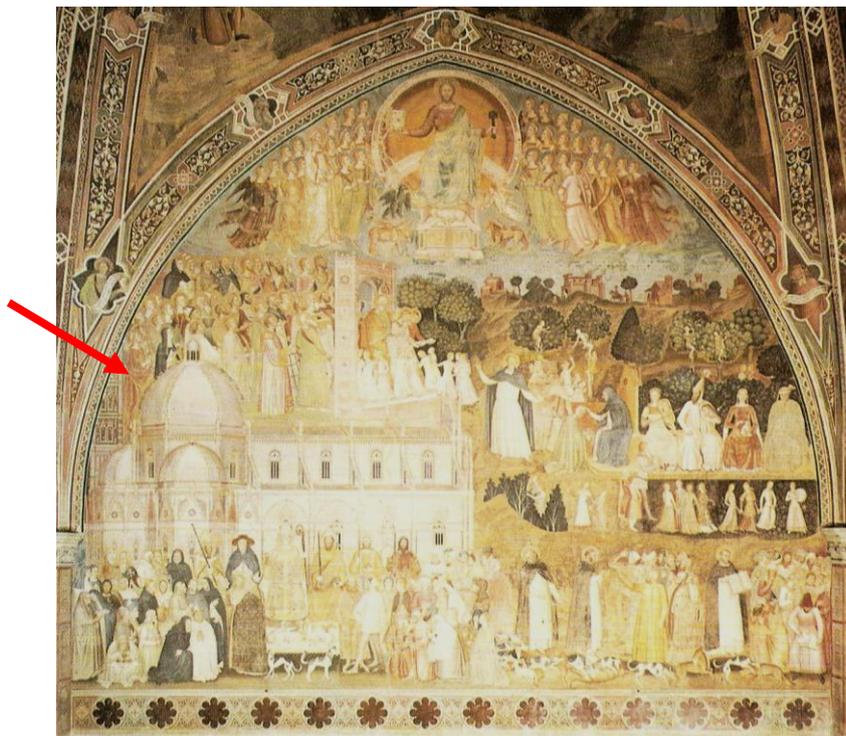


Figura 11.3: "La chiesa militante", in Santa Maria Novella, 1355 (Adorno, 1986)

Si può quindi concludere che dal 1302, anno della morte di Arnolfo, fino al 1418, anno del primo concorso per l'erezione della cupola, nessuno fosse riuscito a realizzare la copertura prevista e si può collegare tale periodo di silenzio nella tecnica e nell'arte del costruire, anche alla peste che nel 1348 decimò le città toscane, privandole di coloro che erano definiti "ingegneri".

Superato questo momento di decadenza tecnica, tra 1410 e il 1413 venne realizzato il tamburo ottagonale, con muri sottili in pietra da taglio, raggiungendo un'altezza di 55 metri dal pavimento. Seguirono poi anni angosciosi, durante i quali i tribolati operai fiorentini tentarono inutilmente di trovare una soluzione progettuale per riuscire a completare l'edificio, consapevoli della funzione di contenimento che avrebbe esercitato il sistema di contraffortamento costituito dagli speroni, dalle cappelle e dalle sacrestie radiali, in parte ancora da completare. Infatti, lo spazio ottagonale da coprire era dotato di una larghezza di 45 metri e la volta era da impostare sul tamburo che costringeva a lavorare a più di 50 metri da terra. Essi pensavano all'utilizzo delle tradizionali armature per sostenere la cupola fino alla sua chiusura con la chiave di volta, ma data una così ampia luce e una tale altezza, ciò era infattibile: dove appoggiare le centine lignee? Come costruirle tanto grandi? Dove trovare tanto legname?

11.1.1.3 La soluzione

Filippo Brunelleschi (1377-1446) partecipò con il proprio modello in muratura ai due concorsi per la costruzione della cupola, indetti dall'Opera della Cattedrale, nel 1418 e poi nel 1420. Nell'ultima gara d'appalto, la geniale proposta che presentò vinse e gli venne così affidata la progettazione esecutiva, oltre che la direzione dei lavori della cupola, con il vincolo di rispettare il progetto originario che prevedeva una cupola a sesto acuto su base ottagonale.

In realtà, i documenti attestano che vincitore del concorso al pari di Brunelleschi fu anche Lorenzo Ghiberti che diede il proprio contributo al progetto ma, dopo un diverbio, venne estromesso dai lavori nel 1425.

Brunelleschi tentò inutilmente di convincere i membri della commissione giudicante a favore di una cupola a tutto sesto, impostata su una base circolare, persuadendoli circa le complicazioni che sarebbero insorte nella costruzione di una cupola ottagonale, invece che rotonda. Nonostante non sapesse nulla dell'ancora inesistente scienza delle costruzioni, la sua grande sensibilità statica gli permise di intuire il funzionamento dei gusci di rivoluzione, in cui la simmetria radiale garantiva una distribuzione uniforme delle sollecitazioni. Inoltre, dopo l'insuccesso nella gara per la porta del Battistero fiorentino, battuto da Ghiberti

stesso, Brunelleschi si recò a Roma, assieme a Donatello, per osservare l'architettura ed indagare i principi costruttivi degli antichi edifici romani; tra i quali suscitò in lui grande attenzione il Pantheon, un guscio sferico che, in quanto tale, poteva autosostenersi durante la costruzione. Il problema era che quella di Firenze non poteva definirsi una cupola di rotazione come il Pantheon, ma data la pianta ottagonale doveva essere una volta cupoliforme. Abbandonata l'iniziale ipotesi di profilo semicircolare, scelse abilmente di conferire alla cupola un profilo a sesto acuto, che produceva una minor spinta laterale rispetto ad uno a tutto sesto.

La genialità della soluzione di Brunelleschi consisteva nel voler realizzare la cupola fiorentina senza l'uso di centine, come ricorda il suo biografo:- Tutti in una sentenza dicevano: come s'armerà? E ritornando sempre su quello: volgerassi senza armatura-. (Manetti, XV secolo)

Se oggi si guarda il Duomo, tutto sembra facile e scontato e non si pensa all'enorme difficoltà incontrata dagli uomini del tempo, in piedi sul piano di imposta della cupola ancora non realizzata, con lo spazio vuoto che si estendeva davanti ai loro occhi e senza le necessarie armature su cui poter appoggiare prima i loro piedi e poi le masse murarie della copertura. Solo Brunelleschi sapeva come risolvere il problema e lo aveva dimostrato, seppur a scala ridotta, con il modello murato, grazie al quale aveva conquistato il parere favorevole della commissione giudicante; in esso la costruzione era:- il risultato di una crescita per anelli successivi tali che, fatto il primo anello, risultassero scritte in modo indelebile sulle murature costituenti il primo anello costruito, le istruzioni per proseguire: circostanza che si sarebbe automaticamente verificata se fosse stata garantita la possibilità di utilizzare le stesse centine parziali usate per la costruzione del primo anello-. (Di Pasquale, 2002) Tale tecnica è sempre stata adottata per l'erezione di murature verticali o curve, dotate di un raggio esterno ed interno costante, come accade negli angoli della cupola fiorentina, e oggi si ritrova nella costruzione dei ponti in cemento armato precompresso, per conci a sbalzo.

Dato che il tamburo di imposta non garantiva un'eguale resistenza nei confronti della spinta della copertura, Brunelleschi cercò di ridurre al minimo il peso della cupola, a cui è proporzionale l'azione divaricante esercitata all'imposta, senza

perdere nulla in rigidezza. Inoltre, la riduzione del peso era finalizzata anche a non sovraccaricare in maniera eccessiva le esistenti murature inferiori e specialmente le fondazioni. La sua scelta fu quella di realizzare la copertura dallo spessore di oltre 4 metri, non come un unico elemento, ma come due calotte distinte, separate da un intercapedine di 110 centimetri, come era già stato fatto nella struttura del vicino Battistero. Le due cupole, parallele e coassiali, sono entrambe spingenti, ma quella esterna presenta un profilo maggiormente rialzato rispetto all'interna. Esse sono collegate da un sistema di ossature verticali ed orizzontali, che costituisce la maglia strutturale in cui sono incastrate le loro murature, costruite contemporaneamente e, a partire da una certa altezza, con la tecnica della *spinapesce*.

In particolare, le due calotte sono tra loro collegate e rinforzate da 24 costoloni (*speroni*), dei quali 16 sono interni alle vele e 8 sono quelli angolari che, più spessi della copertura, emergono e risultano visibili anche dall'esterno. Inoltre, per completare il collegamento, sulla calotta interna e sugli speroni sono stati impostati 9 anelli disposti in orizzontale, che hanno soprattutto il compito di portare la calotta esterna.

Tale volta a padiglione su pianta ottagonale, suddivisa pertanto in otto settori, è conclusa in sommità con una lanterna, che lascia filtrare la luce all'interno ed è ricoperta con grandi tegole piane, poste in opera su malta.

11.1.1.4 Il programma costruttivo

Secondo l'opinione di Salvatore Di Pasquale, il progetto con cui l'artista vinse l'ultimo concorso, pervenuto grazie al suo biografo Manetti, presenta un programma di lavoro che può essere suddiviso nel seguente modo:

- il I e il II comma trattano delle due cupole con la definizione delle loro funzioni;
- il III comma precisa la destinazione dell'ambiente interno;
- i commi IV e V riguardano le nervature verticali ed orizzontali;
- il VI e il VII comma trattano dei rinforzi per le nervature orizzontali;
- l'VIII comma definisce la composizione degli speroni;
- il IX comma riguarda il ballatoio di coronamento del tamburo;

- il X comma parla delle docce per la raccolta delle acque;
- l'XI comma tratta delle creste angolari;
- il XII, il XIII e il XIV sono inerenti alle tecniche costruttive e alle dimensioni degli elementi.

In sintesi, i tre commi iniziali descrivono le due cupole, attribuendo la funzione strutturale alla cupola interna, più spessa (2,5 metri alla base), e a quella esterna, spessa neanche 1 metro, la funzione sia formale per renderla “magnifica e gonfiante”, sia tecnologica di protezione dalle infiltrazioni di acqua piovana.

Dal quarto comma in poi si definiscono le ossature murarie costituenti un sistema di contrafforti per la cupola interna e uno di sostegno per quella sottile esterna, chiaramente riportate nella famosa assonometria del Sanpaolesi di figura 11.4.

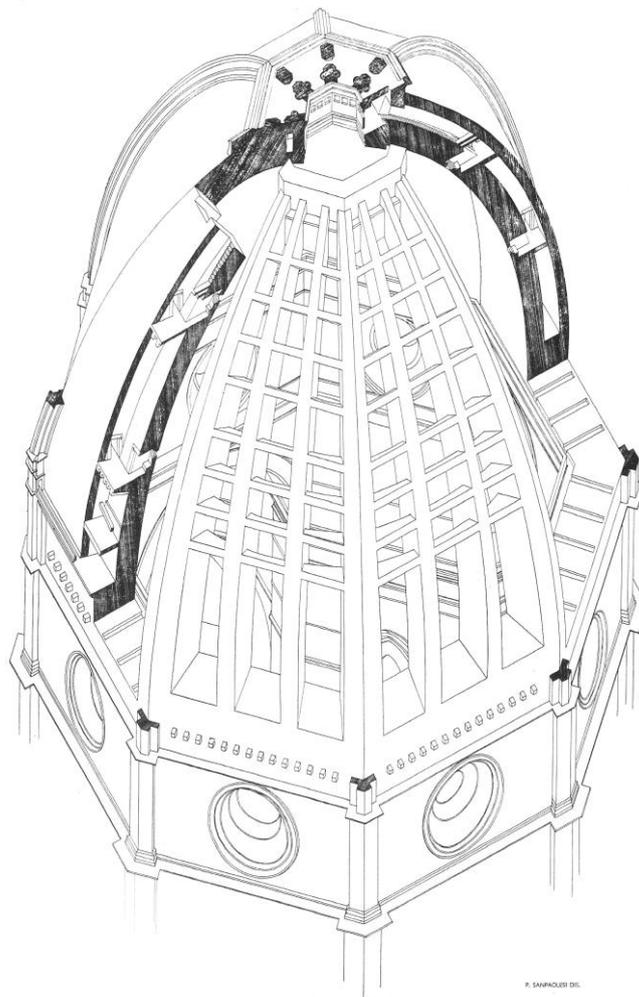


Figura 11.4: assonometria della cupola (Sanpaolesi)

Tali ossature sono distinte in:

- ✓ verticali, che sono gli speroni in muratura con la funzione di trasferire i carichi dall'alto in basso;
- ✓ orizzontali, che sono i cerchi in muratura, rinforzati da elementi lapidei o lignei per contrastare l'apertura delle fratture negli anelli orizzontali.

Infatti, fino alla fine del XVIII secolo, quando ancora la teoria dei gusci non era stata elaborata, non si pensava all'interazione esistente tra i due sistemi di nervature, quelli che sono stati poi definiti meridiani e paralleli.

A proposito degli *speroni*, ricordando che la misura del braccio fiorentino corrisponde a circa 58 centimetri, erano previsti 16 speroni di 4 braccia di spessore, 2 per ogni lato, e negli angoli dell'ottagono 8 speroni di spessore pari a "7 braccia"; questi ultimi erano evidenziati dalle creste di marmo bianco con uno spessore che decresceva in "maniera piramidale", a partire dai 4 metri all'imposta. Il collegamento trasversale tra gli *speroni* era realizzato con i *cerchi* che erano elementi a sezione variabile, con spessore decrescente con l'altezza.

Un ulteriore problema che si poneva era l'irregolarità della pianta in cui, tra il lato più corto e quello più lungo, vi era una differenza di ben 62 centimetri, ma i due ordini di nervature che costituivano lo scheletro resistente, a cui era affidato il compito di collegare le due cupole, permettevano di nascondere tale irregolarità tra un costolone e l'altro, senza emergere all'esterno.

Il quinto comma prevede la necessità di un solido ed unico anello di fondazione per la cupola, prima dalla sua suddivisione in due calotte; esso venne individuato nella parte superiore del tamburo appena realizzato, comune alle due cupole.

Entrambe le cupole erano costruite con mattoni murati su piani ad inclinazione variabile, che passava da quella nulla del piano di imposta orizzontale a quella di 60° in sommità, cioè dove l'anello di chiusura è mantenuto in posizione dal grande peso della lanterna soprastante. A questo proposito, l'ultimo comma contiene l'imposizione di non superare la quota di 30 braccia di altezza, senza utilizzare l'armatura di sostegno poiché, essendo gli speroni d'angolo a forma di arco di cerchio in quinto acuto, cioè una curva con un raggio pari a 4/5 del diametro di base, il raggio corrispondente a tale altezza forma con l'orizzontale l'angolo di 30°. Fino all'altezza appena definita, si poteva contare sull'attrito e

sulla presa sebbene lenta delle malte e quindi costruire la cupola senza bisogno di armature, ma al di sopra di tale livello, si doveva cambiare tecnica costruttiva a favore della spinapesce che trattava le murature precedentemente innalzate, come appoggio provvisorio per quelle da costruire. Infatti, era risaputo che la stabilità di mattoni murati su letti con una inclinazione maggiore o uguale a quella sopraccitata, non poteva essere garantita unicamente grazie all'attrito o alla presa delle malte. Questa era una di quelle regole del buon costruire, derivata dall'esperienza in cantiere e parte del bagaglio culturale dei costruttori, mentre attualmente è una legge della tecnica delle costruzioni che consiglia di prendere appositi provvedimenti, per contrastare la naturale tendenza a scivolare verso il basso dei mattoni murati su piani con un'inclinazione maggiore di 30° rispetto all'orizzontale. L'unica differenza è che, per i tecnici moderni, il limite non è individuato da un'altezza, ma da un angolo ϕ , definito tramite il rapporto tra due lati.

Alla tessitura dei mattoni delle due cupole, si aggiunge quella dei ballatoi in pietra. I ballatoi sono dei corridoi orizzontali che collegano le vele, costruiti con lastre e blocchi lapidei, incastrati tra le due cupole, e posizionati all'incirca in corrispondenza degli angoli di 20° , 40° e 60° rispetto al piano orizzontale.

Sempre nel quinto comma si tratta dello strumento a tre corde usato per tracciare le linee guida dei letti dei mattoni, indicato con il termine di *gualandrino*.



Figura 11.5: foto della tessitura muraria al di sotto delle tegole di copertura (Di Pasquale, 2002)

Dalla fotografia 11.5, che rappresenta una porzione della cupola estradossale priva delle tegole di copertura, si nota come i letti di posa dei mattoni siano assimilabili a sezioni coniche, in contrasto con la radicata opinione secondo la quale la copertura era stata costruita come una volta a padiglione. Quello che è palesemente dimostrato dalle foto era stato già anticipato da Leon Battista Alberti, secondo cui la struttura era una cupola di rotazione dal punto di vista costruttivo, e dalla diffusa immagine del cerchio, correlata alla realizzazione delle membrature orizzontali. Infatti, se i letti di posa dei mattoni delle vele fossero stati rettilinei e paralleli al terreno, in corrispondenza dei costoloni angolari sarebbero nate delle discontinuità, che avrebbero aggravato una situazione staticamente già difficile per la presenza delle spinte a vuoto. La soluzione adottata da Brunelleschi fu quella di prevedere una inconsueta tessitura, a posteriori definita “a corda blanda”, in cui i mattoni sono disposti secondo superfici coniche. Nel caso di una cupola di rotazione, gli anelli orizzontali sarebbero stati dei perfetti archi di circonferenza, dotati della necessaria continuità materiale, ma nel proprio caso di cupola a padiglione ottagonale, costruita come cupola di rotazione, dovevano essere realizzati con la tecnica della corda blanda, cioè adottando delle linee di stesa curvilinee. Inoltre, egli aveva capito la naturale tendenza delle cupole ad aprirsi in prossimità della base e tentò di opporsi ad essa, con anelli in pietra di macigno, legati da grappe metalliche e catene in legno di quercia, rinforzate con ferri piatti (figura 11.6).

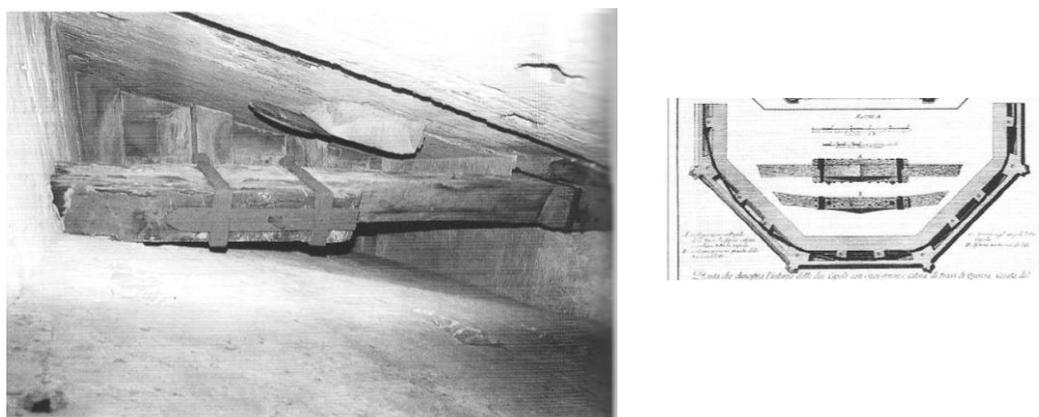


Figura 11.6: catene, nel rilievo e nei disegni di Nelli (Di Pasquale, 2002)

11.1.1.5 La spinapesce

La tessitura dei mattoni a spinapesce, riportata in figura 11.7, è stata ottenuta murando in posizione verticale un mattone, entro un determinato numero di mattoni posti in orizzontale, seguendo il profilo di un arco di cerchio, avente il centro sull'asse della cupola. Ovviamente, data la forma della copertura, il restringimento verso l'alto degli anelli in muratura, comporta la riduzione del numero e delle dimensioni dei mattoni posti in posizione naturale, cioè orizzontale.

Come le dita delle mani che si intrecciano tra loro, tale tecnica consentiva di realizzare quel collegamento indispensabile per assicurare l'innesto degli anelli ancora da costruire, su quelli precedentemente realizzati, evitando così lo scivolamento dei mattoni dell'ultimo strato, fino a che la malta non avesse preso.

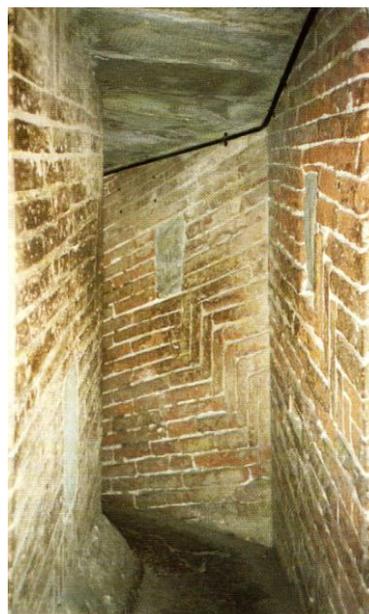


Figura 11.7: mattoni disposti a spinapesce (Adorno, 1986)

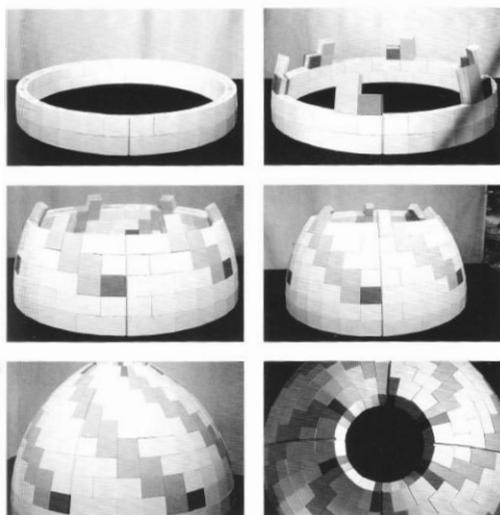


Figura 11.8: modello per la costruzione della cupola senza armature (Di Pasquale, 2002)

Per chiarire tale concetto costruttivo, ci si riferisce alla suggestiva sequenza di immagini in figura 11.8, proposta da Di Pasquale, che riproduce il modello per la costruzione di una cupola di rotazione, senza l'utilizzo di armature di sostegno. Partendo dall'anello di imposta del tamburo, si comincia a costruire la copertura per anelli successivi, ognuno dei quali dovrà necessariamente essere posizionato su di una superficie sempre più inclinata verso l'interno rispetto al precedente, mano a mano che la composizione sale. La costruzione viene realizzata con elementi quadrangolari, dotati di un certo spessore, orditi secondo la tecnica della spinapesce, riprodotta ad un livello

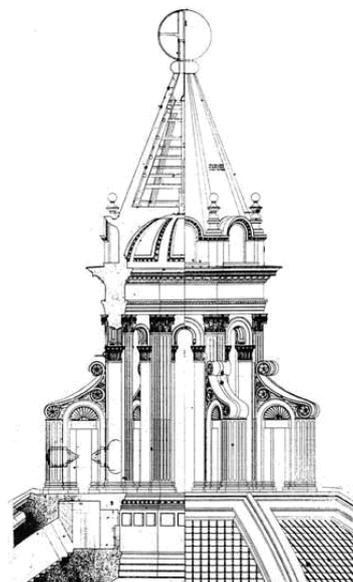
macroscopico. In effetti, da ogni anello si sporgono elementi posti in verticale, tra i quali vengono innestati saldamente i moduli posti in orizzontale dell'anello successivo, fino ad arrivare all'anello di chiusura, sul quale verrà poi collocato il cosiddetto *tappo di chiusura*.

11.1.1.6 La lanterna

La cupola venne conclusa 140 anni dopo l'inizio della cattedrale e 16 anni dopo il primo concorso; nonostante nel 1436 avvenisse la consacrazione del nuovo Duomo, ancora la costruzione non era terminata, mancavano infatti le *tribune morte* e la *lanterna*.

Era dal 1434, anno in cui uscì il documento che sanciva la loro costruzione, che Brunelleschi attendeva di realizzare le tribune, atte a coprire le strutture di rinfiacco poste nei 4 angoli, nate dall'intersezione reciproca delle tre absidi e tra il copro longitudinale e le absidi stesse.

Per quanto riguarda la costruzione della lanterna, Brunelleschi dovette partecipare ad un ulteriore concorso che, una volta vinto, gli permise di realizzare di persona quell'elemento conclusivo capace di assicurare la stabilità della cupola con il suo peso. Secondo una stima effettuata da Di Pasquale, tale sovraccarico, utilizzato per mantenere l'equilibrio della volta a profilo ogivale, si aggirava intorno alle 800 tonnellate. Si tratta di un enorme e pesantissima opera scultorea che, oltre alla funzione stabilizzante e di illuminazione degli interni, costituisce la logica conclusione architettonica della cupola, enfatizzata dagli otto archi rampanti a continuazione e completamento delle creste in marmo bianco.



*Figura 11.9: lanterna
(Stegmann e Geymuller,
1885-1905)*

Il geniale progettista non riuscì a vedere l'opera compiuta, in quanto la lanterna venne conclusa nel 1461, dopo una decina di anni dall'inizio dei lavori. Alcuni studiosi, tra cui Di Pasquale, ritengono eccessivo il timore per la mancanza di tale

peso stabilizzante, definito poi non così indispensabile, constatando che la sua assenza per più di un ventennio non aveva comportato alcuna conseguenza negativa sulla copertura.

11.1.1.7 Macchinari

Il problema del sollevamento dei tanti materiali da costruzione fino alle vertiginose altezze della cupola, venne risolto brillantemente da Brunelleschi con macchine innovative che egli stesso progettò, ma di cui non lasciò né disegni né descrizioni. Dopo la sua morte, queste servirono per innalzare al di sopra della lanterna la grande sfera del Verrocchio; successivamente rimasero in mostra all'aperto e, inutilizzate, deperirono.

Tali macchinari, usati all'interno del cantiere, vennero costruiti con legno di olmo, quercia e castagno e furono sostanzialmente di quattro tipologie:

1. argano leggero;
2. argano a tre velocità;
3. grande gru girevole;
4. argano con doppia piattaforma per la costruzione della lanterna.

Questa classificazione è stata fatta da Reti ed è efficacemente testimoniata dai disegni delle macchine, realizzati da artisti quali Leonardo, Martini, Giuliano da Sangallo e Bonaccorso Ghiberti, che le riprodussero fedelmente e ne studiarono attentamente i meccanismi.

Principio che sta alla base del funzionamento di tutte è quello che regola la trasmissione del moto tramite due ruote dentate: la rotazione in senso orario dell'una comporta la rotazione antioraria di quella contigua ingranata.

1 *Argano leggero*

Atto a sollevare carichi leggeri, questo argano era composto da:

- ruota orizzontale, messa in movimento da due pertiche spinte da uomini o animali da tiro;
- ruota verticale, dotata di ingranaggi cilindrici antifrizione (*palei*);
- tamburo solidale con l'albero della ruota verticale, sul quale si avvolgeva la corda per il sollevamento dei pesi;

- puleggia fissa, posta al centro della ruota orizzontale, entro cui passa il canapo di sollevamento.

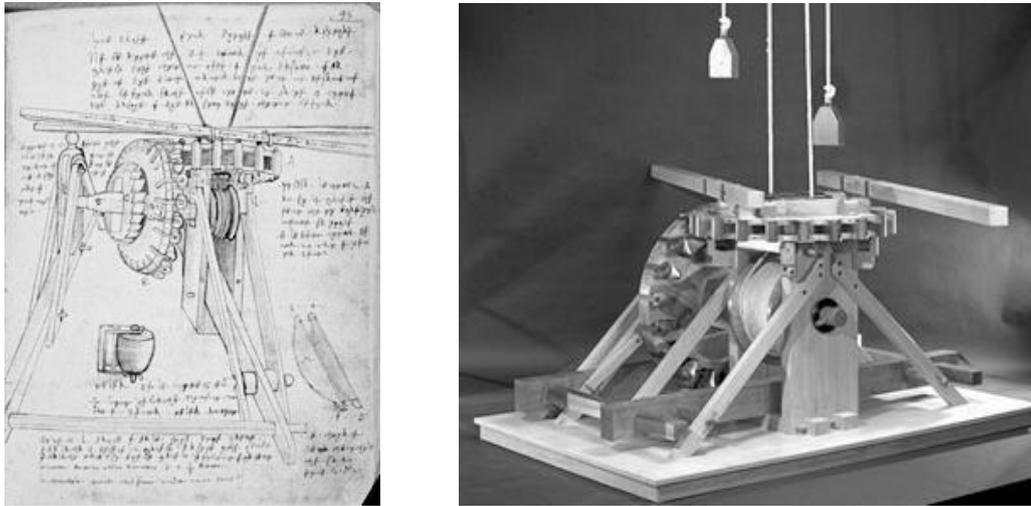


Figura 11.10: disegno e modello di argano leggero (museo Da Vinci)

2. Argano a tre velocità

La macchina a tre velocità o *colla grande*, azionata da una coppia di buoi o cavalli, permetteva l'inversione del moto (salita-discesa), mantenendo lo stesso verso di rotazione degli animali, grazie all'innesto nell'ingranaggio motore della ruota superiore o inferiore, con lo spostamento dell'asse verticale, a loro solidale, verso l'alto o il basso. Si chiama a tre velocità perché poteva mettere in movimento tre tamburi, con tre diverse velocità di avvolgimento delle funi; la si può vedere nello schizzo di Mariano di Jacopo, detto il Taccola, e nella riproduzione fatta al computer di figura 11.11.

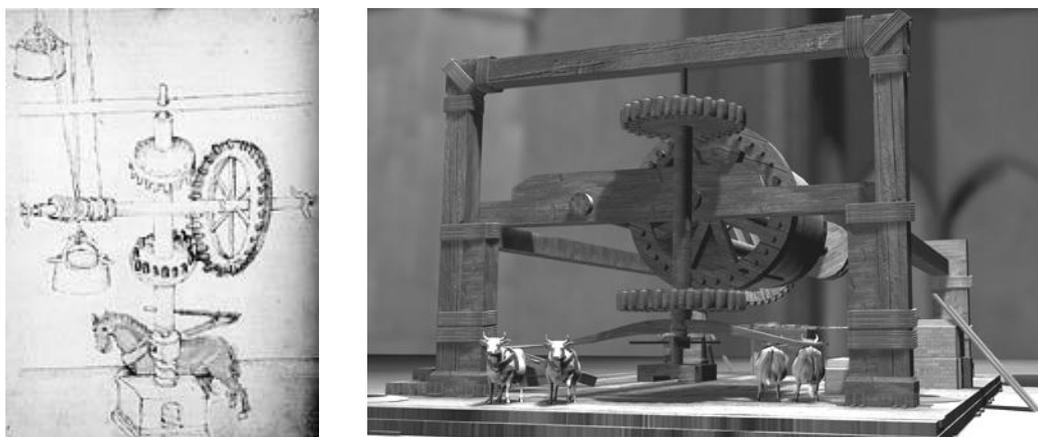


Figura 11.11: disegno di Mariano di Jacopo e modello di argano a tre velocità (kataweb.it)

3. Grande gru girevole

La grande gru utilizzata da Brunelleschi era del tutto analoga alle gru moderne, fatta eccezione per i materiali con cui veniva realizzata e per l'origine del proprio movimento. Quella rinascimentale era fatta con una struttura in legno, dotata di più piattaforme di lavoro alle diverse altezze; grazie ad un gioco di pesi e contrappesi, permetteva il sollevamento e il basculamento degli oggetti da collocare in opera, con spostamenti in verticale lungo tutto la sua altezza (raggiungeva anche i 20 metri) e in orizzontale a 360°.

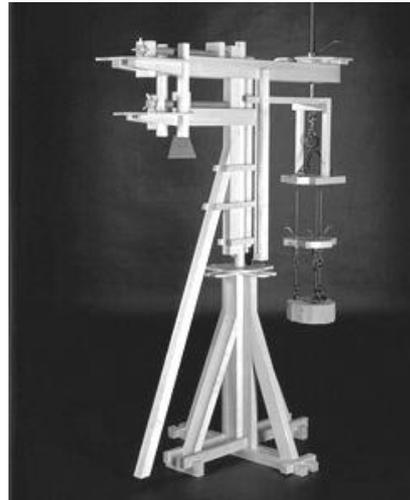


Figura 11.12: modello della grande gru girevole (museo Da Vinci)

4. Argano per la costruzione della lanterna

Per la lanterna si usava una macchina in cui, nella prima fase di costruzione degli speroni, la quota del piano di lavoro avanzava verso l'alto, mano a mano che gli speroni si innalzavano, grazie a quattro gigantesche viti. In tale fase, gli operai lavoravano all'esterno della piattaforma su cui era posta la gru per il sollevamento e la posa del materiale, mentre nella seconda fase, dedicata alla costruzione della parte centrale della lanterna, il piano di lavoro diventava un anello posto internamente. Nelle immagini di figura 11.13, si può vedere il disegno di Giuliano da Sangallo e il suo modello ligneo.

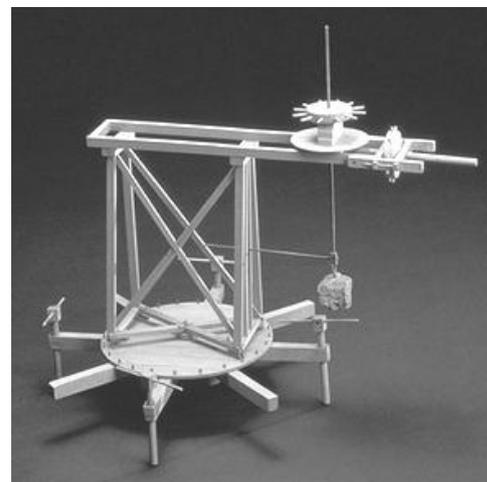
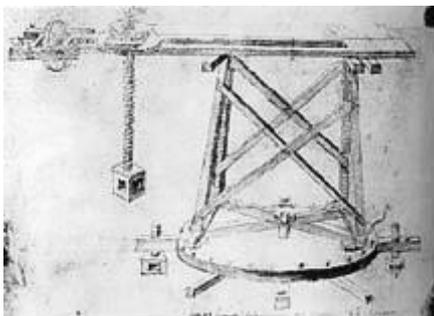


Figura 11.13: disegno di Giuliano da Sangallo e modello di argano per lanterna (museo Da Vinci)

11.1.1.8 Gotica o rinascimentale?

La cupola ha una forma tipicamente gotica, poiché è archiacuta. Tale forma è stata scelta per ragioni tecniche, tra le quali la minor spinta esercitata, e per motivazioni estetiche, tra le quali la continuità architettonica con il Duomo, che era nel suo complesso un edificio appartenente a quel gotico italiano, di cui si è già accennato. La concezione costruttiva di Brunelleschi, però, si distacca completamente dal gotico.



Figura 11.14: cupola del Duomo di Firenze, XV secolo (Gympel, 1999)

Infatti, se la struttura può apparire gotica per gli 8 costoloni in marmo che, come dei contrafforti, emergono dalla volta interna, il proprio carattere rinascimentale è sottolineato dal fatto che, considerata la loro eccezione, gli elementi strutturali non appaiono all'esterno. Infatti, all'interno dell'enorme spessore della calotta intradossale, sono nascosti gli altri 16 costoloni e gli archi orizzontali di sostegno della calotta esterna. Come si vede, si è molto lontani dall'idea della sottile volta gotica, sorretta da un ostentato scheletro portante .

Si tratta di un volume razionalmente studiato e conforme alle idee rinascimentali di Leon Battista Alberti, in quanto dotato sia di quelle proporzioni e simmetrie necessarie per raggiungere la *venustas*, sia di quella stabilità e resistenza finalizzate alla *firmitas*.

Inoltre, tipicamente rinascimentale è il nuovo ruolo assunto dall'architetto e l'utilizzo che sempre più frequentemente faceva del modello. Non più l'anonimo artigiano, ma un artista creativo, dotato di competenza professionale che, avendo presente l'aspetto definitivo della costruzione e conoscendo il sistema strutturale razionalmente concepito per sostenerla, la rappresentava in un modello in miniatura, per mostrarla e spiegarla prima della sua realizzazione.

Per quanto riguarda il materiale adoperato, si riporta il pensiero di un grande studioso, già citato più volte, che sostiene come:- Brunelleschi abbia raggiunto lentamente la certezza di aver realizzato con la struttura della Cupola un materiale

unico composto da malta e mattoni, un “composito” come si dice oggi, [...]; in altre parole che egli abbia intuito la fondamentale analogia tra la tecnica costruttiva delle grandi cupole romane e quella medievale dei mattoni, tutto sommato piccoli rispetto alle enormi dimensioni di quella fiorentina, contando sulla eccellente qualità della malta adoperata [...]-. (Di Pasquale, 2002)

12. LO SCHEMA SPINGENTE BAROCCO

12.1 Riflessione sull'evoluzione delle coperture fino all'età barocca

La basilica cristiana riprese la planimetria della basilica romana, acquistando però una nova luminosità, grazie alla differenza di altezza tra la navata centrale e le navate laterali. Lo spazio destinato al nuovo culto era sormontato da una leggera copertura sorretta da capriate in legno a vista, appoggiate sui muri longitudinali. Si tratta quindi di un edificio la cui lettura statica risulta molto chiara ma, nonostante ciò, il cui schema strutturale pesante non venne più ripreso, se non in tempi recenti, come nel caso del Crystal Palace a Londra, anche se utilizzando elementi metallici per i sostegni e per gli orizzontamenti. Come già diverse volte affermato, il problema della combustibilità del tetto favorì la ricerca di nuove soluzioni, volte a fornire una maggiore sicurezza all'edificio, ma anche una maggiore ampiezza delle navate. La grande idea fu quella di sfruttare la tradizione romana di edifici a pianta centrale coperti da cupola, applicandola ai luoghi a sviluppo longitudinale, con le opportune modifiche; si svilupparono così, prima lo schema strutturale romanico e poi gotico.

A differenza di quello basilicale, quelli medievali furono sistemi spingenti e subirono una notevole evoluzione circa il modo di assorbire e scaricare a terra la spinta della copertura voltata. Essi prendevano spunto dal modo di costruire romano, ma si distanziavano da esso tendendo ad una semplificazione delle strutture portanti di cui fu fautrice anche l'esperienza costruttiva bizantina. Infatti, i romani controbilanciavano le spinte delle volte, mediante il principio delle resistenze passive, con una ragionata disposizione delle murature e una complessa articolazione dei locali, come si nota per la sala ottagonale della Domus Aurea Neroniana; qualora l'edificio fosse ad un unico ambiente, non si facevano problemi nel realizzare muri molto spessi, come nel caso degli oltre 6 metri del Pantheon. Invece, nelle strutture di Santa Sofia e di San Vitale, le grandiose cupole venivano sorrette da piloni rafforzati mediante 8 contrafforti colossali nel primo

esempio e grazie alla funzione di contraffortamento del matroneo, agli speroni e ai contrafforti esterni, nel secondo caso. Il contrafforte permise un alleggerimento della struttura portante dell'edificio, che arrivò al massimo compimento nelle cattedrali gotiche; in esse, le volte a crociera costolonate incanalavano i flussi delle forze lungo le nervature e le trasmettevano al terreno, con i pilastri a fascio polistili e non tramite le pareti portanti longitudinali delle buie chiese romaniche. Oltre a rafforzare il piedritto con i contrafforti, si equilibrava la spinta con il principio delle resistenze attive; infatti, la struttura si semplificava, alleggerendosi degli ormai inutili muri e dotandosi di un efficace controbilanciamento delle spinte, effettuato dagli archi rampanti, i quali garantivano la stabilità dell'insieme anche grazie ai pinnacoli, che facevano cadere la risultante entro l'ancora sconosciuto nocciolo centrale d'inerzia.

Nel Rinascimento, le cupole doppie hanno sì mantenuto la relazione gotica tra costola e vela da un punto di vista formale, però alcune costole sono state messe in evidenza all'esterno della copertura, affidando ad esse una funzione non solo strutturale, ma anche estetica di suddivisione armonica della superficie; per esempio, le 8 costole di Brunelleschi a Firenze e le 16 di Michelangelo a Roma, sono impostate sul tamburo e terminano nell'anello sommitale dove svetta la lanterna.

Basate sul principio di selezione e concentrazione dei carichi delle volte gotiche, ma al contempo efficaci espressione dell'esuberanza barocca, sono le nervature ad arco incrociate della cupola della chiesa di San Lorenzo del Guarini, il maggiore esponente del Seicento torinese.

Nella figura 12.1, si può ammirare l'interno della cupola, con il disegno crociato e stellare ad 8 punte, realizzato dagli 8 evidenti costoloni

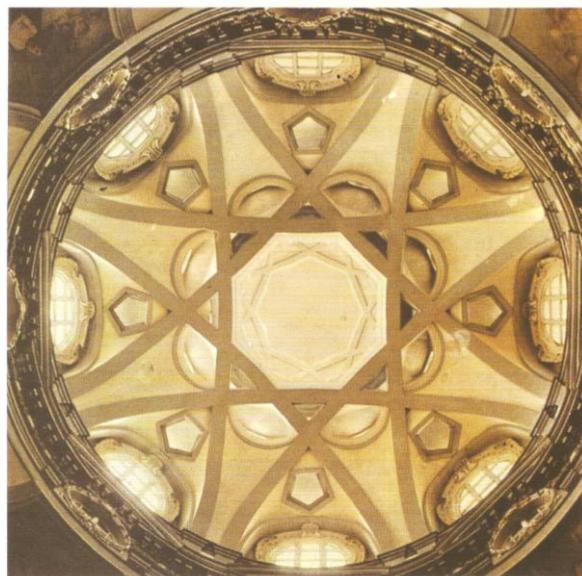


Figura 12.1: interno della cupola di San Lorenzo a Torino, 1666-1679 (Adorno, 1986)

semicircolari, disposti a coppie divergenti in senso triangolare. Sono il corrispettivo barocco delle linee di forza dell'architettura gotica, di cui non a caso egli fu un grande estimatore, ma il riferimento agli intrecci di costoloni intersecantesi dell'edilizia ispano-moresca è evidente, come dimostrato dalle figure 12.2 e 12.3.



Figura 12.2: veduta interna di una volta della moschea di Bib al-Mardum, Toledo, 1000 (Adorno, 1986)

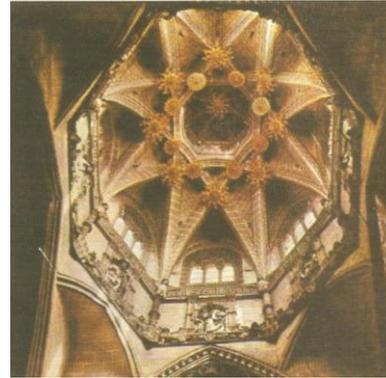


Figura 12.3: veduta interna del tiburio della Cattedrale di Saragozza, 1505-11520 (Adorno, 1986)

12.2 Il Barocco

Il periodo rinascimentale segnò un indebolimento del potere della Chiesa di Roma causato dallo sviluppo delle scienze moderne, che avevano scardinato alcuni dogmi della fede, come la forma del pianeta Terra e la sua collocazione rispetto al Sole, e soprattutto dalla Riforma di Lutero, in seguito alla quale molti paesi europei si distaccarono dalla Chiesa romana. Un inversione di tendenza si ebbe nel 1545 quando, con il Concilio di Trento, la Chiesa Cattolica, diede inizio alla Controriforma, infondendo all'ambiente religioso tradizionale una rinnovata fiducia nella propria dottrina e un sentimento di accanimento nei confronti di quelle protestanti.

Oltre ad essere l'arte del trionfo controriformista, il Barocco è anche l'arte della monarchia assoluta, affermata in pianta stabile in Francia e in Spagna. L'architettura del periodo era quindi lo strumento principale per esaltare l'autorità

papale e reale, il cui potere ambiva ad una legittimazione divina; per questo, le arti figurative avevano il compito di rappresentare tale potenza, destando nel popolo stupore e quasi riverenza, abbagliato dall'ostentato sfarzo delle decorazione e dalla teatrale dinamicità degli spazi delle chiese e dei palazzi di corte.

Dal punto di vista strutturale, gli edifici costruiti nei secoli XVII e XVIII non introdussero grandi novità, ma ripresero gli elementi classici arricchiti da traboccanti decorazioni e articolati in una complessa organizzazione plastica delle masse.

La progettazione dell'edificio era basata sull'utilizzo della linea curva, anche se le piante non erano quelle circolari del Rinascimento, ma ellittiche, poiché l'ovale aveva una forma tesa, dinamica e meno regolare di quella del cerchio, perfetto e armonioso.



**Figura 12.4: Piazza di San Pietro, Roma, 1656-65
(Gympel, 1996)**

Esempio di tale scelta è la pianta

ellittica, circondata da colonnati a tre navate, adottata dal Bernini per rappresentare l'abbraccio ideale della chiesa alla cristianità intera, nella Piazza San Pietro a Roma, riportata in figura 12.4.

La costruzione diveniva *opera d'arte totale*, in cui la scultura, la pittura e l'architettura si fondevano per sorprendere gli spettatori con effetti scenografici e ardite soluzioni. Ad esempio, le pareti, oltre ad essere fortemente decorate con ornamenti quali ghirlande, vasi, volute a forma di S e modanature, erano articolate anche nella forma movimentata, che veniva incurvata o avanti o all'indietro.

Gli elementi di sostegno erano volutamente evidenziati, cioè resi più massicci di quello che era necessario per assolvere il loro ufficio statico; ad esempio, diffuso era l'utilizzo delle colonne e dei semipilastri binati che spesso si estendevano su due piani secondo l'*ordine gigante*, oltre che la scelta di elementi, quali colonne, che apparivano dotati di una funzione strutturale, ma che in realtà ne erano privi. Il classico era sì ripreso, ma stravolto in un eccesso di decorazione, come dimostra

la preferenza per le contaminazioni degli ordini classici, ad esempio nel caso del *capitello composito*, e l'introduzione dei *semipilastri ad erme*, con sembianze di corpo umano nella parte superiore.

Il sistema maggiormente utilizzato per realizzare la copertura era quello spingente, con volte a botte e a crociera, oltre che cupole sempre più articolate e complesse. A proposito di coperture, la maggiore innovazione dell'ingegneria barocca fu la *cupola a tre calotte* che, oltre a riflettere il gusto del tempo per l'aspetto scenografico, rappresentò una geniale soluzione per assicurare stabilità a coperture spingenti su luci di oltre 30metri.

12.2.1 La cappella della Sacra Sindone

L'ingegnere e matematico Guarino Guarini (1624-1683), venne incaricato dal duca Carlo Emanuele II di Savoia di sostituire Amadeo di Castellamonte, nella costruzione della cappella destinata a custodire il Santo Sudario, una delle più pregiate reliquie d'Europa. Già iniziata nel 1657, la cappella venne conclusa tra il 1667 e il 1690, 11 anni dopo la morte del Guarini, ed è passata alla storia come uno dei maggiori esempi dello stile Barocco italiano ed europeo.

La cappella è a pianta circolare e presenta al centro un altare barocco su cui è conservata la Sindone. Essendo situata dietro l'abside del Duomo, ma a livello dell'adiacente Palazzo Reale, per accedervi la popolazione doveva salire due scalinate con bassi gradini semicircolari e attraversare due solenni portali in marmo nero.

La cupola presenta un'ossatura tronco-conica, posta sopra ad un alto tamburo esagonale, ed è sormontata da una lanterna circolare con struttura a cannocchiale. Dall'interno sono visibili i 6 ordini di archetti ribassati i quali, impostati sugli archi a tutto sesto che coprono le 6 alte finestre del tamburo, sono sovrapposti e



Figura 12.5: inetrno della cupola

sfalsati l'uno rispetto all'altro, definendo 6 esagoni sempre più piccoli, conclusi dall'anello in sommità, su cui esternamente è posta la lanterna. Il complesso intreccio di archetti, di dimensioni decrescenti verso l'alto, è presente anche all'esterno della cupola e si arricchisce dei 12 costoloni di ispirazione gotica che sorreggono la copertura; 2 urne di pietra sono collocate su ognuno di questi costoloni, che partono dal tamburo in mattoni di base e terminano tra le finestre ovali del tamburo circolare superiore.

Caratteristica distintiva di tale copertura è la grande illuminazione che permette alla cappella, raggiunta tramite le grandi finestre del tamburo, ma soprattutto grazie alla struttura alveolare della cupola. Infatti, i costoloni visibili all'esterno sorreggono il peso della copertura e, aiutati nello scaricare i pesi dal gioco orientaleggiante di archi ribassati, svolgono la funzione di membrature portanti, assolvendo da qualsiasi ufficio statico la porzione di superficie sottesa dagli archi e consentono ivi l'apertura di finestre ad arco di cerchio.

Si può dire che l'esterno (fig. 12.6), così come l'interno (fig. 12.5), sono di una eccentricità tipicamente barocca che non risulta puramente finalizzata a sé stessa o allo stupore dello spettatore, ma è dovuta alla ricca trama strutturale che risulta un'ardita e ragionata soluzione tecnica, progettata da Guarini per garantire la

maggior luminosità possibile al reliquiario.

Il materiale adottato è il marmo, la cui colorazione va dal nero per le parti inferiori della fabbrica, al grigio chiaro della copertura, che risplende per il filtrare della luce e rende la cupola quasi trasparente.

Oltre alla derivazione gotica nella scelta delle costole, l'andamento esterno a gradini e a zig-zag richiama una ziggurat sumera, mentre l'interno della volta presenta reminiscenze arabo-spagnole.



*Figura 12.6: esterno della cupola
(Watkin, 1999)*

Poiché fortemente danneggiata dall'incendio divampato tra l'11 e il 12 aprile del 1997, è in atto un piano di lavoro di restauro che terminerà con l'Ostensione ella

Sacra Sindone, nel prossimo 2010. Grazie alla collaborazione del Politecnico di Torino, è stato realizzato un sistema integrato di diagnosi per:

- ✓ monitorare le fratture nei conci in marmo,
- ✓ controllare l'integrità degli elementi restaurati,
- ✓ effettuare una stima del degrado nel tempo, anche in caso di un altro evento di crisi
- ✓ definire le modalità di intervento per la salvaguardia della cappella.

12.3 Tra barocco e classicismo

In contrapposizione alla tarda fioritura del Barocco in Germania e allo sviluppo del Rococò in Francia, in cui sovrabbondanti decorazioni naturalistiche arricchivano gli elementi architettonici fino a nascondere la costruzione stessa, il Settecento vide un progressivo ritorno alla linearità e all'armonia rinascimentale.

Il principio classicista secondo il quale la bellezza poteva essere raggiunta mediante regole di progettazione e costruzione precise, portò ad esempio alla realizzazione della chiesa degli Invalidi a Parigi, le cui superfici verticali ed orizzontali presentano dimensioni multiple del raggio del cerchio che definisce l'ambiente centrale. Analogamente, nella cattedrale di Saint Paul a Londra gli elementi barocchi, come le due torri della facciata visibili in figura 12.7 ed il contrasto di forme concave e convesse, si fondono con il senso geometrico di proporzione, incarnato dal profilo rinascimentale della cupola quasi emisferica e dal portico di ispirazione palladiana.

12.3.1 L'incendio di Londra

Dopo che la furia delle fiamme aveva già distrutto quasi completamente la capitale britannica, prima nel 798 e poi nel 982, anche in epoca moderna, a Londra divampò un grande incendio, passato alla storia per le sue drammatiche conseguenze: 13200 case distrutte, vale a dire un numero maggiore di quelle che i

tedeschi rasero al suolo, durante i bombardamenti della seconda guerra mondiale. Quel tragico episodio non fu l'unico che colpì una città europea in tempi relativamente recenti, basti pensare agli incendi di Oslo del 1624, di Edimburgo del 1700, di Copenaghen del 1728, di Stoccolma 1751, di Lisbona del 1755 e quello anti-Napoleone che i russi stessi innescarono a Mosca nel 1812.

Nonostante l'epoca avanzata in cui avvennero, questi eventi portarono numerosi crolli e indicibili disagi, anche a causa della fattura lignea di grande parte delle abitazioni di campagna e, soprattutto, di città. Infatti, se per la costruzione di edifici rappresentativi e cioè chiese, castelli, edifici comunali, torri etc., già da tempo si era abbandonato l'uso del legno poiché infiammabile, per le abitazioni comuni, le botteghe ed i magazzini, si era continuato a lungo ad abusare delle foreste vicine o meno ai centri abitati, per ottenere la materia prima con cui costruire.

A tal proposito, vale la pena di ricordare che l'equilibrio tra tecniche e materiali adottati per la realizzazione di costruzioni rappresentative ed utilitaristiche non esiste da sempre, ma è una grande conquista della società contemporanea, anche se già auspicato da Leon Battista Alberti nel "De re Aedificatoria", a metà del XV secolo:- le case de' manco ricchi si debbono assomigliare a quelle dei più ricchi-. (L. B. Alberti, 1455)

12.3.2 Cattedrale di St. Paul

Christopher Wren (1632-1722), nominato direttore generale dei lavori di ricostruzione di Londra, in seguito al grande incendio del 1666, venne incaricato di progettare 52 nuove chiese per la città, tra le quali anche il rifacimento della vecchia cattedrale di Saint Paul.

Il primo progetto proposto fu quello rappresentato dal modello ligneo risalente al



Figura 12.7: cattedrale di St. Paul, Londra, 1675-1710 (Watkin, 1999)

1673, ed ancora conservato negli ambienti della cattedrale, noto con il nome di *Great Model*. Si tratta di una chiesa a pianta centrale, con un andamento concavo delle pareti che raccordano i quattro bracci, preceduta da un vestibolo di ingresso, sormontato da una cupola minore. Al centro della pianta doveva sorgere la cupola maggiore, ispirata a San Pietro, dato il tamburo simile a quello del Bramante e i costoloni simili a quelli di Michelangelo. Tale soluzione progettuale non fu accettata dal clero poiché troppo arditamente per una cattedrale che, secondo la committenza, doveva possedere la tradizionale pianta a croce latina con tre navate, di cui la centrale molto grande, il transetto e il coro all'estremità orientale. In definitiva, nonostante il *Great Model* fosse il preferito da Wren, egli accettò le richieste del Clero e optò per la realizzazione tra il 1675 e il 1710 del *Warrent Design*, con l'unica modifica per cui, al posto della strana guglia prevista, pensò ad una cupola conforme a quella del primo progetto.

Come si vede dalla pianta di figura 12.8, il progetto definitivo prevedeva una lunga navata centrale, due navate laterali, il coro, i transetti e la cupola che, costruita a metà del corpo, coniugava le contrastanti esigenze di sviluppo longitudinale e centrale della chiesa.

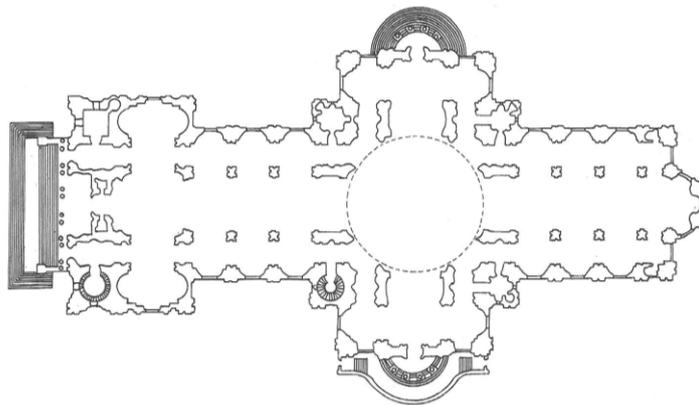


Figura 12.8: pianta della cattedrale (Watkin, 1999)

Oltre alle diatribe con la Royal Commission che, nonostante finanziasse il progetto tassando i cittadini londinesi sul consumo di carbone, non condivideva molte scelte dell'architetto, Wren dovette affrontare numerosi problemi strutturali. Tra i quali, quelli relativi alla presenza delle fondazioni della vecchia chiesa e al terreno argilloso su cui era costretto a costruire e che provocò vari crolli durante i lavori, a causa dei cedimenti differenziali delle strutture portanti. Wren pensò di

realizzare nuove fondazioni e di allargare i muri perimetrali circa di mezzo metro, rispetto quanto previsto nel Warrent Design; questo aumento della sezione era necessario per reggere il peso dei falsi muri esterni, che l'architetto realizzò di fronte alle finestre del cleristorio della navata e del coro per contenere la spinta della cupola e nascondere gli archi rampanti a sostegno delle volte.

Ricoprì le volte delle navate e del transetto con un tetto non spingente realizzato con capriate in legno, dotate di catene lunghe 14 metri.

Il genio di Wren si manifestò in tutto il suo splendore nella costruzione dell'elemento a cui teneva maggiormente e per cui si affaccendò un'intera vita: la grande cupola. Come nel caso di Santa Maria del Fiore, lo spazio sormontato dalla cupola è ottagonale, con lati lunghi 12 metri ciascuno, di cui 4 definiscono le arcate che mettono in collegamento la navata centrale con il transetto. La cupola si appoggia su 8 piloni e il raccordo tra la pianta poligonale e l'anello circolare di imposta è consentito grazie ad 8 pennacchi. Rispetto ai 4 pennacchi gravanti sui 4 punti di appoggio tradizionali, si raggiunge così una maggiore sicurezza e stabilità della copertura, consentendo un alleggerimento delle singole strutture di sostegno: piloni e pennacchi.

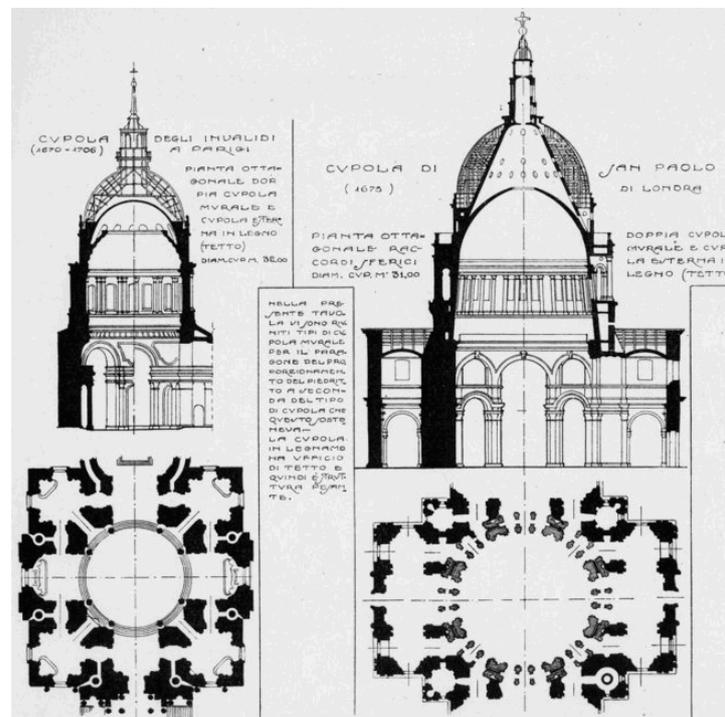


Figura 12.9: le cupole a tre calotte (dalla tav.33, parte I, Milani, 1920)

Il tamburo presenta una superficie interna conica, cioè lievemente inclinata verso l'interno, aiutando così a controbilanciare la spinta della cupola verso l'esterno. Per la copertura di 31 metri di luce, Wren prese spunto dalle cupole doppie del Rinascimento, ma le superò, come aveva fatto Mansard nella Cupola degli Invalidi a Parigi, progettando una cupola a tre calotte: una doppia cupola murale e una cupola esterna in legno (si vedano le figure 12.9 e 12.10).

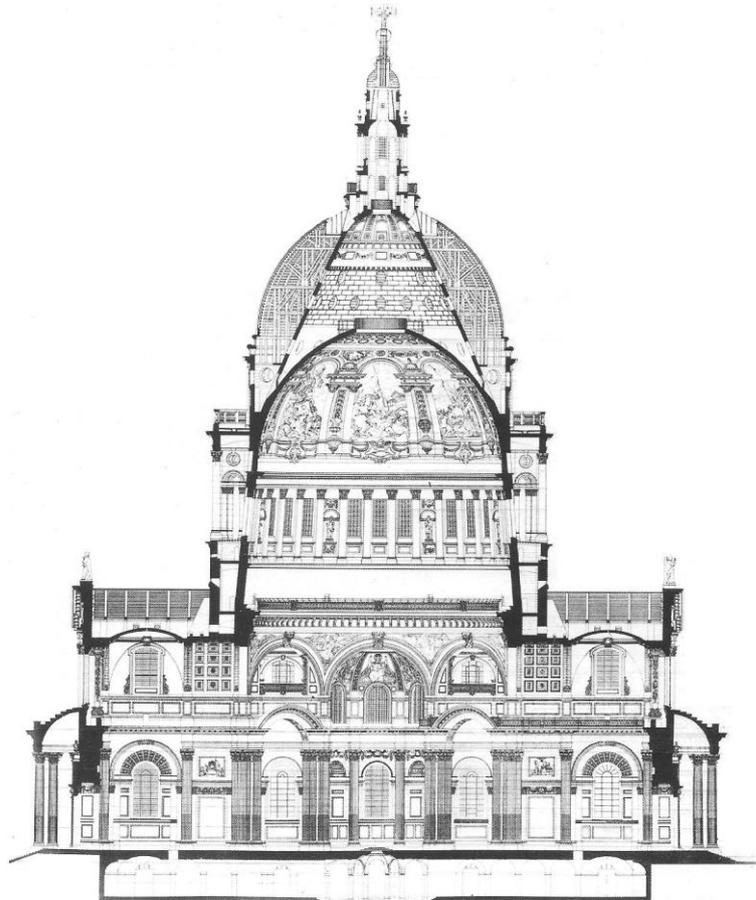


Figura 12.10: sezione trasversale sul transetto (Poley, 1927)

Di esse, la calotta interna è emisferica ed aperta al centro per far entrare la luce proveniente dalla lanterna, mentre la calotta esterna è molto più alta, per poter essere vista anche a grande distanza, ed è dotata di nervature sottili all'estradosso. Al fine di esercitare una minore azione sul piedritto rispetto a quella prodotta da un'altra calotta murale, la cupola esterna è stata realizzata con un'ossatura leggera in legno e rivestita esternamente da piombo. Svolgendo la funzione di tetto in legno, non esercita alcuna spinta e quindi è annoverata come una struttura pesante.

D'altro canto però, la sua esile struttura non le consentiva di sostenere il carico della lanterna in pietra posta in sommità e, per questo, il geniale Wren pensò di inserire una terza calotta intermedia, invisibile sia dall'interno che dall'esterno della costruzione: una volta conica in mattoni; tale forma fu scelta per conferire una maggiore stabilità alla lanterna. Sebbene indipendente dalla cupola interna, la volta mediana è impostata anche essa sul tamburo ed è rinforzata con 32 speroni emergenti, su cui si appoggiano altrettante centinature in legno che sostengono la leggera cupola esterna.

A proposito dell'elemento intermedio, il Milani affermava in maniera critica che: l'uso della volta conica non sia stato il migliore, inquantochè se questa presenta un certo vantaggio per la stabilità della lanterna, pur tuttavia essa esercita alla sua imposta e precisamente nel punto d'incontro colla calotta sferica coprente l'ambiente, una spinta certo maggiore di quella che si sarebbe avuta se questa volta fosse stata invece a profilo ogivale-. (Milani, 1920)

12.3.3 Catenaria

Negli anni in cui Wren costruiva la cattedrale, i fisici cominciarono ad effettuare studi sulle condizioni di equilibrio dell'arco, affrontandolo come problema matematico e statico. In particolare, nel 1695 de la Hire affermava che la stabilità di un arco è garantita staticamente dalla propria forma, che deve seguire l'andamento della curva delle pressioni, ottenuta come luogo delle successive risultanti del peso di ciascun concio e dell'azione che gli deriva da quello precedente. L'arco regge anche se le singole pietre costituenti possono scivolare l'uno rispetto all'altra, cioè in assenza di attrito nei giunti, come se fossero delle sfere semplicemente accostate reciprocamente. Un anno dopo, lo scozzese Stirling subordinava la stabilità dell'arco all'andamento a catenaria rovesciata del suo asse. A tale proposito si sa che una catena appesa alle due estremità, assume una forma che può variare solo se si cambia la

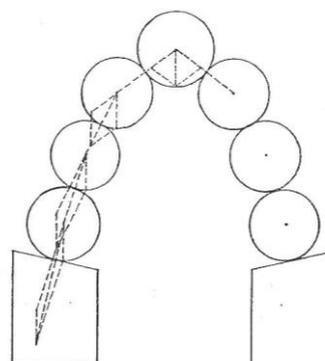


Figura 12.11: curva delle pressioni (Angerer, 1957)

posizione degli ancoraggi terminali e il suo peso. In particolare, se la catena è soggetta ad un carico uniformemente distribuito sulla proiezione orizzontale (fig. 12.12a), assume un andamento parabolico; se è sottoposta solo al peso proprio (fig. 12.12b), cioè ad un carico uniformemente ripartito lungo il suo sviluppo, si dispone secondo una curva definita appunto *catenaria*. Entrambe queste forme si definiscono *curve funicolari*, mentre qualora la catena venisse sottoposta a carichi puntuali (fig. 12.12c), la sua configurazione di equilibrio non sarebbe una curva ma una poligonale, chiamata *poligono funicolare*.

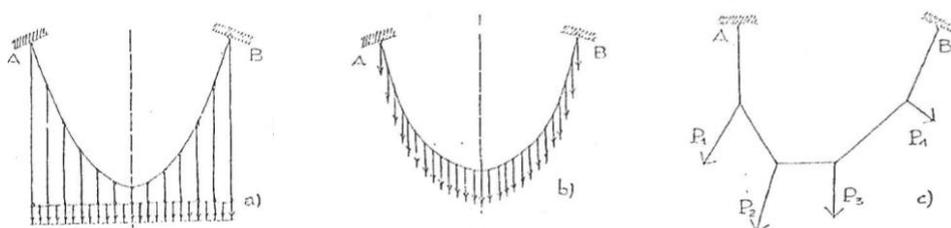


Figura 12.12: curve e poligono funicolari (Dassori-Zampini,1991)

La conclusione a cui portarono tali studi fu importantissima e si può sintetizzare dicendo che, a seconda dei carichi applicati, una catena appesa alle due estremità assume una forma che è unica ed è sede di soli sforzi assiali di trazione. Nacque così l'idea di dare all'arco la forma di una catenaria capovolta, in modo da sottoporlo a soli sforzi di assiali di compressione, senza mai essere accompagnati da momenti flettenti; cioè di configurare l'elemento secondo una forma tale da ottimizzare il materiale lapideo utilizzato, sfruttando al massimo le sue capacità resistenti, in quanto esente da flessioni.

In pratica, l'arco deve essere costruito in modo che il suo asse segua la forma di una catenaria capovolta, come riportato 12.13: catenaria per lo stesso carico, con la stessa freccia e reazioni di appoggio ovviamente opposte. Questa forma si ottiene considerando un carico permanente, ma siccome non si conoscono esattamente i carichi

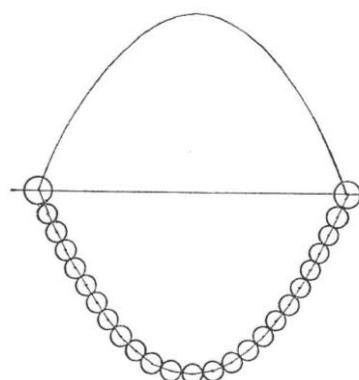


Figura 12.13: catenaria capovolta (Angerer, 1957)

che l'arco dovrà sostenere in opera, la sezione dovrà essere ragionevolmente dimensionata di modo che le varie curve delle pressioni passino sempre entro il nocciolo centrale di inerzia.

Tali studi e considerazioni, conosciuti da Wren anche se da poco elaborati, furono da lui sfruttati e lo spinsero ad adottare per la cupola interna la forma emisferica, rendendola così autoportante, e per la calotta intermedia una forma conica, in quanto soggetta ad un carico puntuale in sommità. Scelte entrambe derivate dal principio della catenaria capovolta.

13. LO SCHEMA NEOCLASSICO

13.1 Il neoclassicismo

*“Il solo modo per conseguire la grandezza e, potendo, essere inimitabili
è l’imitazione degli antichi.”*

(Winkelmann, 1764)

All’eccessivo virtuosismo ed ostentata decorazione del barocco, si contrappose, tra la seconda metà del Settecento e la prima dell’Ottocento, la reazione neoclassica, ispirata alla purezza stilistica e all’immediata espressione della struttura, proprie dell’architettura antica. Semplicità e razionalità sono le due caratteristiche fondamentali dello stile neoclassico, che si sviluppò all’interno di quell’importante movimento culturale europeo, chiamato Illuminismo. La “società dei lumi” ha teorizzato e al contempo sostenuto una rinascita culturale e politica, basata sulla fede nella ragione umana, che in breve tempo si è concretizzata nella secolarizzazione della società, nell’ascesa al potere della borghesia e nell’affermazione di quei diritti inviolabili dell’uomo, sanciti in forma scritta dalla Costituzione americana (1776-80) e francese (1791).

Direttamente correlato alla rielaborazione vigorosa e concreta effettuata dall’Illuminismo dei principi spirituali ed umanistici del Rinascimento, fu il riconoscimento dell’edilizia antica, come l’unica capace di realizzare gli ideali eterni di bellezza ed armonia. Si può dire che il razionalismo ed il funzionalismo del periodo preferivano l’imitazione delle opere passate, frutto dell’ingegno umano, all’imitazione della natura, considerata disarmonica e imperfetta.

Il rinnovato interesse verso il rigore e la misura dell’edilizia classica derivò anche dalla possibilità di osservazione diretta dei monumenti del passato, rinvenuti durante quelle grandiose spedizioni e campagne di scavi che iniziarono ad effettuarsi proprio nel corso del XVIII secolo.

A conferma di ciò, si possono ricordare gli anni delle seguenti eccezionali scoperte archeologiche:

- Palatino a Roma, nel 1729;
- Villa Adriana a Tivoli, nel 1734;
- Ercolano, nel 1738;
- Pompei, nel 1748.



**Figura 13.1: arco di Traiano
(Piranesi, 1748)**

Spinti dal desiderio di ammirarle di persona e carpirne i segreti estetici e tecnici, studiosi ed artisti provenienti da tutta Europa iniziarono a visitare sempre più frequentemente le rovine dell'Italia e della Grecia realizzando, oltre che studi sulle costruzioni dell'antichità classica, interessantissime raccolte di disegni ed

incisioni; tra le quali, la più famosa è la raccolta di stampe di Giovanni Battista Piranesi, dalla quale proviene l'immagine dell'Arco di Trainano a Benevento, riportato in figura 13.1.

Uno di questi appassionati fu il prussiano Johann Joachim Winckelmann (1717-1768) che elaborò la grandiosa opera intitolata "Storia dell'arte antica", risalente al 1764, in cui fu il primo a cercare di conferire un ordine sistematico alla miriade di opere realizzate. Egli, definito il teorico per eccellenza del neoclassicismo, rifiutò la comune e vaga idea dell'*antico* e mise in evidenza 4 distinti periodi:

1. periodo antico della Grecia arcaica,
2. periodo sublime del V secolo a.C.,
3. periodo bello del IV secolo a.C.,
4. periodo della decadenza nell'età romana.

Da tale netta classificazione, si nota la sua decisa opinione circa la tanto dibattuta questione sulla superiorità dell'arte romana o di quella greca, quest'ultima da lui definita come sublime espressione di "nobile semplicità e serena grandezza".

Tale precisa convinzione era sostenuta anche da Leo von Klenze che, nella sua "raccolta di progetti architettonici" del 1830, scrisse:- è esistita, esiste ed esisterà solo un 'architettura, quella che è stata pienamente realizzata nell'epoca storica dei greci [...]-; considerando poi la loro architettura come:- l'arte delle costruzioni di tutto il mondo e di tutti i tempi, e nessuna differenza di clima, di materiali, di

costumi può mettere in discussione la sua generale applicabilità-. (Leo von Klenze, 1830)

13.1.1 Il Pantheon di Parigi

Uno tra i più illustri architetti del XVIII secolo, fu il francese Jaques-Germain Soufflot (1713-1780), impegnato a rifondare l'architettura su basi razionali e sui principi costruttivi che poté ammirare durante i suoi viaggi a Paestum, Ercolano e Pompei.

Nel 1755 fu incaricato dal re Luigi XV della costruzione di Sainte-Genevieve, chiesa dedicata alla Santa patrona di Parigi. L'aspirazione era quella di realizzare un monumento di importanza paragonabile a quella



Figura 13.2: fronte di Sainte-Genevieve (oggi Pantheon), Parigi, 1757-1790

di San Pietro a Roma e di Saint Paul a Londra e Soufflot ci riuscì, concretizzando quegli ideali razionalisti tanto diffusi nell'Accademia di Francia a Roma da lui frequentata e che condivideva con altri studiosi quali Perrault e Laugier.

Nonostante i lavori cominciarono nel 1757, quando vennero gettate le fondazioni, per gravi problemi economici l'edificio venne sospeso e completato solo nel 1789, dopo la morte di Soufflot. In quell'anno, il suo pupillo Jean-Baptiste Rondelet terminò il progetto iniziato più di 30 anni prima e nel 1791, in seguito allo scoppio della Rivoluzione francese, l'edificio venne trasformato dal governo rivoluzionario nel Pantheon, luogo di sepoltura di importanti personalità nazionali. Tale cambio di destinazione d'uso fu fortemente agevolato dalla forma templare della costruzione, che si distaccava dal tradizionale stile ecclesiastico, in conformità allo spirito del tempo, scettico nei confronti della religione.



Figura 13.3: esterno di Ste-Genevieve

Come si intuisce dall'immagine 13.3, l'edificio è di grandissime dimensioni: lungo 110, largo 84, alto 83 metri e possiede una pianta a croce greca, preceduta da un grandioso pronao templare con 24 colonne corinzie, più alte di quelle del Pantheon italiano. Sotto il pavimento è presente una grande cripta coperta da una volta in pietra, sostenuta da colonne doriche.

La cupola, posizionata al centro della pianta riportata in figura 13.4, è sorretta solamente da 4 pilastri molto sottili, ognuno dei quali è circondato da 3 colonne. Sul tamburo, si eleva una tripla cupola, costituita dalle seguenti tre calotte murali, riportate nel disegno di Milani in figura 13.5: una prima calotta sferica a copertura dell'ambiente interno, una seconda intermedia che si erge in corrispondenza del terzo superiore della precedente e sostiene la lanterna sovrastante ed una terza calotta, molto sottile, che funge da copertura.

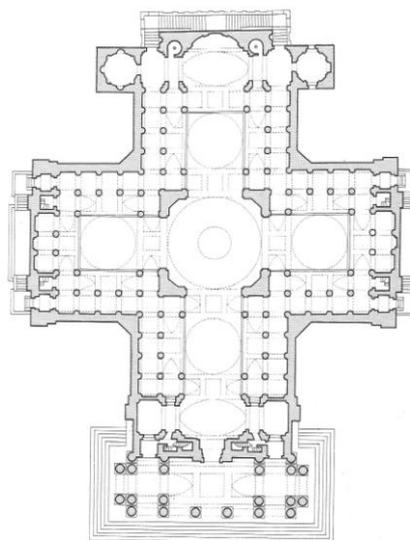


Figura 13.4: pianta di Ste-Genevieve

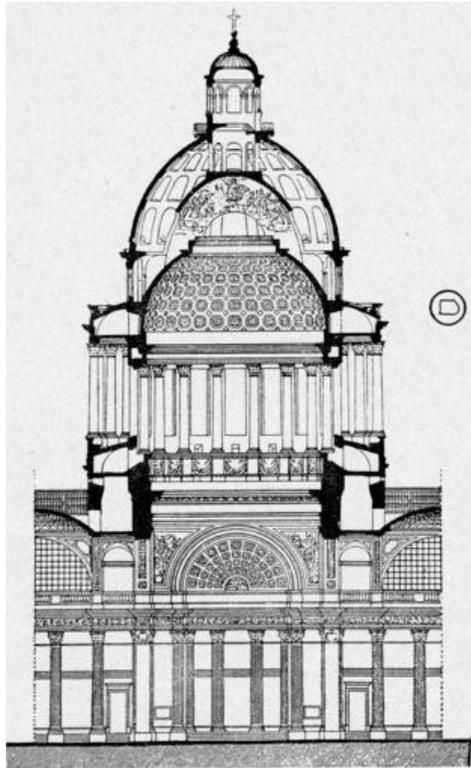


Figura 13.5: sezione di Ste-Genevieve (dalla tav.59, parte III, Milani, 1920)

Nel progetto originario i muri perimetrali dovevano addirittura essere traforati da numerose finestre, per lasciare filtrare la luce all'interno, ritenendo sufficienti le colonne a svolgere la funzione di elementi portanti. Se l'audace struttura, priva di un complesso sistema di masse parietali e di sostegni, conferiva alla costruzione



Figura 13.6: interno di Ste-Genevieve (Gympel, 1999)

uno spiccato senso di leggerezza, ispirato alla cattedrale gotica, d'altro canto, la purezza e la razionalità della forma complessiva e del pronao erano quelle di un tempio antico. Soufflot desiderava infatti realizzare una felice sintesi tra la snellezza dell'architettura gotica e la perfezione di quella greco-romana, e ci riuscì secondo i contemporanei, che definirono Ste-Genevieve come "il primo esempio di architettura perfettamente compiuta".

L'esile struttura non riuscì però a sostenere le

spinte della copertura spingente, poiché non dotata di un adeguato sistema di sostegno e priva di uno di contraffortamento. Per motivi di scarsa stabilità strutturale, comparvero ben presto crepe nei pilastri ed il Pantheon attuale è fortemente modificato rispetto a quello originale, in seguito a vari interventi che iniziarono subito dopo la sua erezione. Ad esempio, le finestre laterali vennero chiuse nel 1791 e, successivamente nel 1806, vennero rinforzati gli stessi pilastri.

13.2 In America

Negli Stati Uniti d'America ci fu una fortissima diffusione del neoclassicismo, a causa del grande amore che oltreoceano si nutriva nei confronti dell'antichità classica, conosciuta soprattutto grazie alle opere di Palladio. Lo spirito democratico americano trovava una sua legittimazione storica nella Grecia di Pericle e nella Roma repubblicana e per questo le nuove costruzioni, tanto pubbliche quanto private, avrebbero dovuto riprendere la regolarità e la sobrietà dell'architettura antica, in piena sintonia con il Greek Revival del tempo. I maggiori architetti del periodo furono il terzo presidente americano Thomas Jefferson (1743-1829) ed il sovrintendente ai lavori pubblici di Washington, Benjamin H. Latrobe (1764-1820), entrambi partecipi alla realizzazione del più importante edificio americano: il Campidoglio.

13.2.1 Il Campidoglio degli Stati Uniti

Il Campidoglio era, e lo è tuttora, la sede ufficiale dei due rami del Congresso del nuovo Stato, nato sul principio illuminista dell'uguaglianza universale, ed in quanto tale, ha preso a modello l'antico Campidoglio di Roma, sede esemplare della democrazia.

Per comprendere l'importanza di tale monumento, rappresentato in figura 13.7, divenuto il simbolo del neoclassicismo americano e non solo, si cita un passo della lettera di Jefferson, indirizzata a Latrobe, in cui egli lo definisce:- il primo

tempio dedicato alla sovranità del popolo, abbellendo secondo il gusto ateniese il corso di una nazione che guarda ben oltre il limite dei destini ateniesi-. (Thomas Jefferson, 1812)

Il progetto originale fu di William Thornton che, per la forma architettonica, si ispirò alla facciata orientale del Louvre e al Pantheon di Roma, filtrati esplicitamente attraverso il classicismo palladiano. Una volta assicurato l'approvvigionamento di marmi e pietra provenienti dalle cave della Virginia, i lavori iniziarono nel 1793, sotto la sua direzione e con la collaborazione di Stephen Hallet, che ampliò



il progetto iniziale a pianta centrale, con l'aggiunta di due ali laterali, riservate ai corpi legislativi della Camera dei Rappresentanti e del Senato. Nel 1814, poco tempo dopo il completamento dei corpi laterali, il Campidoglio arse tra le fiamme innescate dalle truppe britanniche, durante la guerra che l'America stava combattendo contro Inghilterra e Canada. A partire dal 1815, la ricostruzione dell'edificio venne affidata a Benjamin Latrobe e al suo successore Charles Bulfinch, che realizzò la copertura a cupola della rotonda centrale, terminata nel 1824.

Figura 13.7: Campidoglio, Washington, D.C., 1793-1865 (Gympel, 1999)



Figura 13.8: il Campidoglio come appariva nel 1846 (www.wikipedia.it)

Nel corso degli anni cinquanta dell'Ottocento, l'edificio venne sensibilmente ampliato e di conseguenza la piccola cupola in legno di Bulfinch, divenne inadatta alle grandi dimensioni del restaurato complesso, tanto è vero che il nuovo progettista, Thomas Walter (1804-1887), decise di sostituirla con una nuova, alta

tre volte la precedente. Prendendo spunto dalla cupola parigina della Dome des Invalides di Mansart, riportata in figura 13.9, egli pensò di utilizzare le strutture di sostegno in muratura già esistenti e, su di esse, realizzò una cupola con orditura in ghisa di 30 metri di diametro, raffigurata nell'immagine 13.11.

Fece terminare la cupola interna con il grande oculo in sommità, permettendo così di ammirare il dipinto de “L'apoteosi di George Washington”, dell'italiano

Costantino Brumidi. Questa opera è stata realizzata su un gigantesco supporto, posto tra le due calotte e fissato sui costoloni che sostengono sia la cupola esterna, sia il tholos con sopra la grande Statua della Libertà.

L'utilizzo della ghisa, il cui peso totale è stato stimato oltre le 4000 tonnellate, fu decisamente innovativo, così come il complesso sistema di fasciature e bullonature, adottato per collegare le due calotte.

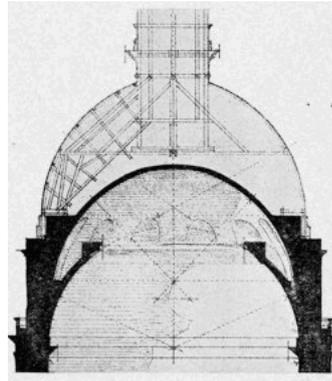


Figura 13.9: sezione cupola della Dome des Invalides (Milani, 1920)



Figura 13.10: cupola del Campidoglio in costruzione nel 1861 (www.wikipedia.it)

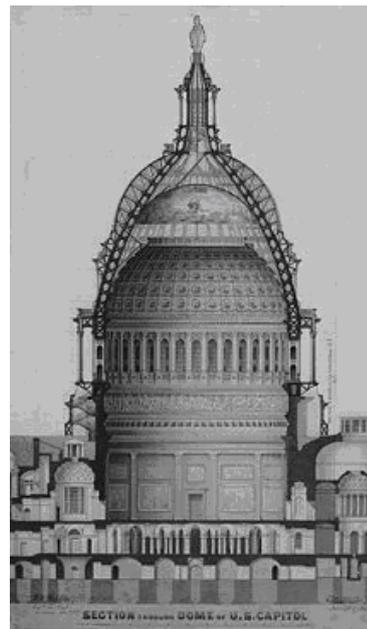


Figura 13.11: sezione della doppia cupola in ghisa del Campidoglio (www.wikipedia.it)

L'imponente cupola è diventata l'emblema di Washington, il simbolo del sogno di libertà e il modello che ogni stato americano segue per la costruzione della propria sede del parlamento.

14. LE STRUTTURE METALLICHE

14.1 La ghisa

L'idea di poter costruire usando nuovi materiali, in particolare quelli metallici, nacque in seguito alla rivoluzione industriale che si ebbe tra la fine del Settecento e gli inizi dell'Ottocento, in Inghilterra. La massiccia industrializzazione comportò tra l'altro un forte sviluppo del settore siderurgico e, grazie alle scoperte di nuovi sistemi, quali la macchina a vapore, che facilitavano la produzione di leghe metalliche, si cominciò a sfornare *ghisa* in grande quantità, con dei costi di produzione non eccessivi. Questo nuovo materiale era il prodotto della raffinazione del ferro negli altiforni che, grazie al sistema di H.Cort riunificante i processi di puddellaggio (fusione e rimescolamento), martellatura e laminazione, assicurava un'ottima qualità al materiale prodotto, eliminandone completamente tutte le impurità. A conferma dello sviluppo del settore siderurgico, si ricorda come alla fine del XVIII secolo, vi fu una grande crescita nella produzione di ferro grezzo, di ferro battuto e di ghisa; in particolare, dalle 68000 tonnellate del 1788, la produzione di ghisa passò alle 581000 del 1825 e, a partire dal 1812, l'Inghilterra ne divenne un paese esportatore.

La nuova civiltà industrializzata scelse come proprio simbolo il ferro che trovò impiego, oltre che nella costruzione che di attrezzature e macchine, anche nell'edilizia pubblica e privata. Il collegamento diretto tra rivoluzione architettonica e industriale è dimostrata dal primo utilizzo della ghisa nelle fabbriche tessili, per sostituire le deboli travi in legno che non consentivano di coprire grandi luci e richiedevano molti pilastri su cui appoggiarsi, intralciando così la mobilità degli operai e il collocamento delle macchine. Infatti, la ghisa, che resiste ad una pressione quattro volte superiore a quella della pietra, permetteva di realizzare strutture molto più leggere di quelle del passato, senza perdere nulla in resistenza.

Ferro e ghisa divennero i nuovi materiali da costruzione, sempre più frequentemente adottati nel corso dell'Ottocento, per realizzare lo scheletro

portante di numerosi monumenti che veniva lasciato orgogliosamente in mostra, senza essere nascosto da decorazioni eclettiche e falso-antiche, a dimostrazione della proprie qualità estetiche e tecniche.

14.1.1 Coalbrookdale Bridge

La nascente società industrializzata necessitava di una grande efficienza nei trasporti e nei collegamenti tra i vari stabilimenti che si pensò di garantire con i tanti ponti costruiti nel periodo, usando le proprietà di resistenza e leggerezza dei materiali metallici. Queste realizzazioni furono delle vere e proprie prodezze strutturali, figlie del progresso nelle tecniche costruttive del XIX secolo e palese dimostrazione delle potenzialità dei metalli.

Il primo ponte metallico nella storia delle costruzioni fu quello costruito da S. Darby, tra il 1775 e il 1779, sul fiume Severn, a Coalbrookdale, in Inghilterra. Come si può vedere in figura 14.1, si tratta di un ponte ad arco, realizzato con 5 nervature parallele ad arco di cerchio, impostate su spalle in pietra. L'ossatura metallica è stata ottenuta assemblando in sito gli elementi in ghisa, preparati in officina, con procedimenti di fusione in stampi di legno e di terra; in particolare, in cantiere sono stati collegati in chiave le 5 coppie di semiarchi, per realizzare gli archi a tutto sesto. L'Ironbridge possiede una campata di 30 metri ed un'altezza di 20 metri sul livello del fiume, raggiunti con una forma che ricorda i precedenti ponti ad arco a via superiore realizzati in pietra, ma con un tale senso di leggerezza e trasparenza, raggiunto grazie alla nuova tecnologia del ferro, da sancire un definitivo distacco dalla tradizione costruttiva del passato. Il peso totale è di 378 tonnellate, dovuto agli 800 pezzi appartenenti a 12 tipologie diverse, collegati fra

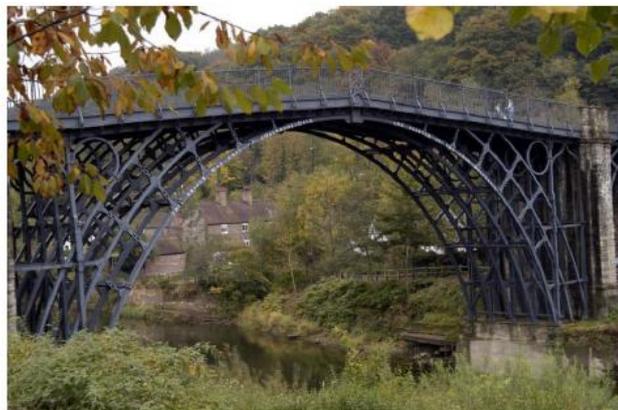


Figura 14.1: Coalbrookdale Bridge, Inghilterra, 1775-1779

loro per costituire lo scheletro strutturale, tramite giunti a coda di rondine e, soprattutto lungo la parte superiore dell'arco, tramite bullonature.

Per il traffico dell'epoca, era sicuramente sovradimensionato strutturalmente e per questo si dimostrò nel corso degli anni forte e robusto, ma nel 1934 venne escluso dalla circolazione veicolare e poi restaurato.

14.1.2 Crystal Palace

Oltre alle fabbriche, alle stazioni ferroviarie e ai grandi magazzini, i prodotti architettonici caratterizzanti la civiltà industrializzata furono i padiglioni per le Esposizioni Universali, nella costruzione dei quali, gli ingegneri del tempo sfruttarono le potenzialità dei nuovi materiali, congiuntamente alle tecniche costruttive più all'avanguardia. Infatti, durante quei grandi eventi organizzati dai paesi più avanzati, per vantarsi dei progressi raggiunti in tutti i settori, la nuova tecnologia del ferro trovò un nuovo e vasto campo di applicazione.

Fu proprio in occasione della prima Esposizione Universale, in scena a Londra nel 1851, che venne realizzato un capolavoro dell'età metallica: il Crystal Palace, riportato in figura 14.2. Realizzato in soli 9 mesi, da Joseph Paxton (1803-1865) con la collaborazione degli ingegneri Fox ed Henderson, venne smontato alla fine della mostra e poi rimontato in un quartiere a sud della città, dove si poté ammirare fino all'incendio del 1937. La genialità di Paxton fu quella di riuscire a costruire, in un tempo così breve, un edificio di dimensioni paragonabili, se non superiori, a quelle delle cattedrali del paese, sfruttando elementi prefabbricati in metallo e abbandonando la pietra o il mattone. Si trattava di un gigantesco padiglione lungo 563 metri, largo 139 e alto 34, costruito con ghisa, ferro forgiato e vetro. Dal punto di vista geometrico, la fabbrica occupava una superficie pari a 8,4 ettari di Hyde Park e si configurava come un lungo corpo a tre gradoni, intersecato in mezzeria con un transetto coperto da una volta a botte di altezza maggiore. Lo schema statico è quello non spingente del trilito: sostegni verticali ed elementi portanti trasversali semplicemente appoggiati su di essi.

Si annovera come il primo edificio prefabbricato, costruito con parti standardizzate prodotte dall'industria e assemblate in cantiere, secondo una

moderna tecnica di costruzione razionalizzata che consentì a Paxton di completarlo in tempi brevissimi. A conferma di ciò, si sa che diverse aziende inglesi lavorarono per produrre i singoli elementi della grande ossatura metallica, tra cui 3300 pilastri e 2224 travi e qualcosa come un terzo della produzione annua di vetro dell'intero paese venne utilizzata per realizzare le 300000 lastre di tamponamento, da sistemare nei 205 telai in legno realizzati per la posa dei pannelli in vetro.

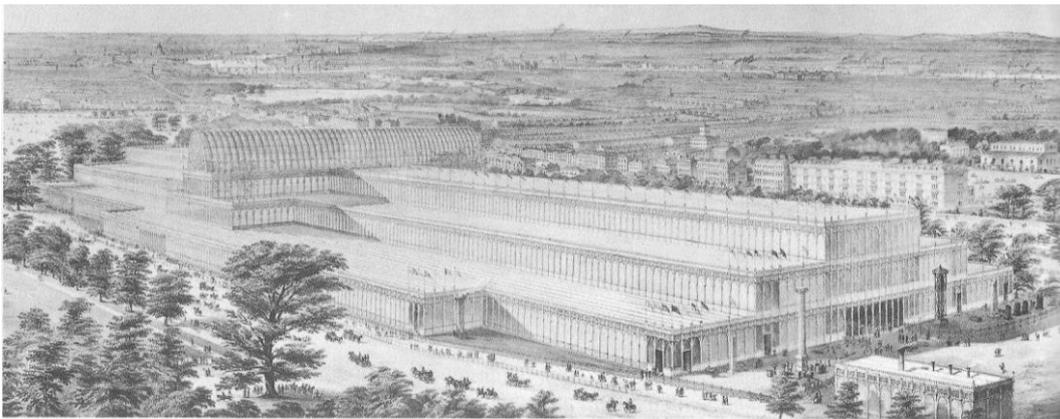


Figura 14.2: Crystal Palace. Londra. 1851 (Watkin. 1999)

Si può considerare come il risultato estremo della tradizione costruttiva di serre e pensiline ferroviarie, consolidatasi tra il 1830 e il 1850 e, al contempo, un'opera pionieristica di ingegneria moderna, che ebbe una grande influenza sugli sviluppi successivi nella tecnica delle costruzioni. Infatti, rappresenta un esempio di moderna costruzione *ad ossatura portante*, in cui gli elementi portanti prefabbricati venivano rapidamente assemblati in opera, per realizzare una maglia strutturale razionalmente progettata per trasferire i carichi a terra. In tal modo, diventavano fattibili edifici di qualunque altezza e dimensione e andò progressivamente scomparendo il vecchio tipo di costruzione, basata sulle masse e sui muri portanti, avviando così la più grande rivoluzione nella storia della tecnica edilizia.

14.1.3 Le biblioteche di Labrouste

Henri Labrouste (1801-1875), fu uno dei primi tecnici a comprendere le potenzialità e l'importanza del ferro nel campo delle costruzioni. Dopo aver

viaggiato molto, visitando acquedotti romani e templi greci, tornò a Parigi dove realizzò due importanti biblioteche, sfruttando le proprietà dei nuovi materiali metallici.

La prima fu quella di Ste-Genevieve, realizzata tra il 1843 e il 1850 presso il Pantheon, la cui autonoma ossatura metallica interna fu uno dei primi esempi di utilizzo di ghisa per un'opera monumentale. Infatti, non vi erano precedenti di una completa struttura in ghisa che andava dalle fondazioni al tetto, per la realizzazione di un edificio pubblico e, per questo incerto circa l'apprezzamento dell'opinione pubblica, Labrouste pensò di nascondere, almeno all'esterno, l'avveniristico scheletro metallico con pareti in muratura di stile eclettico. La sala di lettura è a due navate coperte con lunghe volte a botte, realizzate con un reticolo di barre di ferro rivestite in gesso. Le volte sono sorrette da un sistema di archi scaricanti sia sui muri perimetrali, sia sulla fila di colonne centrali, anche esse in ghisa come gli archi, come si nota nelle immagini di figura 14.3. Su di esse vi è solamente una azione di peso verticale, poiché le azioni spingenti delle due volte si controbilanciano a vicenda, secondo il principio delle resistenze attive.

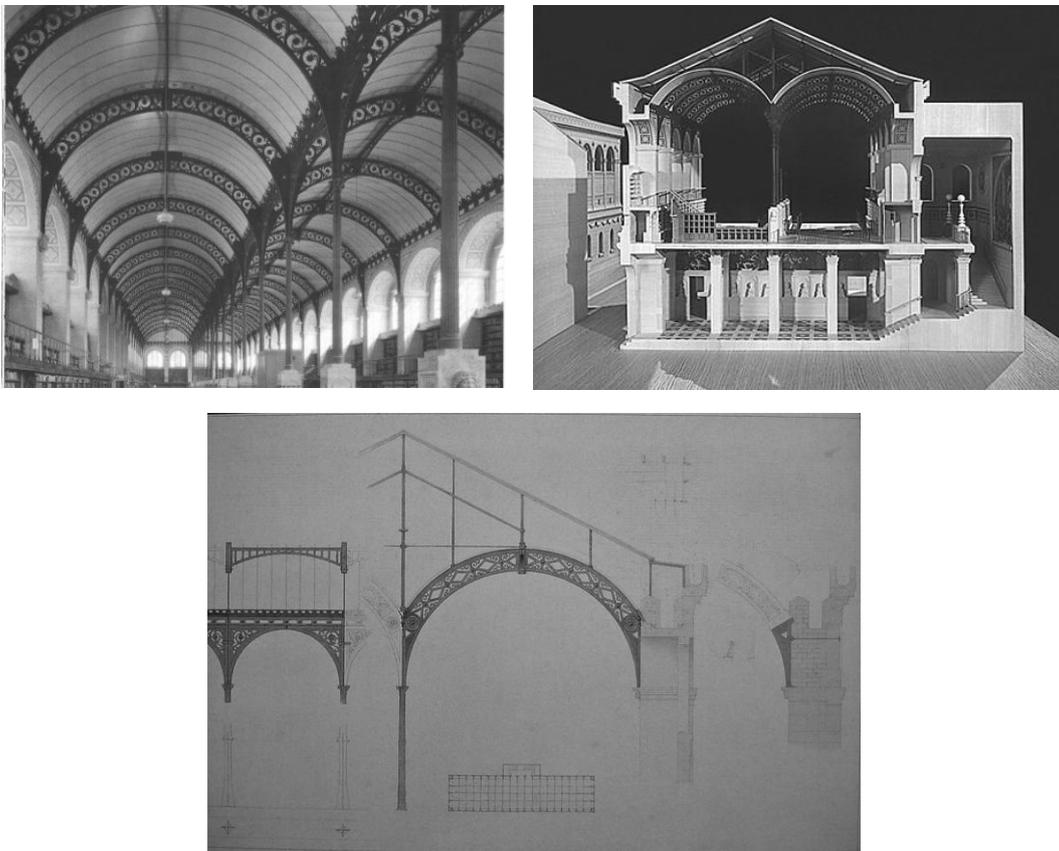


Figura 14.3: interno Biblioteca di Ste-Genevieve, Parigi, 1843-1850, ricostruzione al computer e prove di disegno degli archi

Il massiccio muro esterno si contrappone all'esile struttura interna, in cui i sostegni metallici svettano al centro dell'edificio senza rivestimenti, nè pareti, inutili dal punto di vista statico.

Tra il 1859 e il 1868, le tecniche di costruzione di Labrouste raggiunsero l'apice con la realizzazione della sala di lettura principale della Biblioteca Nazionale di Parigi, nella quale 16 esili colonne in ghisa sono a sostegno di 9 cupole di vetro e porcellana, ognuna delle quali è impostata su 4 archi in ferro. In alto, le cupole sono aperte al centro, per lasciare che la luce filtri attraverso le vetrate, mentre in basso, il pavimento è realizzato in piastre di ghisa e graticcio.

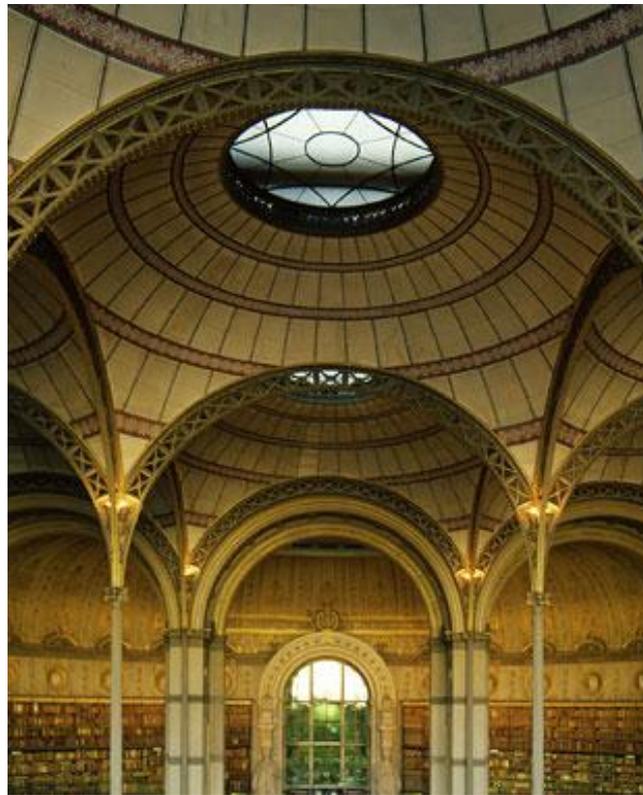


Figura 14.4: interno della Biblioteca Nazionale, Parigi, 1859-1868

Secondo Milani, tale edificio appartiene alla categoria degli organismi basilicali, in cui la struttura di sostegno e quella di copertura sono indipendenti l'una dall'altra, grazie al collegamento a cerniera tipico del sistema pesante o, qual dir si voglia, non spingente. In tal caso, i sostegni e gli orizzontamenti, invece di essere in muratura, sono realizzati in un materiale elastico quale la ghisa, riuscendo a minimizzare l'ingombro della sezione della colonna; però, la

biblioteca parigina non presenta una copertura pesante a tetto, ma l'unico grande ambiente è sormontato da tante volte a vela. Nonostante la copertura sia voltata, non si tratta di un sistema spingente, in quanto la spinta è stata eliminata facendo appoggiare su una stessa colonna volte adiacenti, affinché gli effetti orizzontali si neutralizzino a vicenda e i piedritti siano sollecitati solo da azioni verticali di peso.

Il materiale metallico venne adottato poiché permise una notevole riduzione della massa resistente nelle strutture di sostegno, comportando così un alleggerimento di tutta la struttura, ma il sistema strutturale è ancora simile a quello dei precedenti organismi in muratura, come disegnato (si veda figura 14.5) e affermato da Milani: - è evidente l'analogia con il celebre mercato vecchio di Firenze elegante costruzione del secolo XV ed eseguito con colonne in pietra e volte murali. Per questa ragione e perché allo studioso riesca facile un tale paragone abbiamo creduto opportuno aggiungere alla tav. 46 una pianta di questo edificio con uno schizzo assonometrico in relazione con quello dell'organismo con strutture metalliche-. (Milani, 1920)

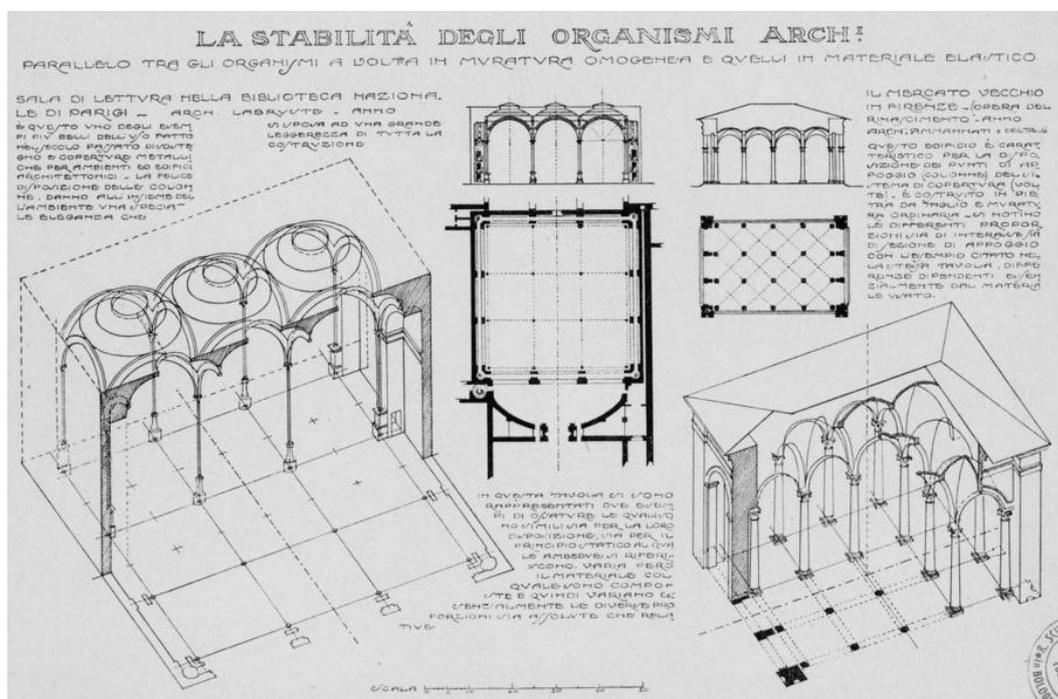


Figura 14.5: Biblioteca Nazionale e Mercato Vecchio (dalla tav. 46, parte I, Milani, 1920)

14.1.4 La Galleria Vittorio Emanuele II

Dello stesso periodo è la Galleria Vittorio Emanuele II a Milano, realizzata tra il 1865 e il 1877, secondo il progetto di Giuseppe Mengoni (1820-1877).

Fu l'opera che meglio riuscì nell'associazione del revival neorinascimentale alla tecnologia dei nuovi materiali, per la cui costruzione, finanziata da imprenditori inglesi, si utilizzarono ferro e vetro provenienti proprio dal Regno Unito. Si tratta di un edificio con strutture di sostegno in muratura e una copertura metallica, indipendente dal resto della costruzione, realizzata in ferro; materiale che nella seconda metà del secolo soppiantò definitivamente la fragile ghisa.

Innalzando una galleria tra la piazza del Duomo e quella della Scala, Mengoni realizzò perfettamente il desiderio di dare ai milanesi un luogo di incontro pubblico, contemporaneamente al riparo dalle intemperie e nel centro della città. Destinata ad accogliere un gran numero di persone e bisognosa quindi di uno spazio interno di grandi dimensioni libero da sostegni intermedi, fu dotata di una copertura con ossatura metallica, lasciata in vista e rivestita da pannelli di vetro. Oltre a garantire il superamento di un'ampia luce, l'utilizzo del ferro comportò grande rapidità nella costruzione, grazie al veloce assemblaggio delle parti prefabbricate, mentre la sostituzione delle superfici opache di copertura con pannelli vetrati, consentì una maggiore illuminazione dell'interno.

La pianta presenta 4 bracci disposti a croce ed intersecantesi nello spazio centrale di forma ottagonale; ciascun braccio è sormontato da una volta a botte e l'ottagono al centro è coperto da una cupola. La struttura della cupola è formata da archi-meridiani in ferro, disposti in senso verticale e collegati tra loro da archi disposti in orizzontale, lungo i paralleli.

In figura 14.6, si riporta la tavola del Milani in cui la Galleria, citata come mirabile esempio di struttura murale con copertura metallica, è rappresentata attraverso la vista del suo interno, la sezione della cupola e la pianta.

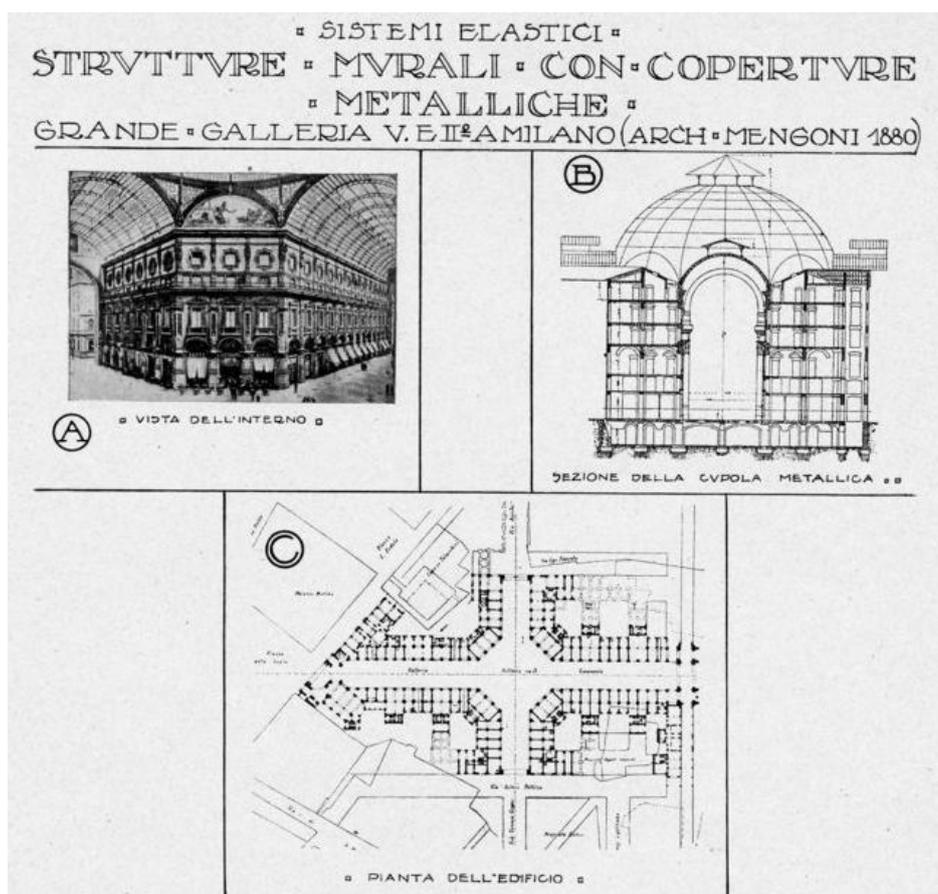


Figura 14.6: interno, sezione e pianta (dalla tav.73, parte III, Milani, 1920)

14.2 L'acciaio

Grazie anche alla pubblicazione nel 1826 del corso di Scienza delle Costruzioni, tenuto da Claude-Louis Navier all'Ecole Polytechnique, ove Darby aveva scoperto la ghisa, si formò una nuova classe di progettisti che costruiva sfruttando le potenzialità dei nuovi materiali e che trovò espressione concreta in quella che è passata alla storia come *l'architettura degli ingegneri*. Grazie allo sviluppo in forma organica della scienza e della tecnica delle costruzioni e al conseguente arricchimento della conoscenza nei due settori, la progettazione si staccò progressivamente dalle tecniche tradizionali, sostituendo alla intuizione il preventivo calcolo razionale degli effetti. Il diffuso interesse circa le leggi matematiche e i principi statici, tasselli fondamentali nel bagaglio culturale

proprio della nuova figura di ingegnere moderno, è brillantemente sintetizzato nella seguente frase:- Non c'è sempre accordo tra i calcoli esatti sulla stabilità e le leggi dell'armonia?- (Eiffel, 1880)

I tre più importanti campi di applicazione dei nuovi tecnici furono:

- la produzione di ponti in ferro;
- la realizzazione di edifici ad armatura metallica;
- la realizzazione di coperture in ferro e vetro.

Alla fine dell'Ottocento, l'industria capitalistica subì una serie di trasformazioni e un'ondata di rinnovamento tecnologico tali, da parlare di seconda rivoluzione industriale. In questo contesto, i maggiori sviluppi si ebbero nelle cosiddette industrie giovani, come quella metallurgica, dedicata alla produzione di un nuovo materiale: l'acciaio. Esso è una varietà pregiata di ferro; tecnicamente si tratta di una lega ferro-carbonio che presenta ottimi vantaggi, come l'elasticità congiunta alla resistenza. Gli elevati costi di produzione impedivano di usarlo se non per lame, artiglieria e strumenti di precisione, ma con le innovative tecniche di fabbricazione si riuscì ad abbattere i costi e di conseguenza a produrlo anche su vasta scala. Tra il 1870 e il 1913, il consumo mondiale di acciaio aumentò di 80 volte, trovando svariati campi di applicazione tra cui la costruzione, oltre che di grandi opere civili, quali edifici e ponti, anche di macchine industriali, di utensili domestici, di corazze delle navi da guerra e delle rotaie un tempo di ferro. Si può concludere che, dopo l'età della ghisa, iniziata con la prima rivoluzione industriale, ci fu l'età dell'acciaio, conseguente alla seconda.

Produzione di acciaio in Europa (medie annue in migliaia di tonnellate)							
	Austria-Ungheria	Belgio	Francia	Germania	Italia	Gran Bretagna	Russia
1885-89	340	202	538	1598	75	2859	228
1890-94	555	276	772	2778	73	3194	532
1895-99	966	602	1263	4925	75	4328	1328
1900-04	1171	800	1699	7412	154	5035	2366
1905-09	1756	1373	2647	10.846	458	6091	2614
1910-13	1969	1753	4091	15.342	830	6933	4171

Tabella 14.1: produzione di acciaio in Europa (Giardina, 1997)

Il metallo ha numerosi vantaggi come: la notevole resistenza in proporzione al peso e al volume, la possibilità di assorbire tutte le forme di sollecitazioni, compresa la trazione e la flessione, ed una spiccata duttilità. Il ferro è il più nobile tra i metalli, dotato di una resistenza maggiore rispetto agli altri, può essere

formato senza alcuna perdita nella sua elasticità: martellato, stirato, tagliato, stampato e perforato, limato e molato, oppure fuso e gettato. Finora, si è parlato di acciaio, che è una varietà superiore di ferro, quindi possiede al massimo livello tutte le caratteristiche appena elencate.

Come già detto, l'acciaio è una lega ferro-carbonio, ma per essere tale deve possedere un tenore di carbonio inferiore al 2% e di esso se ne possono distinguere vari tipi, riportati nella tabella 14.2:

Acciaio	Tenore di Carbonio [%]
extra-dolce	< 0,15
dolce	0,15 ÷ 0,25
semiduro	0,25 ÷ 0,50
duro	0,50 ÷ 0,75
durissimo	> 0,75

Tabella 14.2: tipi di acciaio

Dalle prove di trazione e di compressione effettuate su acciai con diverse percentuali di carbonio, si osserva come all'aumentare della percentuale di carbonio, aumenta la resistenza del materiale, ma diminuisce la duttilità, cioè la capacità di allungamento prima della rottura.

Aggiungendo il nichel all'acciaio, si ottiene l'acciaio inossidabile.

I materiali metallici protagonisti delle due rivoluzioni industriali sono la ghisa, il ferro e l'acciaio, distinti l'uno dall'altro proprio per il contenuto di carbonio, presente nelle seguenti percentuali:

- ✓ meno dello 0,1 % nel ferro battuto;
- ✓ tra lo 0,1 % e il 2 % nell'acciaio;
- ✓ tra il 2,5 % e il 4 % nella ghisa.

Quanto maggiore è la quantità di carbonio, tanto più il metallo è duro; viceversa, quanto più è bassa, tanto più il materiale è dolce e quindi facilmente lavorabile. La tenacità, che è l'energia necessaria per la rottura di un materiale sotto un carico statico ed è tipica di un materiale che coniuga una buona resistenza ad una buona duttilità, è massima in corrispondenza di una quantità di carbonio pari all'1,2 % e poi si riduce progressivamente, toccando il valore minimo in prossimità del 3 %. Si può concludere che, la ghisa è dura, ma anche estremamente fragile, mentre il ferro battuto è molto tenero e malleabile. L'uso della ghisa andò affievolendosi

specialmente per elementi strutturali molto caricati, come i piedritti, data l'estrema fragilità del materiale che lo rendeva molto pericoloso.

L'acciaio combina le migliori caratteristiche di entrambi (ghisa e ferro) e, inteso come materiale da costruzione, presenta i seguenti vantaggi:

- 👍 grande resistenza in rapporto al peso e quindi permette di costruire strutture più leggere;
- 👍 comportamento elastico-lineare fino a snervamento;
- 👍 elevata duttilità;
- 👍 flessibilità nell'assemblaggio;
- 👍 velocità di costruzione;
- 👍 disassemblaggio semplice e veloce.

Non bisogna però dimenticare anche i suoi difetti che ad oggi, con l'esperienza di più di un secolo di costruzioni in metallo, si delineano come i seguenti:

- 👎 sensibilità nei confronti dell'azione del vento per la sua leggerezza;
- 👎 tendenza ad una eccessiva deformabilità ed al fenomeno di instabilità, entrambi causati dalla snellezza degli elementi;
- 👎 bassa resistenza ai carichi ciclici;
- 👎 rischio di corrosione in assenza di un rivestimento protettivo;
- 👎 costo elevato.

Il primo edificio con struttura a scheletro in acciaio fu la fabbrica di cioccolato Meunier a Noisiek-sul-Marne, costruita da Jules Saulnier (1828-1900) nel 1873. Dal lui e dalla tecnica costruttiva di tale stabilimento, deriva il nome di "sistema Saulnier", usato per indicare l'accostamento del metallo strutturale con pannelli di cotto riempitivi.

Nel 1889, a New York, venne realizzato il primo palazzo con strutture in acciaio; era il Tower Building, di 10 piani. Nello stesso anno ci fu l'Esposizione Universale di Parigi che divenne un'apoteosi della nuova ingegneria dell'acciaio, grazie soprattutto a due grandiose opere: la Torre Eiffel e la Galleria delle Macchine.

14.2.1 La Torre Eiffel

Le Expo incrementarono notevolmente la capacità di velocizzare le tecniche di costruzione, in quanto era necessario riuscire ad erigere padiglioni espositivi e complesse strutture dimostrative, in tempi molto ristretti. Una di queste fu la torre metallica che “monsieur Eiffel” costruì a Parigi, tra il 1887 e il 1889, come entrata alla fiera mondiale; simbolo dell’età dell’acciaio e del progresso trionfante, svetta ancora oggi nei cieli parigini. L’ingegnere Gustave Eiffel (1832-1923) si specializzò nelle costruzioni metalliche e realizzò opere in tutto il mondo, basti pensare alla stazione ferroviaria e alla casa del



Figura 14.7: Torre Eiffel, Parigi, 1889

governatore da lui progettate in Mozambico. Numerosi sono i ponti ferroviari in ferro che progettò e costruì dall’Europa al Sud-America, tra cui il viadotto di Garabit, sulla Truyère, in Francia: un ponte ad arco, con una campata di 165 metri, costruito con travi reticolari e piloni metallici.

L’opera per cui passò alla storia fu sicuramente la Torre Eiffel che, con i suoi 300 metri di altezza, superò ogni aspettativa e rimase per quaranta anni l’edificio più alto mai costruito. Per la sua costruzione Eiffel fece tesoro dell’esperienza acquisita nella realizzazione dei tanti ponti in ferro, quando aveva testato la resistenza e la duttilità del materiale metallico.

Nel caso della torre, bisognava anche affrontare il problema delle grandi sollecitazioni provocate dal vento, dal cui calcolo ne derivò la scelta del particolare profilo: quattro linee angolari, con un andamento concavo che si flette verso il centro e tende progressivamente a raddrizzarsi, salendo verso la terrazza in sommità.

La torre, riportata in figura 14.7, è suddivisa in 3 piani e poggia su 4 enormi piloni di sostegno, collegati tra loro da 4 grandi arcate, che sembrano contribuire a

scaricare il peso delle 8000 tonnellate a terra, ma in realtà sono elementi decorativi che non fanno parte della struttura portante, ma le sono appesi. Ciò può essere verificato semplicemente osservando l'immagine 14.8, in cui i 4 archi non sono presenti tra gli elementi strutturali della torre in costruzione.



Figura 14.8: la torre in costruzione

Dal punto di vista della metodologia costruttiva, è costituita da un insieme razionalmente progettato di 18038 elementi metallici, prefabbricati in officina ed assemblati in opera con bullonature sostituite poi da rivetti incandescenti, per ottenere alta flessibilità e resistenza con il minimo peso.

Sebbene oggi si consideri come uno dei capolavori dell'ingegneria moderna, al tempo, nessuno fu in grado di cogliere il valore rivoluzionario dell'opera, tanto è vero che Eiffel fu sommerso da miriadi di critiche, anche autorevoli, come quelle degli scandalizzati scrittori Zola e Maupassant e quelle dei polemicisti tecnici che ne presagivano un imminente crollo. A conferma del timore diffusosi tra i parigini, si sa che i proprietari di case nelle vicinanze citarono la ditta Eiffel per danni, non riuscendo più ad affittare le proprie abitazioni; si può dire che le loro paure non erano infondate, dato che il primato in altezza spettava alla torre della cattedrale di Ulm che, progettata per arrivare a 162 metri, riuscì a raggiungerne solo 70. Il sentimento di avversità nei confronti della Torre, definita “la vergogna di Parigi”, destinata ad essere demolita subito dopo l'Expo, era dovuto non solo ai dubbi circa la sua stabilità, ma anche alla diffusa concezione, secondo cui ferro e acciaio erano materiali non autentici, da utilizzare solo per costruire fabbriche, magazzini,

ponti, stazioni ferroviarie e padiglioni, tutti edifici con un ben preciso uso e privi di qualsiasi valore artistico.

L'altezza totale, considerando anche la sua antenna, è di 324 metri e, a seconda della temperatura ambientale, può variare di diversi centimetri a causa della dilatazione del metallo; in particolare durante il caldo estivo si registra un allungamento di 15 centimetri.

Infatti, essendo in generale:

α : il coefficiente di dilatazione termica,

L_0 : la lunghezza iniziale,

ΔT : la variazione termica,

ε : la dilatazione termica,

ΔL : la variazione della lunghezza,

nel caso della torre in acciaio che passa da una temperatura dell'ambiente esterno di -10°C in inverno ai $+40^\circ\text{C}$ in estate, si ottiene:

$$\alpha = 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}$$

$$L_0 = 300 \text{ m}$$

$$\Delta T = 50^\circ\text{C}$$

$$\varepsilon = \alpha \times \Delta T = 0.0005$$

$$\Delta L = \varepsilon \times L_0 = 15 \text{ cm}$$

Ovviamente, data la notevole altezza e la flessibilità della struttura, nelle giornate di vento molto forte, sulla cima della torre si possono verificare sensibili oscillazioni in direzione orizzontale, fino ad un valore di 12 centimetri.

14.2.2 La Galleria delle Macchine

La nuova tecnologia del metallo, applicata alle costruzioni, venne adottata nello stesso anno per realizzare anche la Galèrie des Machines, opera dall'architetto Ferdinand Dutert (1845-1906), con l'assistenza tecnica degli ingegneri Contamin, Pierron e Charton. Adiacente alla Torre Eiffel e, a differenza di essa, demolita nel 1910 come previsto, era un edificio in ferro e vetro lungo 422 metri, largo 117 e alto 47 metri. La grande sala rettangolare presentava una copertura a campata

unica che sorvolava i 117 metri di luce, essendo sorretta da 20 portali trasversali a travatura reticolare in acciaio, configurati come archi a tre cerniere: 2 poste ai due piedi ed 1 in chiave. In tale modo, oltre ad avere l'annullamento del momento flettente in sommità e in corrispondenza degli appoggi a terra, uno dei quali è riportato in figura 14.9, si rendeva la struttura staticamente determinata e quindi in grado di assorbire le variazioni termiche del metallo, senza creare ulteriori stati tensionali. Per la prima volta veniva costruita un'armatura metallica senza travi né pilastri, ma con capriate che riuscivano a reggere una pressione di 412 tonnellate e una spinta di 115 ciascuna. Come nella Torre Eiffel, i portali erano ottenuti assemblando in opera profili e piastre prefabbricati.



Figura 14.9: particolare della cerniera di attacco a terra (Gympel, 1999)

Da evidenziare che, oltre ad essere uno dei capolavori dell'età dell'acciaio, fu la progenitrice di molti edifici industriali costruiti nel XX secolo.



Figura 14.10: esterno della Galleria delle Macchine, Parigi, 1889 (demolita nel 1910)

14.2.3 Le travature reticolari

Si riporta in figura 14.11 un disegno del già citato Villard de Honnecourt, raffigurante un ponte sopra un corso d'acqua, realizzato con tronchi lunghi “venti piedi”, secondo quanto è scritto nel suo taccuino.

Tali elementi strutturali misurano 6-7 metri e, assemblandoli insieme, i costruttori medievali riuscivano ad ottenere travi di luce molto maggiore, come nel caso disegnato, in cui il ponte si avvicinava ai 20 metri. In un'epoca come quella medievale, teatro di



Figura 14.11: ponte in legno, dal foglio 17 del Taccuino di Villard, XIII sec. d.C. (Sparacio, 1999)

feroci deforestazioni e di capacità di trasporto limitate, una tecnica costruttiva che consentisse di utilizzare tronchi di piccole pezzature, addirittura ricavabili da rami, doveva essere molto apprezzata. Infatti, questa soluzione poteva ed era sicuramente sfruttata, oltre che nella costruzione di ponti, anche nelle cattedrali gotiche per realizzare la struttura lignea al di sopra delle volte murali, posta a sostegno del manto di tegole.

Lo schema statico di tale ponte in legno è quello della *travatura reticolare*, cioè una struttura composta da una serie di membrature ad asse rettilineo, appartenenti ad uno stesso piano, definite *aste*, che convergono tra loro in punti chiamati *nodi*, considerati delle cerniere, cioè vincoli che permettono le rotazioni relative. La travatura reticolare, sottoposta a carichi concentrati nei nodi, è una struttura isostatica che risulta soggetta a soli sforzi normali. Tutte le aste sono quindi sede di uno sforzo normale di trazione o di compressione e sono elementi portanti distribuiti secondo uno schema ottimale per la trasmissione dei suddetti sforzi, dalla cui determinazione in modulo e in segno deriva il dimensionamento degli elementi stessi. Per esempio, gli elementi soggetti a compressione, definiti *puntoni*, saranno di sezione maggiore rispetto agli elementi tesi, soggetti al medesimo sforzo in modulo, ma di segno opposto, chiamati *tiranti*. Questo è una conseguenza del problema di instabilità dell'equilibrio, cioè del pericolo di inflessione laterale per elementi soggetti a compressione, che il tedesco Eulero

(1707-1783) affrontò per primo nella forma generale, nella seconda metà del Settecento.

Le travi reticolari quindi, nascono dall'assemblaggio di elementi-modulo di piccole dimensioni che, disposti secondo un disegno razionalmente studiato, permettono di ottenere una struttura molto più grande delle singole unità componenti. Per questo motivo, sono da sempre utilizzate per realizzare opere di grande luce (20 ÷ 30 metri), quali ponti stradali, ferroviari e grandi coperture.

Come dimostrato dal Taccuino di Villard, in passato si realizzavano in legno, ma in seguito allo sviluppo dell'industria siderurgica, si cominciò ad utilizzare anche il ferro, come nella trave Burr risalente al 1804, riportata in figura 14.12.

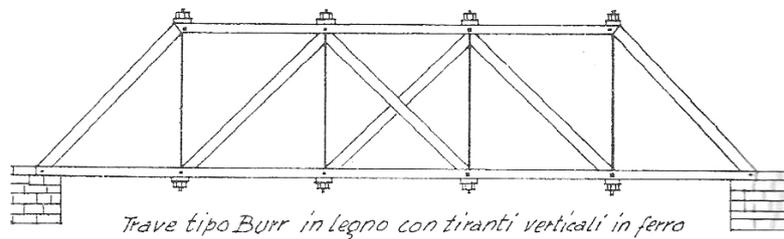


Figura 14.12: trave Burr (Caleca, 2000)

Poiché il legno era più leggero e meno costoso, il ferro venne dapprima usato come suo sostituto solo nelle aste tese, ma grazie allo sviluppo industriale si passò a costruire l'intera reticolare in metallo, specialmente con profilati in acciaio, data la loro resistenza a trazione di oltre un ordine di grandezza superiore.

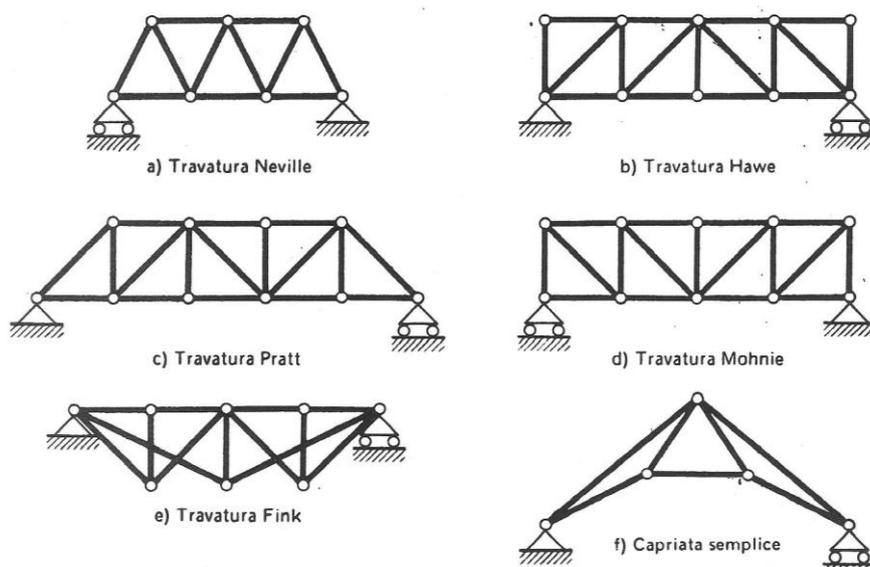


Figura 14.13: esempi di travi reticolari (Viola, 1993)

14.3 I primi grattacieli

A fine Ottocento, Chicago subì una crescita economica senza precedenti e divenne la metropoli dominante della costa centro-occidentale degli Stati Uniti, passando dai 30000 abitanti nel 1850, a più di un milione nel 1890. In seguito all'incendio disastroso del 1871, ci fu un forte sviluppo nel settore edile, finalizzato alla realizzazione di palazzi sempre più alti e al contempo sempre più sicuri, dotati di opportune misure preventive contro i pericoli di incendio. Numerosi furono gli ingegneri che, a cavallo tra il XIX e XX secolo, contribuirono a rendere Chicago la metropoli del futuro e a dotarla dell'architettura più all'avanguardia del mondo, sfruttando le nuove tecniche costruttive e i materiali moderni. Tale primato venne legittimato grazie ai lavori degli appartenenti alla *Scuola di Chicago*, che costruirono i tanti grattacieli del quartiere Loop, moderno centro di affari con uffici, grandi magazzini ed alberghi.

Da non dimenticare che furono anche i progressi tecnologici nel campo degli ascensori, verificatisi dopo il 1950, a permettere lo sviluppo dei grattacieli.

14.3.1 Le Baron Jenney

Dato che le costruzioni metalliche, realizzate poco prima dell'incendio, si erano letteralmente liquefatte tra le fiamme, evidenziando la loro scarsa resistenza al fuoco, si cercò in alcuni casi di ritornare all'utilizzo della muratura, come nella costruzione del Montauk Block del 1882 e del Monadnock Building nel 1891, realizzati entrambi da Burnham e Root. Il mattone si dimostrò subito poco adatto poiché, le sue scarse caratteristiche meccaniche obbligavano a realizzare alla base muri spessi oltre due metri per sostenere i tanti piani, occupando troppo spazio. Le superfici edificabili divenivano infatti sempre più rare e costose ed era necessario sfruttare al massimo la superficie di terreno disponibile, minimizzando quanto più possibile le strutture resistenti e lasciando liberi gli ambienti per appartamenti, negozi ed uffici. L'utilizzo dell'ossatura portante in metallo era quindi inevitabile per permettere lo sviluppo in altezza degli edifici, senza gli eccessivi spessori dei

muri portanti, ma doveva essere opportunamente rivestita per rendere lo scheletro resistente al fuoco. L'acciaio è infatti il materiale strutturale con la più alta resistenza per superficie totale, ma tale resistenza si riduce drasticamente in caso di incendio, in quanto a temperature alte (oltre i 600°C), il suo modulo elastico si abbatte e il materiale entra in fase plastica deformandosi vistosamente, fino al crollo della struttura. Lo si può e lo si deve proteggere, ricoprendolo con isolanti resistenti al fuoco, come mattoni pieni o forati, calcestruzzo, cartongesso, oppure spruzzandogli sopra vernici piro-ritardanti.

Lo scheletro metallico è stato utilizzato per la prima volta nei grattacieli di Le Baron Jenney (1832-1907): il First Leiter Building del 1879 ed il Second Leiter Building di 12 anni dopo. Il primo è sorretto da colonne in ghisa che assicurano una maggiore superficie interna utilizzabile, come si vede dal confronto della pianta del piano terra con quella del Monadnock Building, nelle figure 14.14 e 14.15.

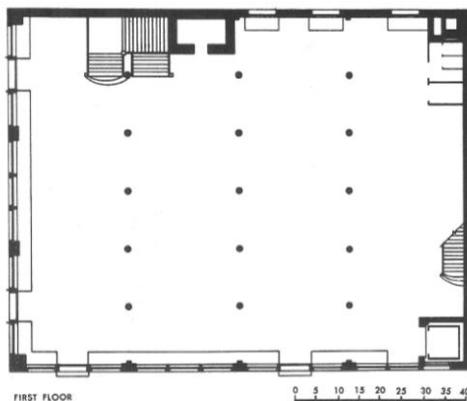


Figura 14.14: pianta del Primo Leiter Building, 1879 (Izzo e Gubitosi, 1975)

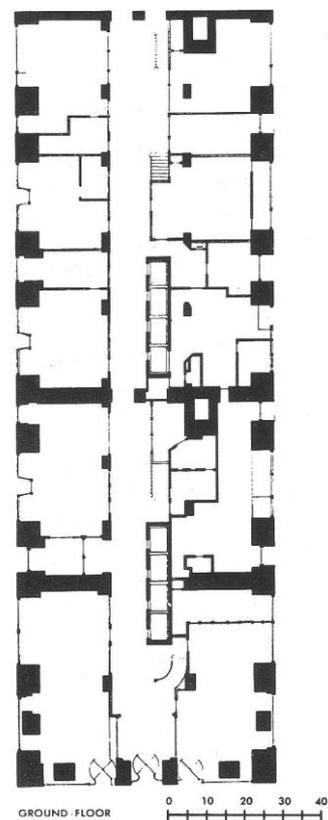


Figura 14.15: pianta del Monadnock Building, 1891 (Izzo e Gubitosi, 1975)

L'edificio era esternamente dotato di un rivestimento che ricopriva gli elementi portanti verticali e trasversali, realizzando così un reticolo con vuoti riempiti da grandi finestre. Come nel Secondo Leiter Building, il rivestimento esterno di pietra viva che ricopriva la struttura in metallo, realizzata in acciaio Bessemer, garantiva la resistenza al fuoco dell'edificio. La maggiore opera di Jenney fu l'Home Insurance Building, un palazzo di 10 piani realizzato nel 1884-85 e poi demolito nel 1931, riportato nella foto d'epoca di figura 14.16. Definito anche

esso *skyscraper*, poiché tale denominazione era attribuita ad edifici anche di 8-9 piani, era realizzato con uno scheletro in acciaio, dotato anche di travi in ferro a cui erano bullonate mensole in ghisa, che sostenevano il peso del tamponamento esterno in muratura.



Figura 14.16: Home Insurance Building, Chicago, 1884-85 (Watkin, 1999)



Figura 14.17: Tacoma Building, Chicago, 1887-89 (Watkin, 1999)

Prendendo spunto dalle tecniche innovative apprese lavorando nello studio di Jenney, Holabird e Roche realizzarono nel 1887-89 il Tacoma Building (figura 14.17), dove introdussero un nuovo sistema per le fondazioni. Infatti, data la natura sabbiosa e paludosa del terreno di Chicago, scelsero di fondare l'edificio su zattere in cemento armato. Si definiva, in tal modo, il nuovo tipo edilizio del grattacielo, con struttura metallica, fondazioni a zattera ed ampie vetrate continue, chiamate *bay-windows*.

14.3.2 Henry Sullivan

Henry Sullivan (1856-1924) fu allievo di Jenney e, con la collaborazione di Dankmar Adler (1844-1900), costruì tra il 1887 e 1889 il Chicago Auditorium Theater and Hotel Building. Tale costruzione non si può definire un grattacielo, ma si cita poiché presenta una struttura molto interessante, caratterizzata da un dualismo costruttivo. Infatti, il massiccio edificio che ospita un teatro, un albergo e un corpo per uffici, è dotato sia di facciate in muratura portante rivestita di

granito e arenaria, sia di un'ossatura interna in ghisa e ferro, che regge i carichi dei pavimenti, della volta e della copertura del teatro. Nelle costruzioni successive, i due progettisti abbandonarono tale duplice struttura portante e scelsero di realizzare lo scheletro portante interamente in acciaio. Questo accadde per il Wainwright Building di St.Louis, concluso nel 1891, in cui ai pilastri portanti in acciaio, rivestiti in mattoni, vennero interposti pilastri non portanti in muratura, ricoperti esternamente come i precedenti per accentuare la verticalità dell'edificio; e per il Guaranty Building di Buffalo, a New York, di fine secolo che, come si può notare dalla sua immagine in figura 14.18, era articolato secondo il modello di una colonna classica: *base*, dedicata ai negozi, *fusto* per abitazioni ed uffici e *capitello decorato* riservato agli impianti tecnici, parte dei quali era anche nei sotterranei.



Figura 14.18: Guaranty Building, New York, 1894-96 (Watkin, 1999)

14.3.3 Daniel H. Burnham

Altro grande esponente della Scuola di Chicago fu Daniel H. Burnham (1846-1912), autore dei palazzi in mattone citati in precedenza, insieme a John W. Root (1850-1901).

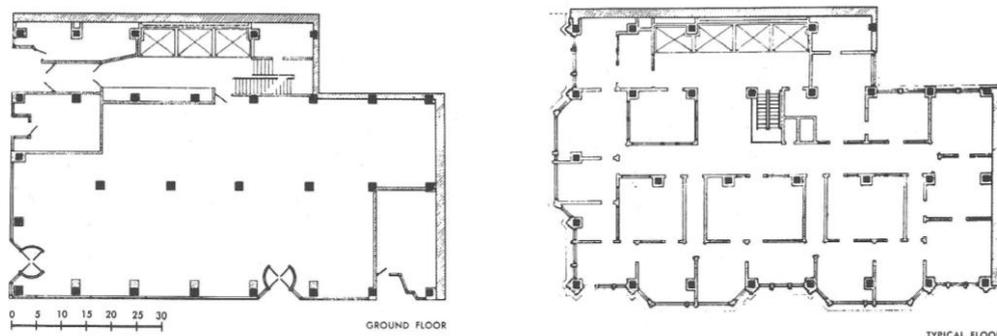


Figura 14.19: pianta del Reliance Building, Chicago, 1890-95 (Izzo e Gubitosi, 1975)

Tra le tante opere che la coppia realizzò, si cita anche il Reliance Building di Chicago costruito tra il 1890 e il 1895, su una struttura interamente in acciaio, con una disposizione regolare di colonne portanti, come si può vedere nella pianta di piano terra e di un piano tipo, riportate in figura 14.19.



Figura 14.20: Reliance Building,
(Izzo e Gubitosi, 1975)

Tale imposizione, dettata dalla società Fuller Construction, che ne fece la propria sede, mise in luce la capacità di Burnham di utilizzare in maniera ottimale una superficie limitata. Il grattacielo, raffigurato nell'immagine 14.21, presenta un telaio portante interamente in acciaio e rivestimenti esterni in pietra calcarea e pannelli di terracotta. Fin dal 1902, anno della sua costruzione, venne dotato di una centrale termica per il riscaldamento degli interni, di ascensori per persone e di un sistema antincendio.

Similmente a quanto accadde nel medioevo per le cattedrali gotiche, una competizione a distanza che prevedeva la rincorsa alla massima altezza, si instaurò tra Chicago e New York e proprio a New York, Burnham realizzò ad inizio secolo un grattacielo di 22 piani: il famoso Flatiron Building. Con i suoi 95 metri di altezza fu il più alto edificio della città e rimase tale dal 1902 al 1909. La sua fama deriva anche dalla sua particolare forma definita, proprio come suggerisce il nome inglese, *a ferro da stiro*, dovuta alla necessità di costruirlo in un lotto a spigolo molto acuto, all'incrocio tra la Fifth Avenue e la Broadway di Manhattan.

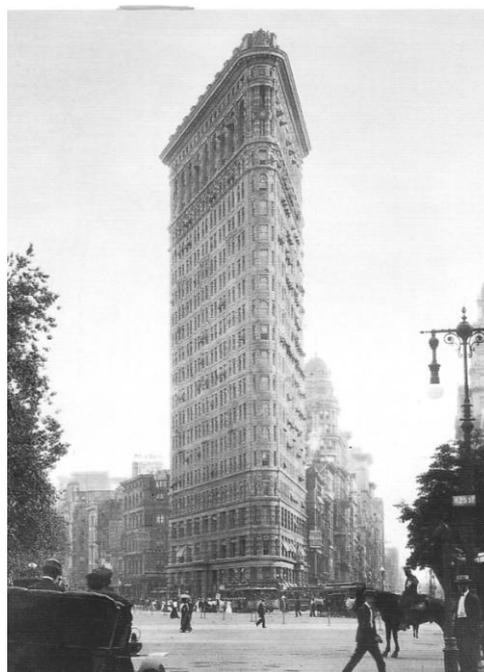


Figura 14.21: Flatiron o Fuller Building,
New York, 1902 (Gympel, 1999)

14.4 Sviluppi delle strutture in acciaio nel Novecento

L'utilizzo dell'acciaio nel corso del XX secolo ha permesso la realizzazione di strutture prima inimmaginabili sia in termini di dimensioni, sia in termini di forma. Protagonisti indiscussi della storia delle costruzioni metalliche del Novecento sono stati Richard Buckminster Fuller e Frei Paul Otto; entrambi dediti alla sperimentazione di nuove soluzioni strutturali che permettessero di coprire spazi sempre più ampi senza sostegni intermedi, sfruttando le proprietà di resistenza e leggerezza dell'acciaio, quindi protesi verso nuove forme architettoniche, rese possibili dalle strutture reticolari spaziali. Si spinsero oltre i sistemi strutturali tradizionali, lavorando rispettivamente con cupole geodetiche e con tensostrutture, ma le loro strade professionali si incontrarono più volte: entrambi furono insegnanti all'Università di Washington a St. Louis verso la fine degli anni Cinquanta ed entrambi realizzarono capolavori per la Expo di Montreal del 1967.

14.4.1 Richard Fuller

Per quanto riguarda il settore edilizio, l'eccentrico Richard Fuller (1895-1983) si dedicò alla realizzazione delle *cupole geodetiche*; alcune delle quali, di diametro anche maggiore di 200 metri, si trovano attualmente negli Stati Uniti e in Giappone, ed addirittura in Italia: un esemplare donato dallo stesso Fuller alla città di Spoleto, nel 1967.

Non si può dire che Fuller sia stato a tutti gli effetti l'inventore della cupola geodetica, anche se ne mise appunto il sistema costruttivo e ricevette il brevetto americano nel 1954, con il quale permise la realizzazione di 300000 cupole geodetiche in 30 anni. Infatti, il primo esempio di cupola geodetica è stato costruito nel 1922, dalla ditta Dykerhoff and Wydmann, per il Planetarium degli impianti Zeiss, a Jena.

Fuller condusse numerosi esperimenti ed approfondite ricerche sulla nuova struttura a rete metallica, da lui stesso indicata come *geodetica*, e ricevette

l'incarico dal governo americano di costruire cupole per l'installazione dell'esercito, tramite l'utilizzo di modelli prefabbricati trasportabili in elicottero. Infatti, il progetto visionario di Fuller era quello di una industria per la costruzione di case geodetiche di tipo aerospaziale, che realizzava le abitazioni in un cantiere fisso e poi le trasportava in sito per via aerea.

Con la Cupola della Union Tank Car Company a Baton Rouge del 1958, Fuller risolse il problema della instabilità rispetto ai carichi asimmetrici e in particolare all'azione del vento, passando da uno a due reticoli di aste e aumentando così la rigidezza complessiva contro sbandamenti improvvisi. Tale cupola



Figura 14.22: cupola geodetica a Baton Rouge, 1958 (www. Federica.unina.it)

geodetica, riportata in figura 14.22, presenta un diametro di 118 metri ed è per questo la più grande costruita dallo statunitense, anche se non ha la stessa importanza della più piccola cupola di Montreal, rappresentata in una foto d'epoca in figura 14.23. Tale cupola geodetica, presentata al grande pubblico come padiglione degli Stati Uniti all'Expo canadese del 1967, gli diede fama internazionale.

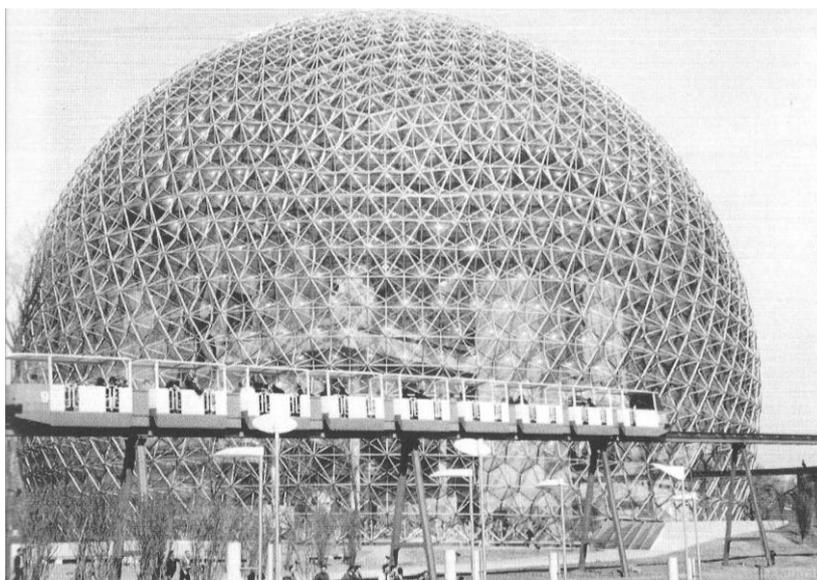


Figura 14.23: cupola geodetica di Montreal, 1967 (Bussagli, 2003)

Fuller auspicava che la cupola geodetica contribuisse a risolvere il problema della mancanza di alloggi nel secondo dopoguerra, ma la sua idea non riscontrò molto successo nel mercato delle abitazioni, a causa della difficoltà di adattare alla cupola le finiture tradizionali quali porte, finestre, camini ed impianti. Altra motivazione che ne impedì la larga diffusione come tipo edilizio fu il maggior costo dovuto alla complessità progettuale; infatti la sua analisi statica risulta difficoltosa e, ancora oggi, a causa anche dei problemi di instabilità, l'andamento delle sollecitazioni di trazione e di compressione negli elementi non è del tutto chiaro e per questo i costruttori tendono a standardizzarle in modelli dalle dimensioni prefissate.

14.4.1.1 La cupola geodetica

Per definizione la *geodetica* è la linea di minima lunghezza che collega due punti di una superficie, giacendo per intero sulla superficie e, proprio lungo tali linee si distribuiscono spontaneamente gli sforzi, secondo quel principio di economia tanto caro al mondo della natura. Se quindi si riuscisse a disporre gli elementi resistenti, solamente lungo tali percorsi, si eviterebbe di sprecare del materiale inutile ai fini statici, ottimizzando la struttura; proprio questo cercò di fare Fuller. Egli disegnava la complessa geometria della cupola geodetica a partire dalla proiezione sulla sfera dei vertici di un *icosaedro*; si tratta del solido platonico formato da 20 facce, a forma di triangolo equilatero, che può essere ulteriormente complicato geometricamente arrivando al *tronco-icosaedro*, quel solido archimedeo, caratterizzato da 32 facce, di cui 12 a forma di pentagono e 20 di esagono. Se si fa crescere il diametro dello sferoide, aumentando ancora il numero delle facce e riducendo il numero dei pentagoni, si ottiene un'alternanza di triangoli isosceli ed equilateri. Si può dire quindi che, una cupola geodetica è una struttura composta da una rete di travi giacenti su dei cerchi massimi, chiamati *geodetiche*, che si intersecano formando triangoli simili tra loro e disposti approssimativamente sulla superficie di una sfera. I moduli triangolari garantiscono una elevata rigidità locale data dalla loro forma, mentre le linee geodetiche contribuiscono a distribuire gli sforzi in maniera uniforme, per garantire l'ottimizzazione degli elementi strutturali. Sebbene sia costruita con

elementi lineari, la sua struttura “omnitriangolare” la rende intrinsecamente stabile ed estremamente resistente rispetto al proprio peso, permettendole di racchiudere il massimo volume possibile con la minima superficie. Si annovera come l'unica struttura costruita dall'uomo che diventa proporzionalmente più resistente all'aumentare delle dimensioni, cioè risulta tanto più resistente quanto più è grande.

Le caratteristiche di leggerezza e stabilità proprie delle cupole geodetiche non si ritrovano nelle tradizionali costruzioni a forma di parallelepipedo, realizzate con travi, pilastri e solai, molto più pesanti e meno stabili. Inoltre, la forma aerodinamica le assicura una buona resistenza anche nei confronti del carico vento e la tecnica di prefabbricazione degli elementi modulari consente di rendere estremamente rapidi i tempi della sua costruzione.

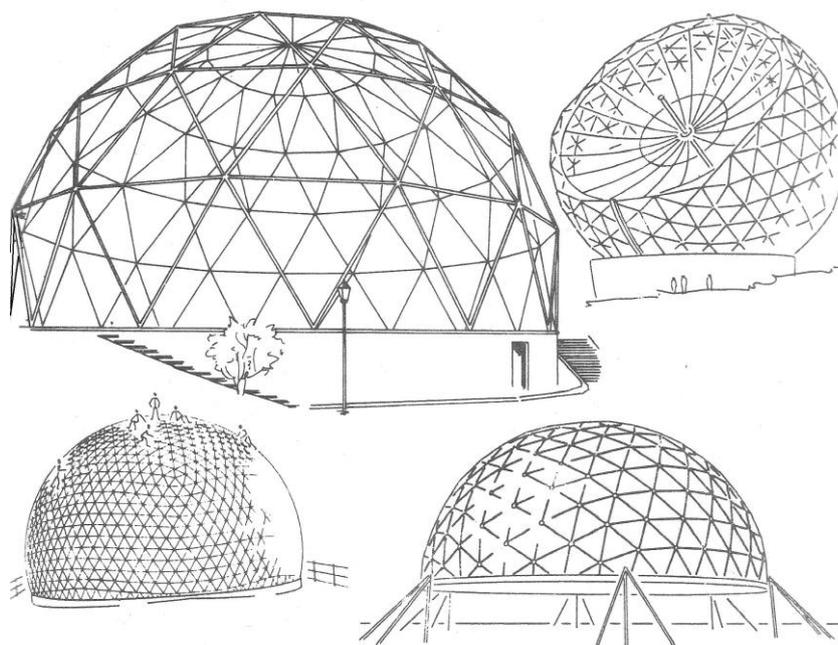


Figura 14.24: tipi di cupole reticolari metalliche (Caleca, 2000)

La cupola geodetica appartiene alla categoria delle volte a struttura metallica ed in particolare è un esempio di sistema reticolare spaziale che, come si vede dalla figura 14.24, permette di racchiudere uno spazio tramite la ripetizione di moduli aventi la medesima struttura. L'ossatura spaziale è in grado di coprire grandi spazi senza pilastri intermedi e di resistere ad un carico applicato in qualsiasi direzione,

disperdendolo lungo il sistema di aste, disposte in modo da creare una maglia spaziale di triangoli rigidi.

Non mancano esempi di strutture reticolari spaziali realizzate con profilati, come il padiglione Krupp dell Fiera di Hannover, ma di solito si adottano tubi in acciaio a sezione circolare, per i tanti vantaggi che comportano. Infatti:

- 👍 hanno una maggiore resistenza al carico di punta rispetto ad un profilato qualsiasi di pari sezione;
- 👍 sono caratterizzati da un momento di inerzia costante rispetto ad ogni asse di simmetria;
- 👍 oppongono minore resistenza al vento, data la minore superficie laterale;
- 👍 consentono un collegamento più facile delle estremità delle aste ai nodi, con piastre di ancoraggio e schiacciando le estremità;
- 👍 permettono minori spese di manutenzione grazie al dimezzarsi della superficie da verniciare rispetto i profilati tradizionali;
- 👍 sono più leggeri comportando una diminuzione del 30% del peso proprio;
- 👍 consentono un risparmio di circa il 10% sul costo complessivo per la costruzione.

Il maggiore svantaggio dei tubi metallici è che, per evitare l'ossidazione interna, si dovrebbero chiudere ermeticamente saldandoli alle estremità, ma tale saldatura è difficoltosa e spesso si creano fessure capillari che permettono al vapore acqueo di entrare ed innescare il processo di ossidazione.

14.4.1.2 La cupola geodetica di Montreal

La cupola geodetica di Montreal ha un diametro di 76 metri e si differenzia dalle altre anche per la quota sensibilmente più bassa alla quale viene effettuata la sezione della sfera. Tale diversa forma geometrica, che la rende pari a 7/10 di una sfera, comporta una diversa distribuzione degli sforzi: la porzione di cupola alla base è prevalentemente compressa, mentre la parte più alta è inflessa. Ovviamente, le aste tubolari della struttura reticolare spaziale risultano sollecitate

da soli sforzi normali e per ridurre il più possibile il peso della cupola, Fuller ha cercato di minimizzare il numero di aste compresse. È stata realizzata con moduli prefabbricati triangolari in acciaio che permettono una estensione notevole della copertura in cui, data la giacitura dei cerchi paralleli, realizzò due sistemi di aste, ruotate di circa 30° rispetto ai meridiani, a formare la caratteristica maglia triangolare.

Attualmente, la struttura è ancora esistente ed è stata ribattezzata con il nome di Biosfera di Montreal ma, come dimostrato dall'immagine

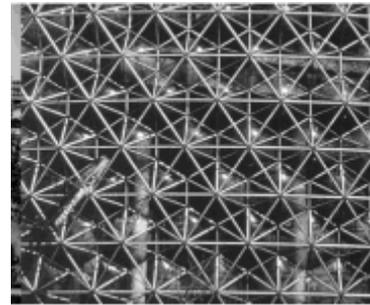


Figura 14.25: particolare delle lenti in plexiglass (www. Federica.unina.it)

14.26, non è più dotata dell'originale rivestimento in plexiglas, poiché distrutto da un incendio. Prima che venissero bruciate le lenti di forma esagonale, realizzate in plastica acrilica, coprivano l'intera superficie della cupola ed erano quasi tutte dotate di un sistema di regolazione dell'ingresso della luce, per mantenere condizioni climatiche favorevoli all'interno dell'ambiente.

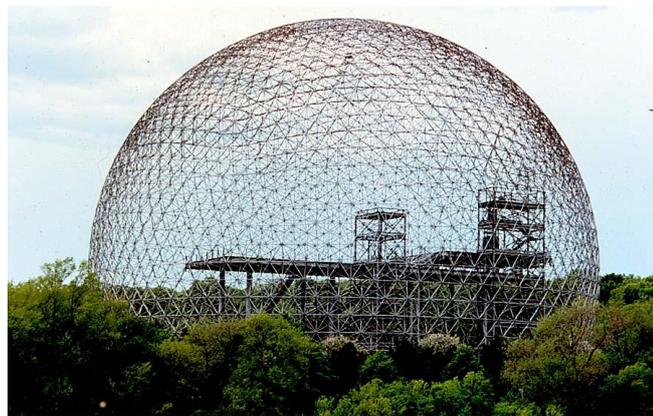


Figura 14.26: Biosfera di Montreal

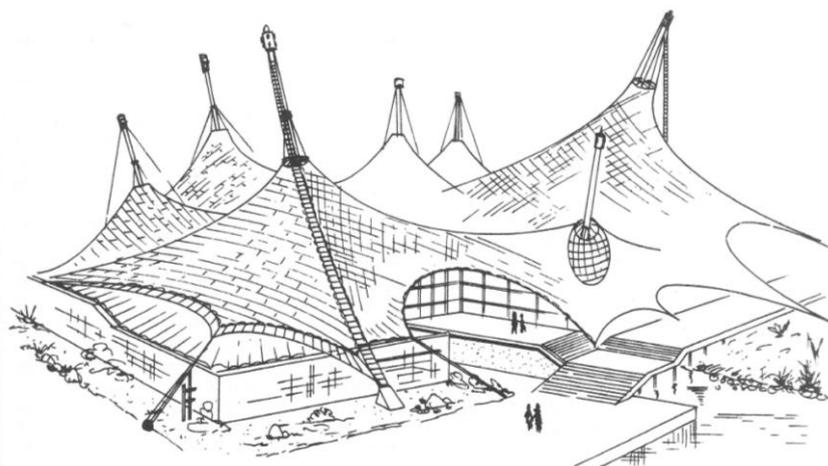
14.4.2 Frei Otto

Il tedesco Frei Paul Otto è nato il 31 maggio 1925 ed è uno dei maggiori esponenti mondiali di strutture leggere ed in particolare di tensostrutture, ovvero membrane tese sostenute da una struttura reticolare leggera che permettono di coprire ampie

luci. Questa passione deriva dalla storia personale dell'architetto che, in seguito alla crisi degli alloggi e alla mancanza di materiali da costruzione dovuta al secondo conflitto mondiale, cominciò a pensare alla possibilità di realizzare grandi tende sospese con funzione di riparo.

Dopo la guerra andò negli Stati Uniti, dove conobbe le opere di Mendelsohn, Mies van der Rohe, Neutra e Wright e, a partire dal 1952, cominciò la propria carriera professionale che lo portò a fondare il famoso istituto per le strutture leggere all'università di Stoccarda, nel 1964.

I suoi progetti più importanti sono stati il padiglione della Germania Occidentale alla Expo di Montreal nel 1967, riportato in figura 14.27, e nel 1972 il Parco Olimpico di Monaco di Baviera, di cui fa parte il famoso Olympiastadion.



**Figura 14.27: padiglione della Germania Occidentale, 1967
(Caleca, 2000)**

14.4.2.1 Volte a cavi tesi

Con il termine di tensostrutture si indicano quelle strutture che resistono ai carichi tramite cavi di acciaio che, appesi a sostegni rigidi, lavorano sottoposti solamente a trazione. Tale sistema strutturale ha avuto recentemente una grande diffusione, ma la sua origine è molto antica, come dimostrano le tende delle tribù nomadi che, infiggendo nel terreno un palo di legno come supporto, fissavano ad esso pelli animali che, vincolate lungo il perimetro di base, risultavano tese e costituivano una superficie continua assimilabile ad un tronco di cono.

In particolare, ci si occupa ora delle *volte sottese* o dette anche *a cavi tesi* che, come le tende sospese, sono delle coperture appese a sostegni rigidi. La

caratteristica fondamentale è che, data la loro estrema leggerezza, il peso proprio risulta trascurabile rispetto alle azioni di vento e neve quindi, a differenza di quanto avviene nelle altre strutture, nel calcolo è necessario tenere in considerazione che i carichi variabili sono predominanti rispetto ai carichi permanenti. A conferma del ridotto peso degli elementi strutturali, si ricorda come in una copertura di 100 metri di luce la quantità di acciaio impiegata è pari a:

- ✓ 150 Kg/m² per volte a struttura metallica;
- ✓ 6÷7 Kg/m² per volte sottili in c.a.;
- ✓ <6 Kg/m² per volte a cavi tesi.

I cavi tesi sono delle funi sollecitate a trazione, costituenti le armature resistenti, e perciò devono essere realizzati con materiali dotati di una spiccata resistenza a trazione e di un ridotto peso specifico. Si riporta una tabella redatta da Frei Otto in cui, per ogni tipo di materiale, è indicato il carico di rottura (σ), il peso specifico (γ) e il loro rapporto (RKm) che è una caratteristica fisico-meccanica chiamata *lunghezza di rottura*. In particolare, con riferimento al materiale maggiormente adottato nelle strutture a cavi tesi, cioè l'acciaio, un filo con $\sigma = 200 \text{ Kg/mm}^2$ e $\gamma = 7,8 \text{ g/cm}^3$, per effetto del peso proprio, si rompe quando raggiunge una lunghezza di 26,5 Km se è appeso ad una sola estremità, mentre se è appeso ad entrambe le estremità la lunghezza di rottura è di 37 Km ($I_{\max} = 1,39 \times \text{RKm}$). Rispetto a quella del tedesco, nella tabella 14.3, si è aggiunta l'ultima colonna con indicato il valore del rapporto (r) tra la lunghezza di rottura di ciascun materiale e la lunghezza di rottura dell'acciaio.

Materiale	σ [Kg/mm ²]	γ [g/cm ³]	RKm [Km]	I_{max} [km]	r
piombo	1,7	11,4	0,15	0,2	0,005
fili di alluminio	17	2,7	6,5	9	0,24
acciaio 52	52	7,8	6,7	9,2	0,25
duralluminio	50	2,8	18	25	0,68
legno di pino	10	0,5	20	28	0,75
fili di acciaio	200	7,8	26,5	37	1
seta	-	-	45	-	-
cotone	-	-	26-40	-	-
cemento (precompresso)	6	2,2	2,7	3,7	0,1

Tabella 14.3: lunghezze di rottura di alcuni materiali (da Caleca, 2000)

Le volte sottese possono essere delle seguenti tipologie:

1. *a semplice curvatura*, come una tenda rettangolare fissata a sostegni rigidi lungo i due lati opposti che, sottoposta al solo peso proprio, assume la curvatura della catenaria;
2. *a doppia curvatura*, come una tenda appesa ai quattro angoli o ad un numero maggiore di sostegni posti lungo il bordo;
3. *piane presollecitate*, come la pelle di un tamburo tesa perfettamente ed ancorata lungo il contorno.
4. *presollecitate a forma di sella*, paragonabili ad una sella da cavallo, quindi dotate di una doppia curvatura, una longitudinale e l'altra trasversale, con centri di curvatura opposti rispetto alla superficie.

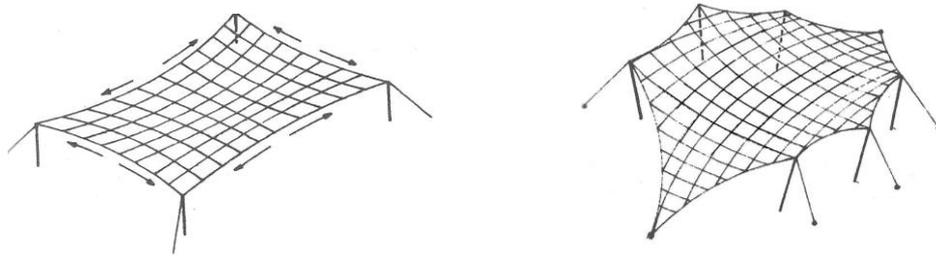


Figura 14.28: esempi 2 e 4 di volte a cavi tesi (Caleca, 2000)

14.4.2.2 Coperture dello Stadio di Monaco

Il progetto di Otto Frei per la copertura degli impianti sportivi dell'Olympiapark di Monaco, realizzato tra il 1968 e il 1972, si estende per un'area di quasi 75000 m² e si caratterizza per una successione di tende realizzate con pannelli di vetro acrilico, fissate a piloni tramite tiranti. Tale leggera copertura ricopre la tribuna principale dello Stadio Olimpico, l'Olympic Hall e la Piscina Olimpica, nonché tutte le zone di servizio tra questi impianti e l'ingresso al villaggio olimpico.

In particolare, la copertura dello Stadio Olimpico, riportata in figura 14.29 e realizzata in collaborazione con l'architetto Rolf Gutbrod, è un grandioso esempio di *volta sottesa presollecitata a forma di sella*. Questo tipo di copertura a cavi tesi è la più importante tra le 4 precedentemente elencate, in quanto permette di sormontare la più ampia luce con il minor peso possibile della struttura. L'armatura è costituita da cavi presollecitati allineati lungo le due direzioni di curvatura, per assorbire le sollecitazioni principali di trazione. A differenza degli

altri tipi di volte sottese, questa non subisce elevate deformazioni dovute ai carichi non uniformi o al vento, poiché la presollecitazione dei cavi consente una ripartizione uniforme dell'azione su tutta la superficie della membrana.

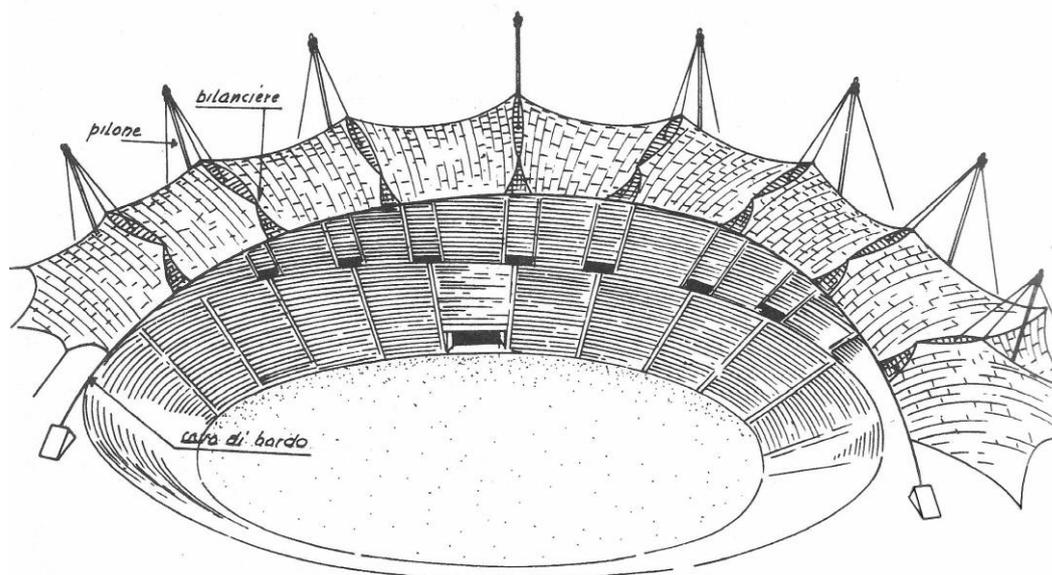


Figura 14.29: Stadio Olimpico di Monaco, 1968-72 (Caleca, 2000)

Nel caso dello stadio di Monaco, Otto Frei non ha usato un perimetro rigido per ancorare i cavi, come nella copertura dell'Arena di Railegh di Matthew Nowicki del 1953 riportata in figura 14.30, ma dei sostegni discontinui compressi (*piloni*). Infatti, essi risultano caricati assialmente poiché i cavi in tensione che sostengono sono bilanciati da altri tiranti ancorati alla fondazione, come si vede dalla figura 14.31.

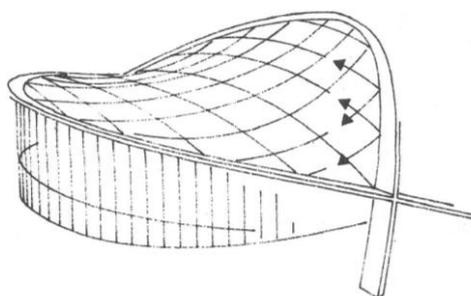


Figura 14.30: Arena di Raleigh, 1953 (Caleca, 2000)

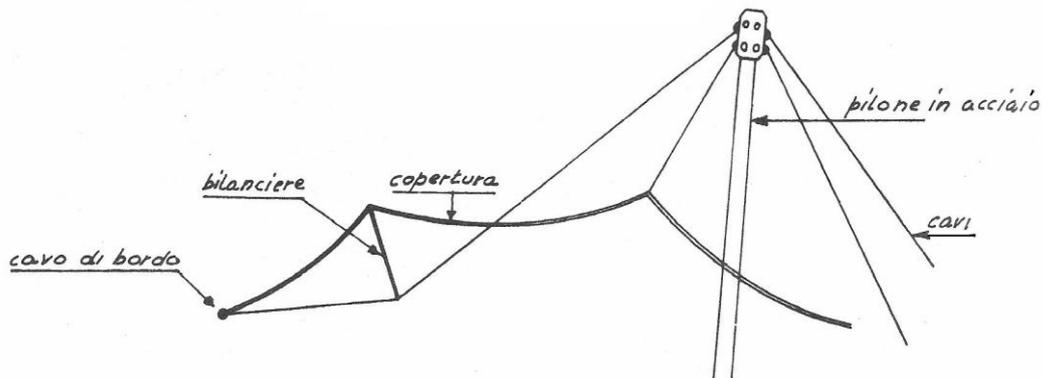


Figura 14.31: particolare della struttura di copertura, Stadio Olimpico (Caleca, 2000)

In pratica, i piloni di sostegno non sono incastrati alla base e quindi non sono sollecitati a presso-flessione, ma sono incernierati e risultano pertanto solamente compressi, come si vede dall'immagine 14.32. Le fondazioni dovranno essere di doppio tipo: quelle A soggette a trazione, che devono trattenere i cavi senza alzarsi e quelle B compresse, che devono evitare lo sprofondamento del pilone nel terreno.

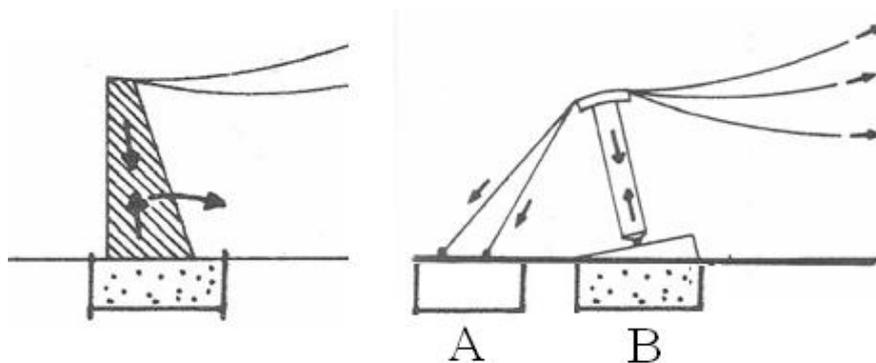


Figura 14.32: sostegni incastrati ed incernierati alla base (da Caleca, 2000)

Durante i lavori, i cavi pre-tesi sono stati prima montati ai piedi dei piloni, e poi innalzati alla quota prevista da progetto. La maglia venutasi a creare è poi stata ricoperta da pannelli in vetro acrilico, collegati tra loro ed ancorati con supporti-cuscinetto.

La sottile copertura a tenda in materiale plastico traslucido, apparentemente sospesa come una bolla di sapone sopra le tribune, permette alla luce di penetrare, ma al contempo protegge gli spettatori dalle intemperie atmosferiche.



Figura 14.33: particolare della copertura delle tribune, Stadio Olimpico di Monaco, 1968-72

In conclusione, le opere di Frei Otto sottostanno al principio strutturale della massimizzazione degli elementi tesi rispetto a quelli compressi tipico delle tensostrutture che rappresentano, sotto questa ottica, l'opposto strutturale dell'arco in pietra.

Addirittura, rispetto alle tensostrutture precedenti, Frei Otto ha compiuto un passo in avanti:- egli riuscì a proporre schemi di equilibrio di questi tessuti spaziali riducendo al minimo gli elementi d'appoggio lavoranti a compressione e cercando di riportare a terra i carichi eminentemente attraverso reazioni di appoggio negative, ossia mediante vincoli ancora sollecitati a trazione. In tal modo poté evitare i complessi problemi flessionali che fatalmente si verificano negli archi o negli anelli di bordo-. (Pizzetti e Zörgno Trisciunglio, 1980)

15. LE STRUTTURE IN CALCESTRUZZO ARMATO

15.1 Il calcestruzzo armato

Il calcestruzzo è una miscela di cemento, sabbia, inerti e acqua. Nella sua forma indurita è solido e presenta una elevata resistenza a compressione, ma una bassa resistenza a trazione, stimata pari ad un decimo della precedente. Inserendo nel calcestruzzo liquido delle barre di rinforzo in metallo, in corrispondenza delle zone maggiormente sollecitate a trazione, si ottiene il *calcestruzzo armato (c.a.)*. Dato che il conglomerato assorbe gli sforzi di compressione ed il ferro quelli di trazione, il nuovo materiale presenta un comportamento ottimale sotto le azioni flettenti.

Qualora l'armatura sia posta in trazione prima dell'applicazione dei carichi si ottiene il *calcestruzzo armato precompresso (c.a.p.)*.

Si possono enunciare i principali vantaggi delle strutture in calcestruzzo armato:

- 👍 carattere monolitico;
- 👍 buona resistenza al fuoco;
- 👍 basso costo grazie alla economicità e diffusione delle semplici materie prime usate;
- 👍 libertà nella scelta delle forme.

Tra gli svantaggi, si ricordano:

- 👎 elevato peso proprio degli elementi, che ha un effetto negativo sulle fondazioni e limita le luci;
- 👎 basso isolamento termico;
- 👎 difficoltà e dispendio economico nelle operazioni di demolizione.

15.1.1 Storia e applicazioni

Come dimostrato dalla celebre cupola del Pantheon, il calcestruzzo era già conosciuto presso i romani, ma è stata l'introduzione nell'impasto di barre prima in ferro, e poi in acciaio, ad attuare una vera e propria rivoluzione nella tecnica del costruire. Infatti, il conglomerato cementizio ha il medesimo comportamento eterogeneo delle pietre naturali, cioè non resiste a trazione, e quindi l'inserimento del metallo, che ha una resistenza a trazione paragonabile a quella compressione, permette di superare i suoi limiti di impiego. L'utilizzo combinato di due materiali così diversi tra loro è reso possibile, grazie all'uguale coefficiente di dilatazione termica lineare che li caratterizza: $\alpha = 0,000012$ per ogni grado di aumento della temperatura.

La nascita del cemento armato, l'ultimo dei materiali moderni prodotti dall'industrializzazione di fine Ottocento, fu permessa dall'uso del cemento Portland, un legante idraulico brevettato nel 1824 da J.Aspsdin. Successivamente, nel giro di una cinquantina d'anni, si ebbero i risultati delle prime ricerche condotte da europei, in cui il nuovo materiale, armato con elementi metallici, veniva adottato soprattutto nel campo della floricoltura e della nautica. Esempi di tali prime applicazioni del c.a. sono state "il canotto" del francese J.L.Lambot e "le fioriere" del connazionale J.Monier, risalenti rispettivamente al 1855 e al 1876.

Colui che più di tutti aprì la strada allo sviluppo formidabile del cemento armato nel mondo delle costruzioni fu Francois Hennebique, realizzando le prime strutture monolitiche, come pavimenti nervati, travi continue e telai. In particolare, riuscì ad eliminare il problema nella congiunzione del solaio con la trave portante e di questa con i pilastri, nel telaio compatto in cemento armato.

Il cemento armato ha dominato indiscutibilmente la storia delle costruzioni del XX secolo. Le prime applicazioni lo hanno vincolato alla realizzazione di strutture intelaiate, semplicemente come sostituto economico del ferro e del legno, per costruzioni caratterizzate da una rigorosa ortogonalità, riducendo il vocabolario costruttivo a termini quali pilastri, travi e solette. Le Corbusier infatti si specializzò nella costruzione di telai in cemento armato, annoverati come delle

strutture lineari, ovvero costituite da elementi monodimensionali. Ci si accorse subito però che lo schema intelaiato non permetteva di esplicitare al meglio le potenzialità della nuova pietra artificiale resistente a flessione che, priva di forma allo stato fluido, poteva essere gettata in sagome di qualunque profilo, anche curvilineo. A tal proposito, fu Robert Maillart il primo a rivendicare la libertà di forme per le strutture in c.a. e a prendere consapevolezza delle grandi possibilità di uso offerte dalla lastra curva in cemento, armata lungo più direzioni. Le lastre curve, i gusci o volte sottili hanno subito un fortissimo sviluppo e un impiego sempre maggiore durante il Novecento, grazie proprio alla tecnologia del cemento armato, che ha consentito di realizzare coperture fino a 40÷50 metri di luce, con elementi bidimensionali di esiguo spessore, tra i 5÷6 centimetri.

In particolare, in seguito alle prime sperimentazioni di Dischinger e Finsterwalder, la ditta Dywidag, realizzò negli anni Venti le prime cupole sottili con un rapporto pari a 1/500 tra spessore e luce e poi progettò volte sottili cilindriche a direttrice circolare, parabolica ed ellittica. Durante gli anni Trenta, gli studi sulle strutture a guscio si moltiplicarono e vennero realizzate grandi opere come quelle di Edoardo Torroja e di Pier Luigi Nervi. Dopo la fase di stasi dovuta alla Seconda Guerra Mondiale, gli sforzi tecnici si indirizzarono verso superfici sottili a doppia curvatura inversa, rese possibili grazie al cemento armato e, in tale ambito, le applicazioni dei paraboloidi iperbolici trovarono il loro massimo esponente in Felix Candela.

15.2 Il sistema intelaiato

Nel sistema pesante l'orizzontamento è semplicemente appoggiato ai sostegni verticali e per questo la deformazione dell'architrave non si trasmette ai piedritti, che risultano sollecitati solamente da azioni verticali, quindi puramente compressi. Nel sistema intelaiato invece, l'orizzontamento è solidale con i piedritti, tramite il vincolo di incastro perfetto con cui è realizzata la connessione angolare che rende indeformabili gli angoli formati dall'asse dell'architrave con ciascun asse del piedritto. La continuità elastica tra le membrature rende il telaio

una struttura monolitica, in cui la rotazione della sezione terminale dell'architrave ed il momento flettente che la determina si trasmettono al piedritto che risulterà anche esso inflesso. Il principio di continuità elastica a base del funzionamento del sistema intelaiato è garantito dalla realizzazione della connessione angolare e dalla capacità dei materiali adottati di inflettersi; condizioni che vengono soddisfatte dai materiali definiti *elastici*: legno, ferro e cemento armato.

I materiali lapidei hanno un comportamento fragile e non sono capaci di resistere alle sollecitazioni di trazione e per tale motivo possono essere usati solo nel sistema pesante e spingente. Al contrario, i materiali elastici, oltre che tipici del sistema intelaiato, possono essere anche impiegati nel sistema pesante e spingente, come dimostrato nel corso della storia.

In figura 15.1, si riportano i nodi angolari ad incastro perfetto, ottenuti con materiali elastici, e nella figura 15.2, il diagramma dei momenti flettenti e la deformata di un telaio a nodi rigidi, soggetto a carico uniformemente distribuito.

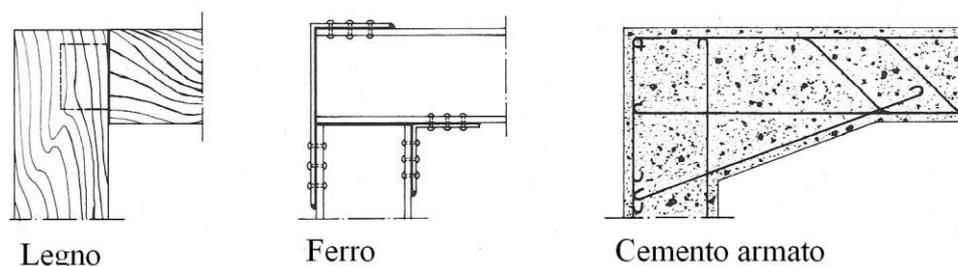


Figura 15.1: nodi ad incastro perfetto ottenuti con diversi materiali elastici (Castaldi, 1979)

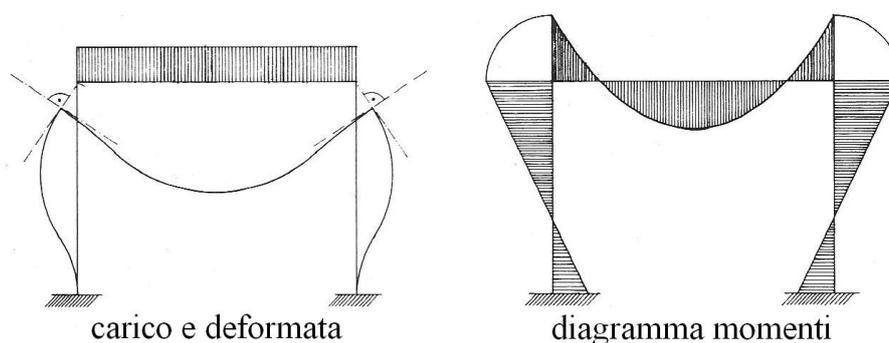


Figura 15.2: deformata e diagramma dei momenti per telaio a nodi rigidi (Castaldi, 1979)

15.2.1 Le Corbusier

Nato in Svizzera nel 1887 e morto nel 1965, era detto Le Corbusier, ma il suo vero nome era Charles-Edouard Jeanneret. Viaggiò tanto sia in Europa, sia in Medio Oriente, e lavorò presso gli studi di Hoffmann, Perret e Behrens, prima di aprire un studio in società con il cugino nel 1922, a Parigi. Il suo primo progetto risale al 1914 e riguarda le case Dom-ino, pensate per essere prodotte in serie, con una struttura portante di colonne e piastre, entrambe in cemento armato.

Estremamente fiducioso nella ragione, recuperò l'idea rinascimentale dell'armonia e della proporzione, facendo uso della sezione aurea e proponendo un nuovo sistema di misure, basato sulla statura dell'uomo con un braccio alzato, chiamato *modulor*. Fu uno delle grandi personalità del movimento moderno che fondava le proprie radici nel razionalismo e nel funzionalismo, proposto per la prima volta da Sullivan con la frase:- la forma è consequenziale alla funzione-.

Le Corbusier sfruttò al meglio le potenzialità del cemento armato e le applicò agli edifici singoli destinati ad abitazione, progettati secondo lo schema strutturale a scheletro indipendente, nato dalla ripetizione del telaio in orizzontale e in verticale. In pratica, l'unità modulare, costituita da due telai affiancati con un solaio piano di copertura, viene ripetuta in pianta ed in alzato originando una maglia tridimensionale, costituita da elementi elastici verticali, i pilastri, e orizzontali, le travi, resi solidali tra loro con incastri.

La casa tipo doveva possedere come sostegni verticali, non più muri, ma pilastri in cemento armato che scaricavano carichi puntuali sulle fondazioni e venivano collegati tra loro da travi dello stesso materiale, sostenenti ampi orizzontamenti continui, i solai. In sintesi si dovevano rispettare i seguenti 5 punti:

1. la casa deve essere sorretta da sostegni discontinui in cemento armato, chiamati *pilotis*, che rendono l'abitazione sopraelevata e quindi lontana dal terreno sottostante, in modo che:- i locali vengono sottratti dall'umidità del suolo; essi hanno luce e aria; il terreno alla base della costruzione è contiguo al giardino che in tal modo passa sotto l'edificio-. (Le Corbusier, 1926)

2. dato che i muri hanno perso la loro funzione portante, la corrispondenza verticale dei sostegni deve esserci per i pilastri isolati, che hanno una sezione ridotta e possono essere anche molto distanti tra di loro. Si realizza così il *piano libero*, in cui lo schema planimetrico delle strutture portanti è indipendente dallo schema planimetrico dei muri di tamponamento e di separazione degli ambienti interni;
3. i sostegni discontinui della struttura intelaiata possono essere arretrati rispetto alla facciata, che è una semplice membrana di muratura o di vetro delimitante l'interno dall'esterno. Si ha in tal modo la *facciata libera*;
4. i muri cessano di svolgere il proprio ufficio statico, sostituiti dal sistema di pilastri, travi e solai in cemento armato, rendendo possibile la mancanza di quella corrispondenza verticale tra pieni e vuoti, tipica invece delle costruzioni a muri portanti. Questo permette di realizzare le aperture dove si vogliono, senza danneggiare o alterare lo schema resistente; addirittura si possono realizzare le *finestre a nastro* che corrono da una parte all'altra dell'edificio, immettendo tanta luce e aria.
5. il tetto deve essere sfruttato realizzando su di esso il giardino pensile, divenendo così il *tetto-giardino*. La copertura dell'edificio non è più a spioventi come in passato, ma risulta piana, poiché costruita sul lastrico solare coperto da sabbia, con lastre in cemento armato a giunti allargati seminati di erba.

Una costruzione basata sul sistema intelaiato è caratterizzata quindi dalla presenza di elementi portanti, costituenti la maglia strutturale che resiste ai carichi, e di elementi chiudenti, che non hanno alcun ufficio statico, ma addirittura vengono portati. Proprio per questo motivo, la loro principale caratteristica deve essere la leggerezza tanto che spesso risultano insufficienti nei riguardi della coibentazione, al punto che devono essere materiali isolanti.

Nonostante il sistema intelaiato abbia avuto un grandissimo sviluppo nel XX secolo in seguito all'introduzione dei nuovi materiali elastici, acciaio e cemento armato, il principio di concentrazione dei carichi agenti sull'edificio entro certe linee di forza prestabilite è antico ed è stato ampiamente sfruttato dai romani e

medievali, come già largamente dibattuto quando si è parlato delle volte a crociera costolonate (cfr.10.2.4).

Si può anche notare come per le stesse abitazioni del Nord Europa del XIV secolo, le proprietà elastiche del legno venivano abilmente sfruttate per realizzare un'ossatura portante, in cui la muratura era solo un riempimento. Esempi di tale edilizia storica con traliccio in legno e pannelli di tamponamento sono ancora



Figura 15.3: esempio di edilizia gotica a traliccio a Bourges, XIV secolo (Castaldi, 1979)

presenti in Francia, in Germania e nei Paesi Bassi, come dimostrato dalla casa riportata in figura 15.3. I gotici definivano tali edifici con il termine *fachwerk*, che significa letteralmente costruzione a graticcio, i cui elementi costituenti possono essere osservati in figura 15.4.

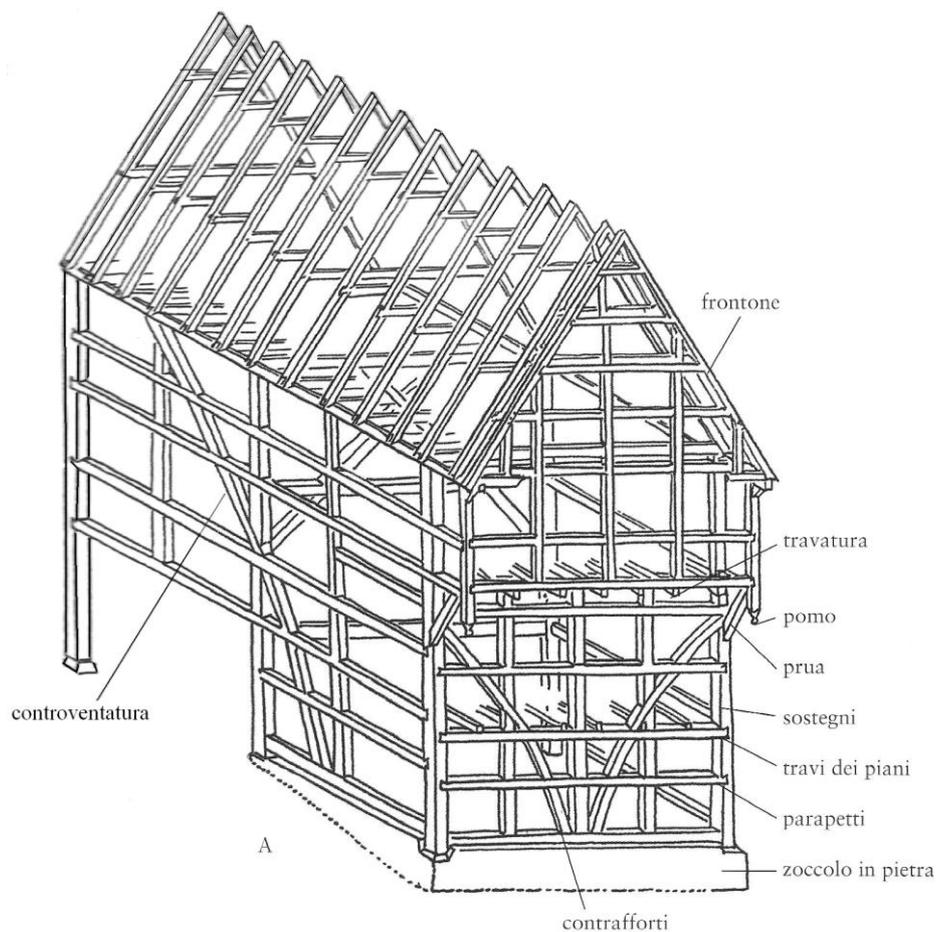


Figura 15.4: fachwerk (De la Riestra, 1990)

Il telaio in cemento armato a nodi rigidi, ovvero con continuità materiale in corrispondenza dei nodi trave-colonna, è realizzato costruendo una struttura gettata in opera. Infatti, qualora si realizzi l'edificio utilizzando colonne e travi prefabbricate, il vincolo non è più di incastro perfetto, ma di appoggio isostatico e si ottiene una struttura che non permette la trasmissione del momento. Il telaio a nodi rigidi presenta un'ottima resistenza alle azioni orizzontali di sisma e vento, mentre non è vero altrettanto per il telaio con elementi prefabbricati in c.a., molto utilizzato per fare capannoni industriali, ma che necessita di dispositivi di *controventamento* per resistere alle azioni orizzontali.

Un esempio di struttura intelaiata a nodi rigidi in cemento armato è l'ossatura portante dell'Unité d'habitation di Marsiglia, realizzata da Le Corbusier tra il 1947 e il 1952. Si presenta come un grande edificio contenente 400 alloggi, dotato di *tetto-giardino* e costruito su *pilotis* che lasciano libero il terreno sottostante.



Figura 15.5: *Unité d'habitation, Marsiglia, 1947-52 (Adorno, 1986)*

L'ossatura portante è costituita da una serie di telai posti a piano terra e costituiti da due pilastri configurati a V, collegati tra loro da doppie travi, nascoste alla vista da piastre in calcestruzzo, come si vede in figura 15.7.

Dato che la ripartizione delle sollecitazioni nel nodo tra gli elementi strutturali che convergono in esso, avviene in maniera proporzionale alla rigidezza degli elementi stessi, è doveroso sottolineare l'elevata rigidezza delle colonne nel suddetto telaio, di sezione notevole per necessità statiche dovute ai tanti piani che devono sorreggere. I pilastri hanno quindi una rigidezza confrontabile con quella delle travi, tanto che esse non possono essere considerate come infinitamente rigide. Si tratta quindi di un telaio con i nodi che ruotano oltre a traslare, ed in cui il vincolo alla base non è né un incastro perfetto (a), né una cerniera (b).

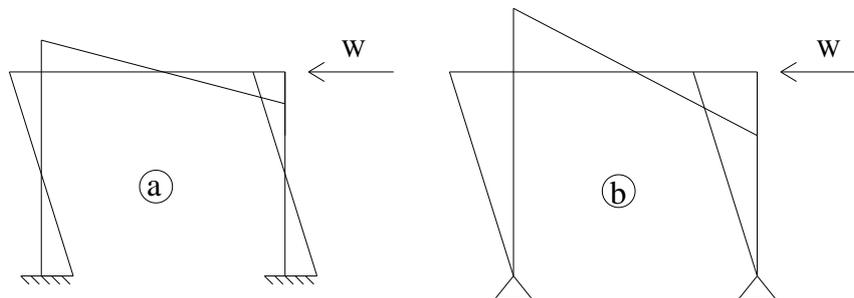


Figura 15.6: diagramma qualitativo dei momenti per telai soggetti ad azione orizzontale

Fatte tali considerazioni si può ragionare per schemi limite (a e b) e convenire che il diagramma dei momenti flettenti dovuto ad un carico orizzontale, indicato con W , avrà un andamento qualitativo come quello rappresentato in figura 15.8.

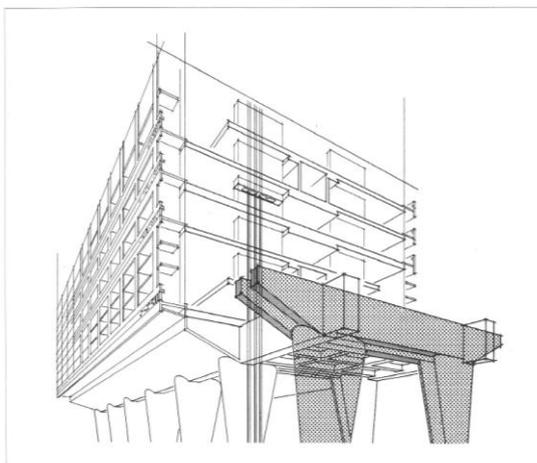


Figura 15.7: prospettiva della struttura del telaio (Sandaker e Petter, 1993)

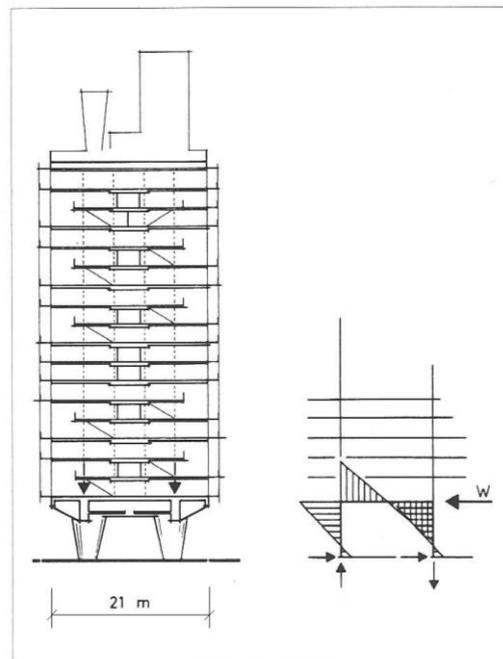


Figura 15.8: sezione trasversale e diagramma dei momenti (Sandaker e Petter, 1993)

15.3 Strutture a guscio

La trave e la colonna presentano una dimensione che è la lunghezza, di un ordine di grandezza superiore alle altre due, altezza e larghezza della sezione. Le lastre invece sono elementi bidimensionali, in quanto presentano larghezza e lunghezza paragonabili, ma molto maggiori rispetto allo spessore. Una lastra priva di rigidità a flessione e a torsione si chiama *membrana* ed è in grado di resistere a carichi applicati lungo il suo piano, ma non a carichi normali ad esso. Se le si conferisce una certa curvatura, acquisisce una forma che le permette di opporre una certa resistenza a carichi comunque diretti. Questo comportamento si dice membranale e si esplica maggiormente nelle superfici *a doppia curvatura* che sono rigide in tutte le direzioni (come le volte emisferiche e i paraboloidi iperbolic) e meno nelle superfici *a semplice curvatura* (come le volte cilindriche), dove la rigidità massima alla flessione si sviluppa lungo la direzione longitudinale ed è nulla lungo la direzione trasversale.

Su questi principi si basa il comportamento statico delle volte sottili, definite come delle superfici elastiche continue molto sottili che sopportano i carichi esterni solamente in virtù del loro stato tensionale membranale, senza presentare comportamento flessionale. In queste superfici che, come già detto, possono essere a semplice o a doppia curvatura, la diffusione degli sforzi lungo la superficie media è favorita e resa immediata dalla propria forma, come nel sottile guscio di un uovo, tanto che si indicano anche come strutture a guscio o resistenti per forma. Il principio statico che governa il loro comportamento è completamente differente da quelle delle volte murali, superfici discontinue realizzate in materiale anelastico.

15.3.1 Pier Luigi Nervi

L'ingegnere italiano Pier Luigi Nervi (1891-1979) realizzò nel corso del XX secolo importanti opere in Italia e nel mondo, sfruttando le proprietà del cemento armato, da lui definito "il più bello dei materiali che l'umanità abbia mai

inventato” e basandosi sull’applicazione delle leggi statiche, da lui considerate come “efficaci fonti di ispirazione architettonica”. Divenendo uno dei principali esponenti europei della tecnica del cemento armato, soprattutto applicata alle grandi coperture, introdusse nuovi procedimenti costruttivi, in particolare nell’ambito della prefabbricazione, e inventò nuovi materiali come il ferro-cemento.

Al 1930 risale il primo lavoro di rilevanza internazionale e cioè lo stadio di Firenze, in cui spiccano la pensilina che copre un settore delle tribune e le eleganti scale elicoidali. Come si vede dalla figura 15.9, la tribuna centrale è coperta da una tettoia in cemento armato, sostenuta da travi curvilinee dallo spessore che si riduce progressivamente con l’avanzare della copertura a sbalzo, scaricando il peso sui pilastri verticali, posti sotto la tribuna. Lo sbalzo di 22 metri costituì un record per l’edilizia del tempo e come sempre accade in tali casi, al momento della realizzazione Nervi venne aspramente criticato dai diffidenti tecnici.

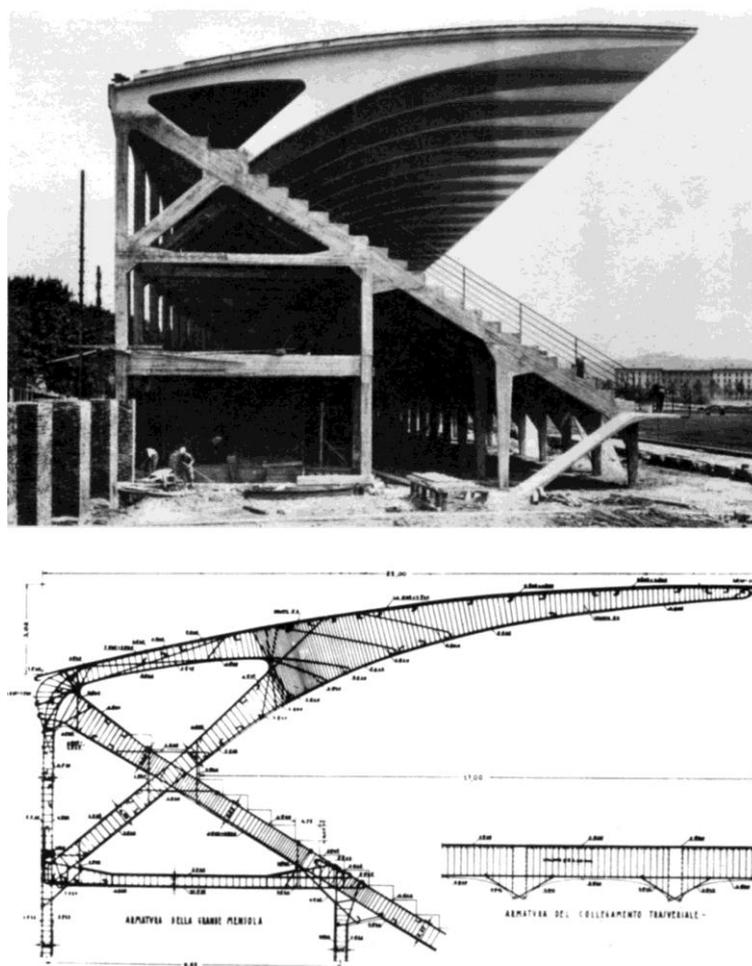


Figura 15.9: esecutivo del c.a. per le strutture della pensilina (Desideri, 1979)

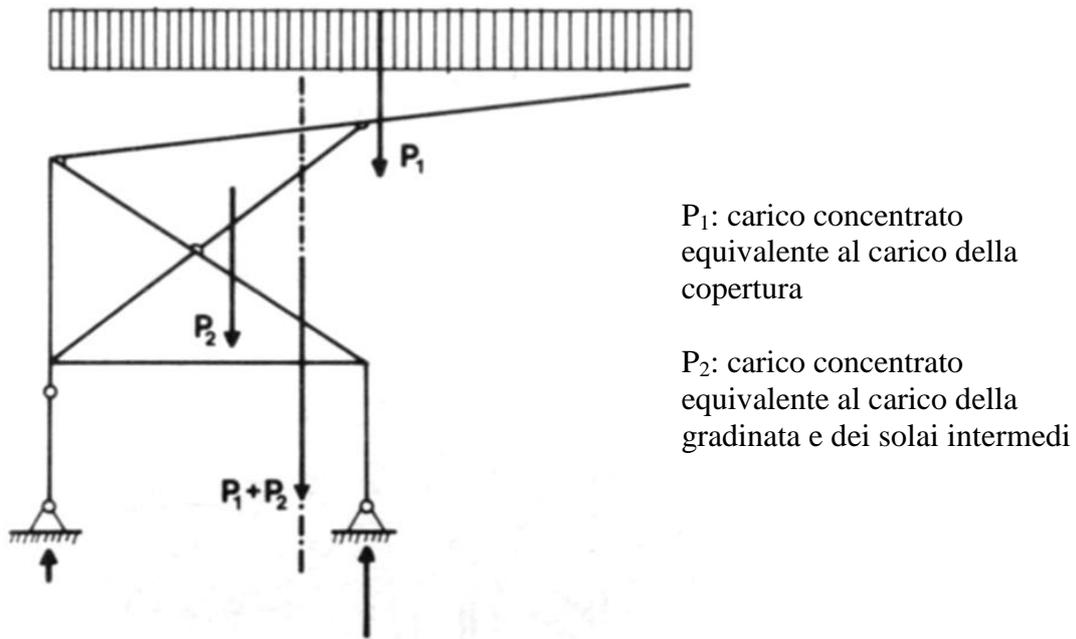


Figura 15.10: shema statico per le strutture della pensilina (Desideri, 1979)

La rampa delle scale è lunga 3 metri ed è sostenuta da una trave elicoidale in cemento armato a vista, rinforzata da un'altra trave ruotante in senso opposto, come si nota dalla figura 15.11. Oltre che per la concezione costruttiva, tali scale risultano un capolavoro per la loro funzionalità, permettendo un afflusso estremamente rapido degli spettatori, poiché previsto dall'alto e non dal basso come di consueto.

Successivamente, Nervi si dedicò alla realizzazione delle aviorimesse per conto dell'Aeronautica Militare, in cui si concentrò nella realizzazione di grandi coperture a campata unica. Al 1938 risalgono le due aviorimesse di Orvieto di dimensioni pari a $110\text{m} \times 45\text{m} \times 8\text{m}$, per le quali utilizzò la tecnica della *volta nervata in cemento armato*, costituita da

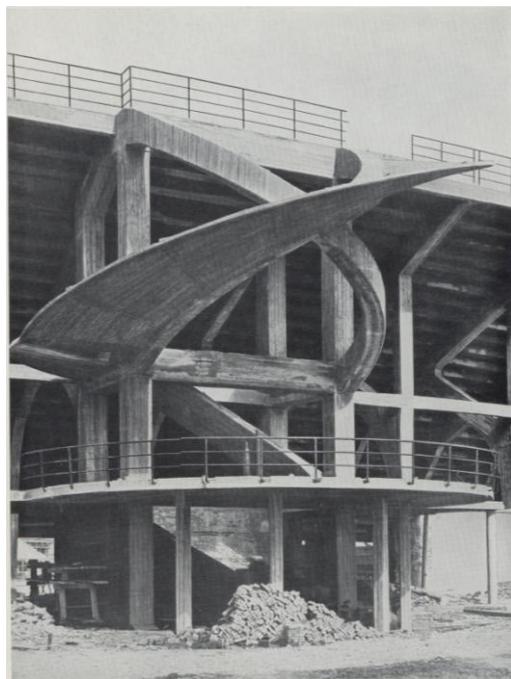


Figura 15.11: scala elicoidale in costruzione, Firenze, 1930 (Nervi e Bartoli)



Figura 15.12: aviorimessa di Orvieto, 1938
(Giovannardi,2008)

nervature e solette rese solidali tra loro diffondendo del ferro nella massa di conglomerato. Nervi decise di disporre le nervature obliquamente rispetto l'asse longitudinale della copertura e di armare le solette con ferri diagonali, in modo da creare una *volta nervata diagonale* che conferiva all'ambiente un estremo senso di

leggerezza. La copertura, riportata in una foto del tempo in figura 15.12, era sostenuta su tre lati da pilastri a cavalletto, mentre sul lato principale, per consentire il passaggio degli aerei, Nervi aveva realizzato un unico pilastro centrale che sosteneva una trave reticolare di bordo disposta in orizzontale per assorbire le azioni del vento. La scelta del cemento armato era nata anche da considerazioni economiche, in quanto il costoso ferro era utilizzato in una quantità pari a 25 Kg/m^2 , molto ridotta rispetto alla costruzione di una aviorimessa metallica.

All'inizio degli anni Quaranta, l'ingegnere realizzò altre sei aviorimesse sempre a struttura geodetica come le precedenti, ma con la tecnica della prefabbricazione in cemento armato. La copertura era costituita da elementi prefabbricati, gettati entro semplici forme di legno a terra e poi disposti in opera a reticolo,



Figura 15.13: aviorimessa di Orbetello, 1942
(www.giovannardierontini.it, 2008)

completando i nodi con un getto di conglomerato ad alta resistenza; il tutto era sostenuto da 6 pilastri, di cui 4 angolari e 2 intermedi, come riportato in figura 15.13. Oltre che per la tecnica costruttiva, queste aviorimesse si differenziavano dalle precedenti per le dimensioni: $100\text{m} \times 36\text{m} \times 12,50\text{m}$.

Realizzò nel 1958, in collaborazione con Annibale Vitellozzi, il Palazzetto dello Sport per le Olimpiadi di Roma del 1960. L'edificio, a pianta circolare con un diametro alla base di 60 metri e un'altezza al centro di 21 metri, possiede una calotta sferica di copertura, sostenuta sul perimetro da 36 cavalletti a forma di Y, disposti in senso radiale che, data la loro inclinazione, costituiscono una sorta di prolungamento a terra della copertura. Questi sono collegati alla cupola tramite i cosiddetti *ventagli strutturali*, ognuno dei quali assorbe 1/36 della spinta della copertura e la trasferisce a terra grazie ai cavalletti che, senza intervento di sollecitazioni flessionali, scaricano sulle fondazioni, realizzate da un grande anello circolare in cemento armato precompresso.



Figura 15.14: ventagli strutturali e posa in opera degli elementi romboidali (Nervi e Bartoli)

Come si vede dalla figura 15.14, lo spazio tra due ventagli adiacenti è occupato da tre pannelli prefabbricati triangolari. La cupola, calcolata in regime membranale, è stata costruita assemblando nel giro di un mese 1620 elementi a forma romboidale spessi 2,5 centimetri che, dopo essere stati realizzati a terra gettando il cemento in apposite casseforme in muratura, venivano posizionati in opera da una gru al centro dell'edificio.



Figura 15.15: Palazzetto dello Sport, Roma, 1960 (www.giovannardierontini.it, 2008)

15.3.1.1 Il ferro-cemento

Nervi fu il primo ad usare la tecnica della prefabbricazione che, come per i templi greci in cui i conci di pietra venivano lavorati e sagomati a terra e poi montati, gli permetteva di non gettare in opera gli elementi delle sue costruzioni, ma di fabbricarli prima a terra o in laboratorio e poi collocarli nella posizione finale. Tale prefabbricazione strutturale era collegata anche ad un'altra sua creazione, chiamata *ferro-cemento*, un nuovo materiale con cui realizzava i casseri a perdere per gli elementi. Resistente e al contempo elastico, il ferro-cemento venne introdotto da Nervi nel mondo delle costruzioni, a metà degli anni Quaranta. Era composto da strati di maglia d'acciaio riempiti di malta cementizia e con esso si potevano ottenere nervature ondulate di grande impatto visivo, come egli stesso affermava: -membrane resistenti a tensione e a pressione, ondulate, piegate e curvate come meglio si desidera-. (Nervi, 1943).

Le sue ricerche hanno avuto inizio nei laboratori del Politecnico di Milano per verificare se: - aumentando decisamente la diffusione di ferro e la sua percentuale, non si potesse realizzare un materiale di più elevata resistenza e soprattutto di maggiore elasticità ed allungabilità-. (Nervi, 1943). Condusse le prove su solette dallo spessore variabile da 1 a 6 centimetri, costruite con la sovrapposizione di 10÷12 strati di rete metallica di filo dolce, cioè con ϕ da 0,5 a 1,5 mm in maglie da 1 centimetro di lato, cementati con malta cementizia, cioè sabbia di buona qualità e dosatura di 8÷10 quintali per metro cubo. Si ottenevano così delle solette che: - debbono paragonarsi a materiali omogenei, capaci di resistere a sollecitazioni di tensione e di compressione del medesimo ordine di grandezza e che potevano raggiungere senza lesioni un allungamento cinque volte superiore a quello della malta non armata-. (Nervi, 1943)

Si tratta quindi di un materiale nato dal connubio di ferro e cemento, ma dalle caratteristiche completamente diverse da quelle del cemento armato ordinario. Infatti, grazie alla diffusione dei sottili fili di ferro, esso non è più eterogeneo, ma diventa omogeneo, isotropo ed elastico, capace di resistere tanto a compressione quanto a trazione. In pratica, la soletta spessa al massimo 6÷10 centimetri assume proprietà fisico-meccaniche molto simili a quelle del ferro. Inoltre, altro pregio

del ferro-cemento è la sua modellabilità in sagome di qualsivoglia profilo, poiché la malta cementizia può essere gettata senza casseforme, in quanto trattenuta dal pacchetto di reti, che la rende infessurabile e molto flessibile.

Nervi utilizzò il ferro-cemento per le volte sottili del secondo dopoguerra e, in particolare, per la copertura del salone delle esposizioni di Torino del 1950, realizzata con elementi prefabbricati formati da solette in ferro-cemento dal profilo ondulato. Riuscì così a coprire uno spazio di 94,30m×75m con un intelaiatura di soli 4 centimetri di spessore che permetteva anche il passaggio della luce. La copertura traforata possiede una luce netta agli appoggi di 80 metri ed è costruita con elementi prefabbricati ciascuno di dimensioni pari a 2,5m×4,5m×1,6m, come si vede dalla figura 15.16.

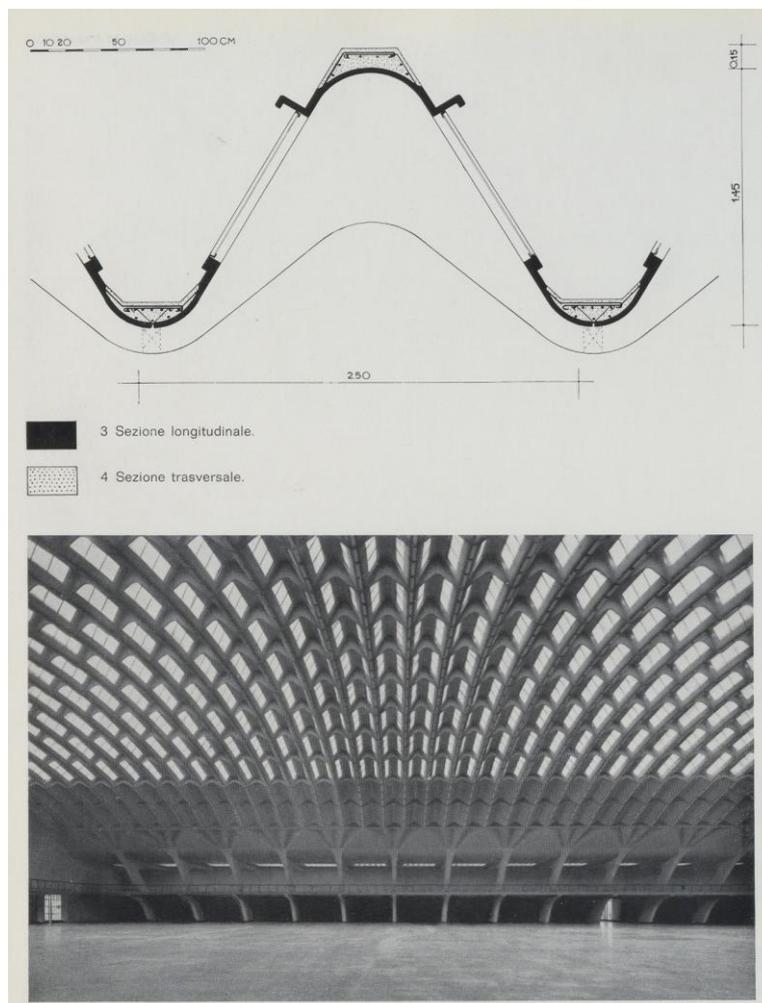


Figura 15.16: sezione di un elemento prefabbricato ed interno del salone, Torino, 1950 (Nervi e Bartoli)

15.3.2 Edoardo Torroja

Lo spagnolo Eduardo Torroja (1899-1961), ingegnere strutturista, fondò assieme a Franco Levi e a Pierluigi Nervi, il Comité Euro-International du Bèton (CEB) e diede con le sue numerose opere un grande contributo all'evoluzione di strutture a guscio in c.a. Con la propria concezioni strutturale influenzò molti, tra i quali il connazionale Candela, e fu tra i primi a realizzare le classiche forme geometriche di cupole e volte con il cemento armato, anziché con i tradizionali materiali che rendevano la copertura spingente molto massiccia e quindi bisognosa di strutture di contrasto di grande mole.

Nelle sue architetture la scelta del materiale e la struttura architettonica determinavano la forma geometrica visibile tanto dall'esterno quanto all'interno.



Figura 15.17: mercato di Algeciras, 1933

Utilizzò la volta sottile in cemento armato per la copertura del mercato di Algeciras nel 1933, riportato in figura 15.17, e due anni dopo per la copertura sospesa della tribuna d'onore dell'ippodromo di Madrid, raffigurata nell'immagine 15.18.



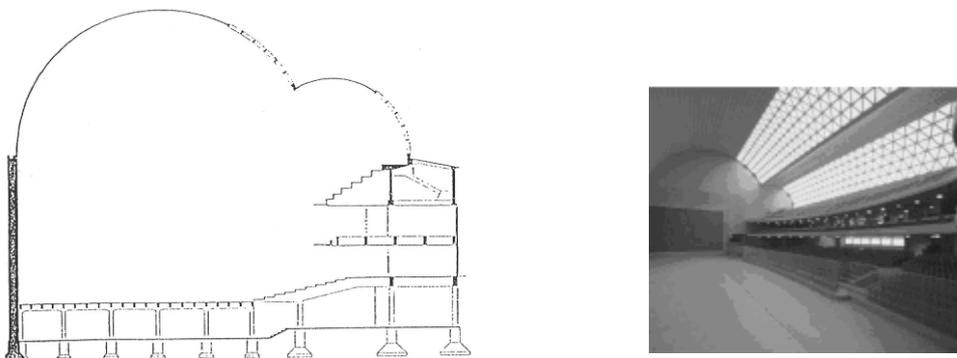
Figura 15.18: tribuna d'onore ippodromo di Madrid, 1935

A proposito della struttura del mercato, Torroja afferma:- la calotta sferica di 47,6 metri di luce appoggia direttamente su otto supporti, collegati fra loro da un anello poligonale post-teso. Gli spioventi della volta, fra supporti adiacenti, vengono tagliati da lunette formate da volte cilindriche perimetrali ribassate. Queste

costituiscono le protezioni delle porte e, nel contempo, irrigidiscono la cupola ed incanalano i fasci di isostatiche verso i supporti-. (Torroja, 1995)

L'iperboloide ad una falda che genera la pensilina a sbalzo dell'ippodromo è una delle prime superfici a doppia curvatura inversa realizzate, resa possibile dal cemento armato impiegato in spessori sottili.

Da citare anche il Fronton Recoletos, costruito a Madrid nel 1935 e poi distrutto dai bombardamenti della Seconda Guerra Mondiale, la cui sezione trasversale è rappresentata in figura 15.19. Era una struttura con una copertura realizzata dall'unione di due volte cilindriche parallele di luce diversa, che le conferivano un profilo asimmetrico. Nonostante sormontasse un ambiente di 55 metri di larghezza, la copertura a guscio fu realizzata tramite un getto di conglomerato cementizio con uno spessore di soli 8 centimetri, senza bisogno di travi, anelli di rinforzo, né tantomeno di sostegni intermedi. Torroja la descrisse con le seguenti parole:- formata da due lobuli longitudinali, copriva i 55 metri della sala scaricandosi principalmente sui muri frontali, e solo in misura molto ridotta su quelli laterali. La forma e l'orientamento dei lobuli rispondevano a motivi funzionali di illuminazione, legati all'utilizzazione della superficie interna-. (Torroja, 1995). In tale progetto portò all'estremo la sperimentazione strutturale rispetto al Mercato di Algeciras: la sottilissima lamina di calcestruzzo si smaterializza ulteriormente, attraverso bucatore ordite secondo l'accostamento di piccoli triangoli, in maniera da formare due losanghe traforate per far entrare la luce.



*Figura 15.19: sezione trasversale e interno del Fronton Recoletos, Madrid, 1935
(Dassori e Zampini, 1991)*

15.3.3 Felix Candela

Lo spagnolo Felix Candela (1910-1997) approfondì lo studio delle strutture a guscio in cemento armato costruite in Europa negli anni Venti e Trenta, e si concentrò soprattutto sulla forma dei paraboloidi iperbolici, divenendo lo “shell-builder” per eccellenza.

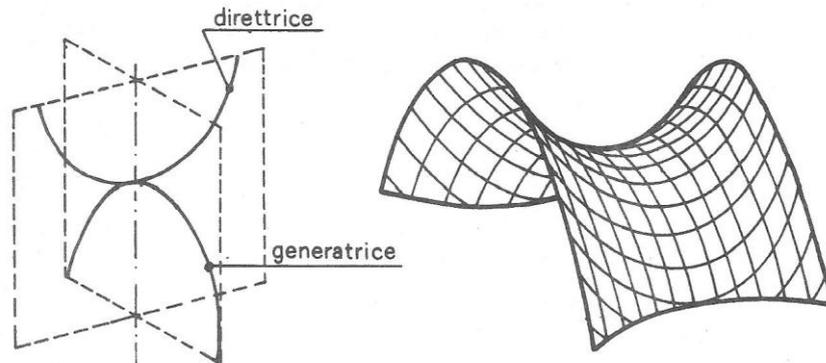


Figura 15.20: paraboloide iperbolico (Caleca, 2000)

I paraboloidi iperbolici, anche chiamati Hyper, sono volte a doppia curvatura, aventi curvatura bidirezionale e generati dalla traslazione di una parabola, la *generatrice*, che appoggiandosi ad un'altra parabola, la *direttrice*, si sposta parallelamente ad essa, come rappresentato in figura 15.20.

La doppia curvatura dell'Hyper genera la straordinaria resistenza di questo elemento strutturale che diventa capace di portare non solo secondo la direzione della sua generatrice, come l'arco di pietra, ma anche secondo la sua direttrice. Usandolo nella sua forma completa o unendo parti di esso, tagliate lungo le rette reali contenute nel paraboloide iperbolico, sono stati realizzati numerosi esempi di coperture nel corso del XX secolo, come la casa a Raleigh degli anni Cinquanta, riportata in figura 15.21.

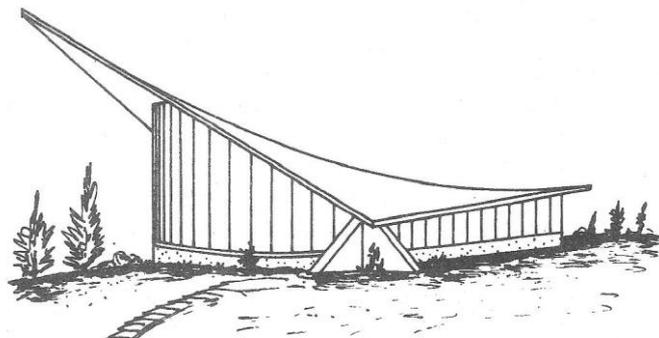


Figura 15. 21: casa a Raleigh (Caleca, 2000)

Candela per primo sfruttò tali superfeci a doppia curvatura che, dotate di quell'elevata rigidità in tutte le direzioni necessaria per superare grandi luci con spessori minimi, gli permisero di realizzare le coperture delle tante opere che gli diedero fama internazionale. A tal proposito, al 1950 risale la prima opera che lo fece conoscere in tutto il mondo: la copertura del Pabellòn de Rayos Còsmicos; un piccolo padiglione già progettato di 12m×10,75m, destinato alla misurazione dei neutroni, situato nell'Università di Città del Messico. Al limite di 1,5 centimetri per lo spessore della copertura imposto dalla committenza, egli rispose progettando una copertura sottile, generata da un parabolide iperbolico, che gli assicurava la sufficiente rigidità, nonostante l'esiguo spessore.

Geniale fu l'invenzione della *struttura ad ombrello rovescio* (paraguas invertido), riportata in figura 15.22. Si tratta di una copertura quadrangolare, costituita affiancando 4 timpani di paraboloidi iperbolici e sostenuta da un unico pilastro centrale scaricante sul plinto di fondazione, al cui interno vi era il tubo pluviale. Le caratteristiche di semplicità e di economicità della costruzione, dovute anche all'utilizzo della medesima cassaforma per il getto del cemento, resero tale struttura il prototipo per la realizzazione di gran parte delle stazioni di servizio sud-americane, oltre che di capannoni industriali.

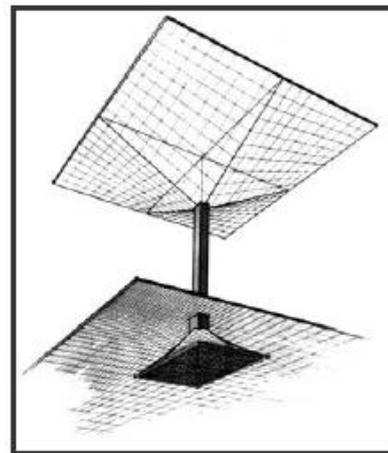
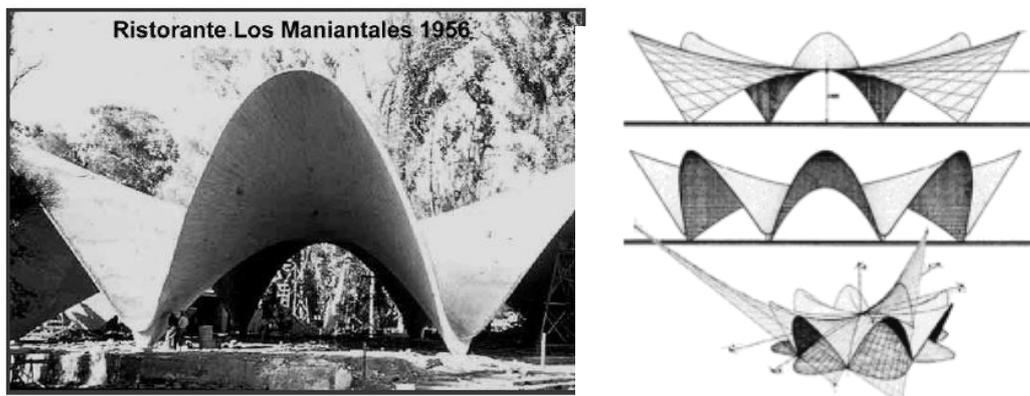


Figura 15.22: struttura ad ombrello rovescio
(www.giovanardierontini.it, 2006)

Sempre sfruttando le proprietà statiche dei paraboloidi iperbolici realizzò anche coperture con il bordo libero, tra le quali la più famosa è quella del ristorante Los Manantiales ad Xochimilco, costruito nel 1956. In esso, la pianta poligonale è coperta da una struttura sottile, ottenuta da un'aggregazione radiale di 8 rami di paraboloidi iperbolici che s'incontrano lungo 8 diagonali paraboliche, di luce massima di 30 metri, come si nota dalla figura 15.23.



*Figura 15.23: ristorante Los Maniantales, Città del Messico, 1956
(www.giovannardierontini.it, 2006)*

Il processo costruttivo che consentiva la realizzazione di tali bizzarre strutture era basato sulla elaborazione delle casseforme, costruite con tavole di panconcello di legno e configurate con la stessa forma della volta progettata. La superficie del paraboloido iperbolico di Candela presenta la fondamentale caratteristica di essere *rigata*, cioè realizzabile anche attraverso una doppia traslazione di segmenti rettilinei sulle due generatrici, anch'esse rettilinee e sghembe nello spazio. Per tal motivo, le casseforme non risultavano troppo complesse e costose, in quanto costituite da elementi lignei lineari, orditi secondo la rigatura stessa della superficie. Sopra di esse si posava l'armatura di piccolo diametro che formava un reticolo e successivamente si gettava il cemento per lo spessore desiderato, di solito intorno ai 4 centimetri; si aspettava che facesse presa e poi si poteva togliere la cassaforma lignea.

Il grande successo dell'impresa di costruzioni di Candela in Messico, dimostrato dalle 896 opere costruite, fu dovuto oltre che all'abilità tecnica dell'ingegnere-architetto, anche alla grande disponibilità di manodopera a basso costo che riuscì a reclutare fino al 1964, anno in cui i salari minimi aumentarono per legge e la ditta cominciò il suo declino.

Altro aspetto da sottolineare è che gli audaci progetti realizzati in Messico, usando gusci sottili in cemento armato, non si sarebbero potuti realizzare in paesi maggiormente sviluppati, in quanto non conformi alle rigide norme vigenti. A tal proposito, vale la pena citare l'opinione di Candela:- la regolamentazione rigorosa

di quello che si può fare, significa la quasi impossibilità di tentare strade nuove, di evolvere e progredire-. (Candela, 1968)

Se alcuni ingegneri hanno rimproverato Candela di non eseguire precisi calcoli statici per progettare, come uno strutturista avrebbe fatto, d'altro canto alcuni architetti hanno criticato nelle sue opere la mancanza di finiture come porte, finestre ed installazioni. Al di là delle definizioni di ruolo, si può concludere che egli sia stato un costruttore di notevole importanza sia per la storia dell'ingegneria, sia per quella dell'architettura. A conferma del suo modo di progettare, basato sulla propria sensibilità statica ed estetica, si riporta una sua forte affermazione:- Le imponenti volte di pietra delle cattedrali gotiche e le cupole audaci del Rinascimento furono costruite senza aiuto del calcolo differenziale; ma invece di esso, fecero uso di un grande senso dell'equilibrio e sul giudizio assennato del gioco delle forze, qualità molto necessarie, per un costruttore, molto più della conoscenza profonda delle scoperte della matematica-
.(Candela, 1953)

16. LIMITI DIMENSIONALI

16.1 Muratura

Limite di altezza: 16 piani del Monadnock Building del 1891 date le murature portanti di 1,8 metri alla base.

Sistema pseudo-spingente: diametro della pseudo-cupola del Tesoro di Atreo pari a 14,5 m ed altezza 13,2 m.

Sistema spingente: diametro della cupola di Santa Maria del Fiore a Firenze, realizzata con mattoni disposti a spinapesce è pari a 42,20 m.

16.2 Cemento armato

Limite per orizzontamenti in c.a.: $h = 1/10 L$.

Sistema spingente: l'opus caementitium ha permesso di realizzare la cupola del Pantheon di diametro pari a 43,40 m.

Volte sottili in c.a. permettono di coprire luci di 40÷50 m con spessori di 5÷6 cm.

Esempi:

- Volta nervata diagonale di Nervi per l'aviorimessa di Orvieto copre un ambiente di 110×45×8 m.
- La cupola del Palazzetto dello Sport a Roma di Nervi, realizzata con elementi prefabbricati in c.a. spessi 2,5 centimetri, presenta un diametro alla base di 60 metri.

Sistema intelaiato: i pilastri sono posti ad una distanza l'uno dall'altro tra i 4÷6 metri.

16.3 Acciaio

Limite per orizzontamenti: $h = 1/20 L \div 1/25 L$.

Limite di altezza: l'acciaio ha permesso di realizzare gli edifici più alti del mondo. In Italia, l'ossatura in acciaio è più conveniente di quella in c.a. per strutture maggiori di 10 piani. A New York l'altezza più conveniente per grattacieli a scheletro metallico è all'incirca di 180 metri, pari a 60 piani. Il limite attuale è raggiunto dal Burj Dubai del 2009 con i suoi 818 metri che superano i 509 m del Taipei 101 e i 160 piani che superano il limite dei 110 del Sears Building di Chicago.

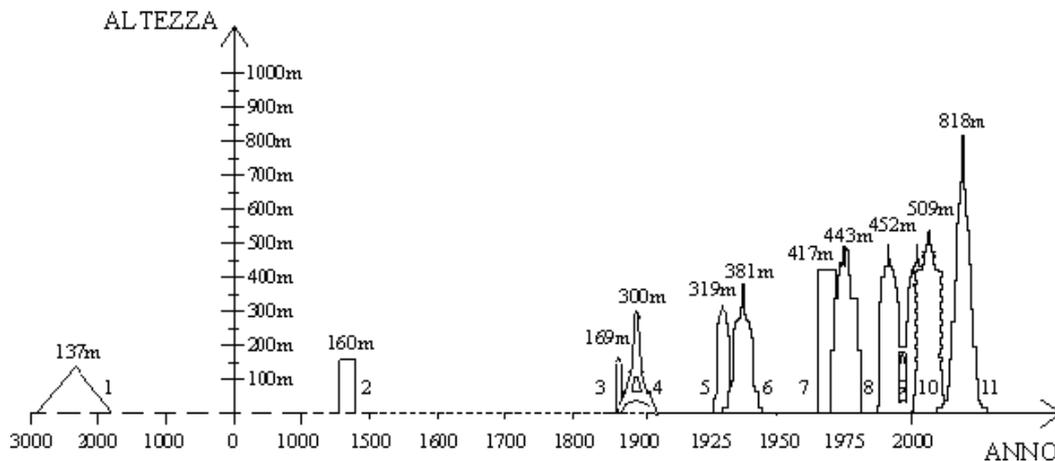


Figura 16.1: scala temporale edifici più alti al mondo

I numeri della scala temporale riportata in figura 16.1 corrispondono alle seguenti opere, realizzate nel corso della storia, con diversi materiali:

1. 2570 a.C., *Piramide di Cheope*, Giza, Egitto
2. 1320 d.C., *Cattedrale di Lincoln*, Lincoln, Inghilterra
3. 1884 d.C., *Monumento a Washington*, Washington D.C., Stati Uniti
4. 1889 d.C., *Torre Eiffel*, Parigi, Francia
5. 1930, *Chrysler Building*, New York, Stati Uniti
6. 1931, *Empire State Building*, New York, Stati Uniti
7. 1972, *World Trade Center*, New York, Stati Uniti
8. 1974, *The Sears Tower*, Chicago, Stati Uniti
9. 1998, *Petronas Twin Tower*, Kuala Lumpur, Malesia

10. 2004, *Taipei 101*, Taipei, Taiwan

11. 2009, *Burj Dubai*, Dubai, Emirati Arabi

Sistema non spingente: le capriate metalliche consentono di raggiungere luci di 15÷30 metri.

Sistema spingente: volte a struttura metallica, tra cui i sistemi reticolari spaziali permettono di coprire fino a 100 metri di luce. Esempi:

- Arco a tre cerniere per sormontare una campata di 117 metri nella Galleria delle Macchine.
- Cupola Geodetica di Baton Rouge di Fuller per coprire uno spazio avente un diametro di 118 metri.

Strutture appese: sistema strutturale dell'era contemporanea basato sull'uso di cavi tesi che sostengono i carichi e li trasmettono a sostegni, posti in modo tale da rendere massima la superficie priva di ingombri strutturali.

Gli edifici appartenenti a questa tipologia si realizzano principalmente con due tecniche costruttive:

1. appendendo i solai dei vari piani mediante tiranti d'acciaio ad un'unica trave reticolare in acciaio appoggiata a pilastri situati all'estremità dell'edificio.
2. appendendo i solai ad un unico poderoso supporto centrale realizzato di solito in c.a..

Per rendersi conto delle ampie luci libere da sostegni che tali strutture appese consentono, si cita l'esempio della Cartiera Burgo di Mantova. La fabbrica è stata realizzata da Nervi nel 1964 con una copertura sospesa costituita da un impalcato metallico appeso, tramite 4 funi di acciaio, a due cavalletti in cemento armato. La copertura, larga 30 metri, presenta una campata centrale di 163 m e due sbalzi laterali di 43 m ed è sostenuta dai due sostegni in c.a. alti 50 metri.



Figura 16.2: *Cartiera Burgo, Mantova, 1964* (www.giovannardierontini.it, 2008)

Tensegrity structures: si tratta di un principio strutturale basato sull'uso di componenti compressi isolati inseriti all'interno di una rete in continua tensione, in modo tale che gli elementi compressi (punti) non si tocchino l'uno con l'altro e gli elementi pre-tesi (cavi) delimitano spazialmente il sistema. Tale schema strutturale è relativamente recente, dato che gli inventori a cui sono stati consegnati i brevetti risultano i seguenti:

1. Richard Fuller nel 1962 che coniò il nome dalla contrazione di *Tension Integrity*
2. David Emmerich nel 1964
3. Kenneth Snelson nel 1965.

In 50 anni, ci sono stati vari tentativi di dare una definizione di tali strutture e la più appropriata appare la seguente:- Tensegrity system is a system in a stable self-equilibrated state comprising a discontinuous set of compressed components inside a continuum of tensioned components-. (Renè Motro, 2003) Tale definizione spiega il grande errore che spesso si è commesso definendo tensegrity structures qualsiasi composizione basata sull'utilizzo di elementi tesi e compressi. Infatti, sono esempi di falsa tensegrity sia le *strutture a tenda*, poiché devono essere ancorate al terreno per essere stabili sia *le cable domes*, tra cui quella di Georgia, in quanto l'anello di bordo della cupola è compresso.

I vantaggi che presentano tali strutture sono numerosi tra cui: sono più resistenti rispetto a strutture di egual peso, non soffrono di instabilità perché gli elementi compressi sono molto corti, sono in equilibrio in qualsiasi posizione indipendentemente dalla gravità.

Le strutture concretamente realizzabili sono cupole e torri e, a dimostrazione della possibilità di adozione di tale schema strutturale in campo architettonico, si cita la Tower of Rostock, realizzata nel 2003 da Schlaich e calcolata da Ruiz de Villa; con i suoi 62,3 metri è la più alta del mondo del suo genere. Ancora non sono mai stati realizzati, ma ci sono studi per la progettazione di tensegrity roofs e archs e molte applicazioni si potranno trovare in quella che sarà "l'architettura lunare", oltre che nelle aree devastate da eventi atmosferici o bellici, nei campi ospedalieri e nel settore delle comunicazioni.

Comunque, vale la pena di ricordare che finora, il maggiore utilizzo di tale schema strutturale è avvenuto nel settore della scultura, dell'arredamento e dei giocattoli.

16.4 Cemento armato precompresso

Nel cemento armato precompresso si determina uno stato di compressione coatta e l'assenza di sforzi di trazione, grazie alla pre-sollecitazione degli elementi sottoposti a flessione. In tal modo tutta la sezione lavora a compressione e si riescono a realizzare strutture lineari di grande dimensione.

Limite per orizzontamenti: $h = 1/20 L \div 1/25 L$.

Esempi:

- Il Padiglione del Salone dell'automobile di Torino, dell'ingegnere romano Riccardo Morandi, costruito tra il 1958 e il 1962 nel parco del Valentino in calcestruzzo armato precompresso. La grande sala è completamente interrata e lo spazio di dimensioni pari a 69×151 metri, risulta sormontato da una copertura formata da una griglia di travi alte e sottili, a sezione rettangolare e altezza variabile, sghembe rispetto all'asse trasversale del padiglione. Tali travi si incrociano in mezzzeria e disegnano una trama di cassoni romboidali.



Figura 16.3: schema strutturale del Padiglione del Salone dell'automobile, Torino, 1958-62

- Il progetto di Utson per l'Opera di Sidney del 1975 può essere annoverato come l'apice raggiunto dalla ricerca compositiva nell'uso delle volte sottili. Le superfici a doppia curvatura della copertura sono realizzate in cemento armato precompresso, su di una complessa gerarchia di travi principali, travi secondarie e piastre di solaio, tutte prefabbricate e dotate di una geometria ripetitiva. Per realizzare la complessa geometria

cuspidata del progetto e per ottenere la ripetibilità dei pezzi da prefabbricare, Utzon fa ricorso all'uso delle diverse sezioni di un'unica sfera, proprio come aveva spiegato nel suo Taccuino, 700 anni prima, Villard de Honnecourt. Tutti i conci erano pre-fabbricati a pié d'opera con un unico raggio di curvatura, così come tutti i settori in c.a. sono parti di un'unica sfera e compongono l'Opera di Sydney.

16.5 Verso il futuro

Uno spazio rettangolare dalle dimensioni di 80×216 metri è stato coperto da Shigeru Ban nello stadio di pattinaggio a Nakano, realizzato per i giochi olimpici invernali del 1998. La copertura tesa presenta la concavità verso l'alto, la cui struttura continua, sospesa e semi-flessibile è composta di 2 gusci in lamellare e di una piastra di metallo di 12 mm. Si è sfruttata la tecnica del legno lamellare cioè, usando piccole tavole lignee, unite con potentissime colle messe a punto in ambito industriale, si costituiscono gigantesche membrature strutturali dalle forme libere. Il legno lamellare armato è stato rinforzato con elementi metallici che ne aumentano la resistenza; per la precisione sono stati fabbricati 7.000 elementi curvi in lamellare, di 162,50 metri di raggio e 10 di lunghezza è per questa copertura.

La Mediateca di Sendai costruita tra il 1995 e il 2001 da Toyo Ito è un brillante esempio di ottimizzazione dello spazio interno tramite la scelta dello schema strutturale. Si tratta di un prisma di vetro dalle dimensioni pari a 50×50×37 metri con 2 piani interrati e 7 fuori terra. La struttura portante è costituita da 13 pilastri a traliccio, realizzati da un insieme di tubi di acciaio che subiscono una torsione rispetto l'asse verticale, assicurando in tal modo la presenza di un cavedio al loro interno finalizzato ad ospitare ascensori, scale di sicurezza ed impianti vari. Gli orizzontamenti sono 7 lastre di acciaio nervate rinforzate con calcestruzzo.



Figura 16.4 e 16.5: Mediateca di Sendai, 2001

16.6 Considerazione conclusiva

A conclusione dello studio effettuato, conoscendo quindi la sequenza temporale delle opere più significative nella storia delle costruzioni, a partire dal 3000 a.C. fino ai nostri giorni, si svolge una riflessione personale circa l'evoluzione storica di quei fattori che si ritengono abbiano influenzato in maniera determinante la possibilità della loro realizzazione. Tra questi si considerano:

- 1. le conoscenze tecnico-costruttive;*
- 2. la disponibilità di manodopera;*
- 3. il costo della manodopera;*
- 4. le risorse finanziarie;*
- 5. l'entusiasmo popolo/opinione pubblica.*

16.6.1 Le conoscenze tecnico-costruttive

Nonostante la Scienza delle Costruzioni abbia permesso di approfondire e risolvere numerosi problemi di natura statica e strutturale, si nota come le conoscenze tecnico-costruttive siano state buone fin dall'antichità, con la differenza che, in passato i costruttori si affidavano alla esperienza diretta o tramandata, mentre dal XVIII secolo in poi, la pratica edilizia basata sul "sapere

prima del fare” ha subito una diffusione esponenziale. In pratica, l’era moderna ha compiuto consapevolmente quel salto proposto per la prima volta da Galileo Galilei a metà Seicento: *dall’arte del costruire alla scienza del costruire*; la scienza ha infatti permesso di capire come risponderà la struttura alle sollecitazioni esterne ed interne prima della sua realizzazione, in modo da costruirla con materiali e tecniche tali da garantirne la sicurezza. L’ignoranza circa le leggi statiche e dinamiche non ha però impedito agli antichi di costruire e lasciare ai posteri un patrimonio edilizio eccezionale, affidandosi in toto alla loro grande sensibilità ed intuizione che, unite alla esperienza praticata in cantiere, hanno saputo in molti casi sopperire le lacune teoriche.

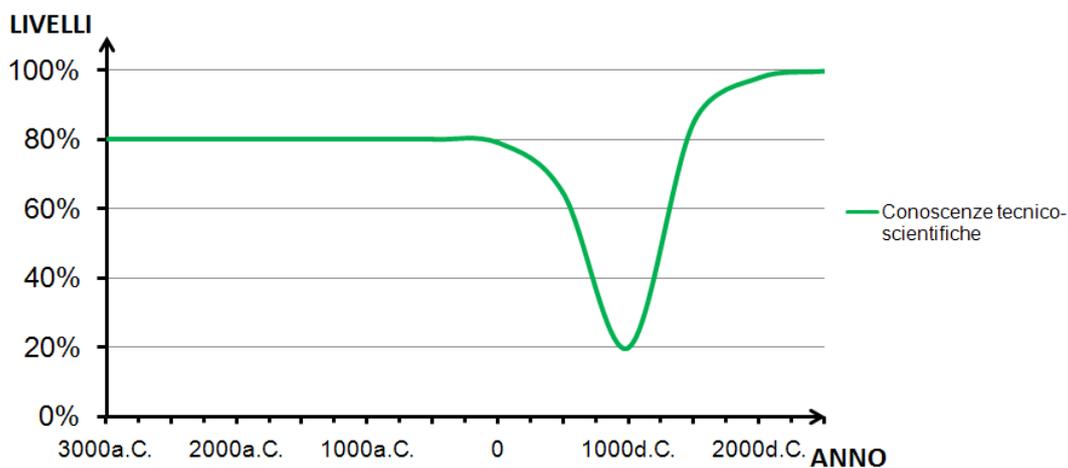


Figura 16.6: andamento delle conoscenze tecnico-scientifiche

16.6.2 La disponibilità ed il costo della manodopera

Bisogna ricordare che nell’antichità, e con tale termine ci si riferisce al periodo dell’antico Egitto, della Grecia classica e della Roma imperiale, vi era una grande, se non infinita, disponibilità di manodopera, addirittura non retribuita poiché spesso costretta alla schiavitù. Con il passare del tempo la disponibilità di manodopera è progressivamente diminuita e al contempo è aumentato il compenso da corrispondere ai lavoratori. In particolare, nella seconda metà del Novecento questo fenomeno è stato avvertito in maniera molto più acuta e spesso

le scelte progettuali riflettono la tendenza di evitare lavori manuali di una certa complessità, poiché il costo della manodopera sarebbe eccessivo.

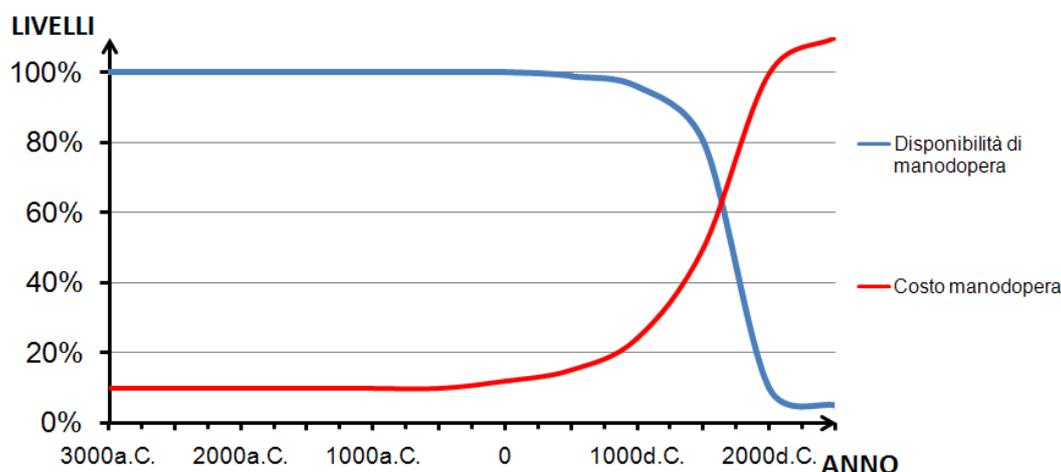


Figura 16.7: andamento disponibilità e costo manodopera

16.6.3 Le risorse finanziarie e l'entusiasmo dell'opinione pubblica

Nella prima scala temporale rappresentata, si nota un significativo abbassamento delle conoscenze tecnico-scientifiche dal 600 al 1100 d.C.. Tale è il periodo dell'Alto Medioevo in cui, a causa delle invasioni barbariche, la civiltà occidentale visse una fase di decadenza politica, sociale ed economica, che si tradusse in una stasi nella produzione artistica e culturale, riflettendosi anche nel settore dell'edilizia.

Prima di tale intervallo, le antiche civiltà avevano stanziato grandi investimenti per realizzare monumenti a celebrazione di faraoni, divinità, imperatori e condottieri. Analogamente dopo la crisi, cioè durante l'età gotica, rinascimentale e barocca furono le personalità a capo della Chiesa, delle monarchie, dei Ducati e delle Repubbliche a volere opere monumentali celebrative. Abbazie, chiese, castelli, palazzi e torri divennero simboli per affermare il potere e la grandezza dei pochi committenti, ma al contempo venivano anche viste come un vanto ed un arricchimento per l'intera comunità. La popolazione stessa ci teneva così tanto che, come spesso accade per le cattedrali gotiche, si impegnava da un punto di

vista economico nel contribuire alla loro realizzazione. Gli stessi ambiziosi fiorentini erano entusiasti della costruzione di Santa Maria del Fiore che sarebbe stata la più bella chiesa mai costruita e la sua cupola avrebbe reso la propria città unica nel mondo, come infatti è accaduto.

Nonostante l'epoca moderna e contemporanea abbia comportato, almeno per i paesi occidentali, un innalzamento della qualità dello stile di vita, il denaro da stanziare per le opere architettoniche ed ingegneristiche è diminuito in confronto al passato e con esso, la partecipazione dell'opinione pubblica, sempre più contraria a quello che si pensa essere uno spreco di risorse economiche. Le uniche ancora di salvezza e contemporanei trampolini per la sperimentazione di tecniche innovative e per il progresso del settore sono gli impianti per le manifestazioni sportive, quali i Giochi Olimpici, e per gli eventi fieristici, quali le Expo.

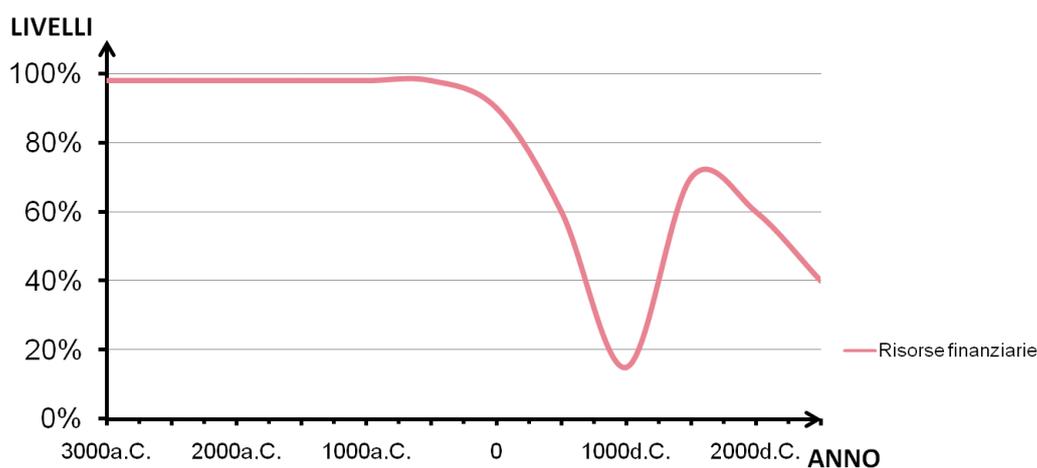


Figura 16.8: andamento risorse finanziarie

Infatti, i sentimenti di entusiasmo circa la possibilità di arricchire le metropoli di valide e prestigiose opere ad oggi sono scomparsi, entro un vortice di considerazioni finanziarie, politiche e legislative che hanno tarpato le ali a quel desiderio intimo in ogni uomo di rendere il luogo in cui vive degno di ammirazione.

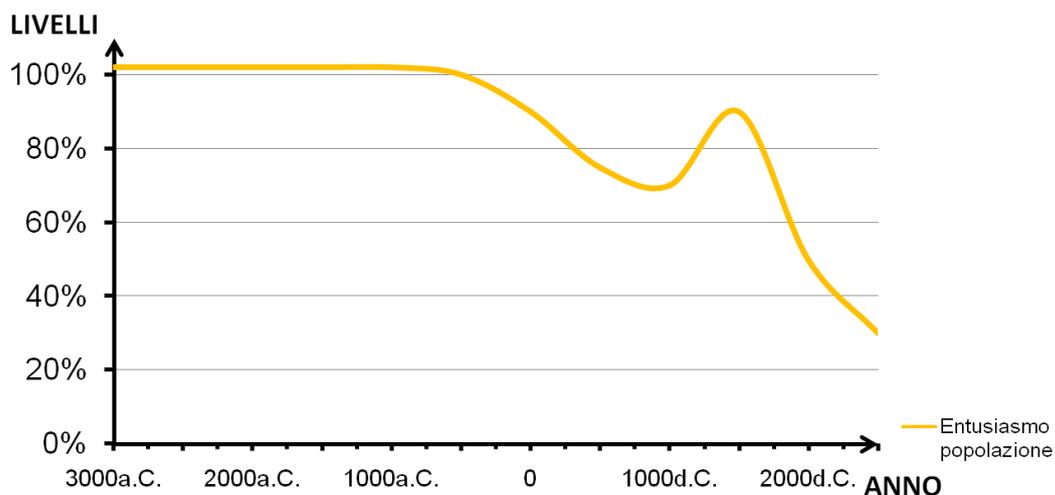


Figura 16.9: andamento entusiasmo della popolazione

Le potenzialità date dal progresso scientifico e tecnologico raggiunto nel XXI secolo non possono concretizzarsi di fronte alla paura (spesso non volontà) di osare, di sperimentare e soprattutto di primeggiare. Troppo spesso oramai le poche iniziative pubbliche e private si risolvono in frettolose ed economiche progettazioni, che comportano interventi privi di valore e nemmeno compatibili con l'edilizia ed il territorio circostante.

L'Italia possiede un patrimonio artistico ed architettonico invidiato da tutti che, tra l'altro, le garantisce di coprire una buona fetta del Prodotto Interno Lordo grazie al turismo culturale, ma che non sarebbe stato tale se le ambiziose committenze del passato non avessero consentito a quegli straordinari ingegneri di dare forma concreta alle proprie idee ed aspirazioni, realizzando costose opere, spesso senza una effettiva certezza matematica circa la loro riuscita.

17. PARTENONE: ANALISI STATICA E DINAMICA

17.1 Geometria

Il Partenone si può ritenere il massimo esempio del sistema trilitico e una delle meraviglie dell'edilizia antica. Si tratta di un tempio greco risalente al V secolo a.C. situato sull'Acropoli di Atene che ad oggi appare notevolmente danneggiato nonostante i restauri effettuati. La sua storia è stata molto travagliata; trasformato in chiesa cristiana e poi in moschea, si era conservato quasi integro fino al XVII secolo, ma nel Seicento venne utilizzato dai turchi come polveriera nella guerra contro Venezia quando, colpito da una cannonata, esplose subendo gravissimi danni. Ciò che si conosce con esattezza circa la struttura del tempio è quello che può essere direttamente testimoniato dagli elementi strutturali in marmo pentelico che ancora svettano nei cieli greci: colonne esterne, colonne interne, trabeazione, frontoni e porzioni della cella interna. Per quanto riguarda la copertura, dato che essa non è giunta fino ai nostri giorni, ricerche su letteratura specifica hanno suffragato l'ipotesi che il tetto fosse stato realizzato con lastre di marmo appoggiate sopra ad una trama di travi in legno, che le vicende del tempo hanno distrutto.

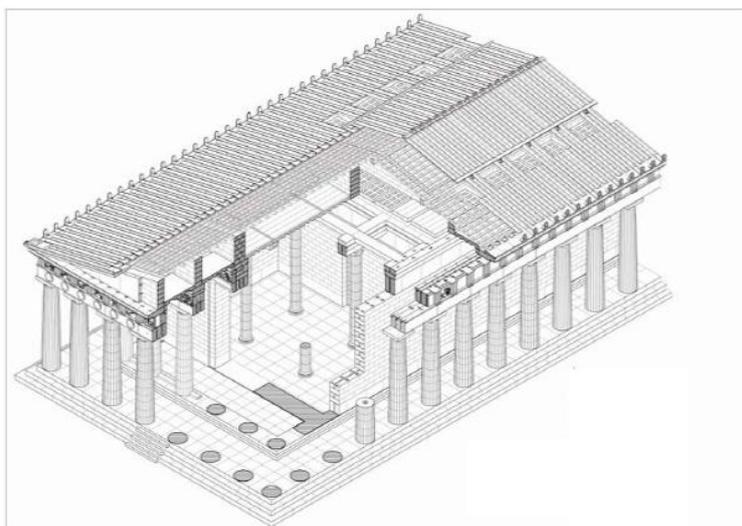


Figura 17.1: ricostruzione Partenone

17.1.1 Caratteristiche pianta

Dalla pianta riportata in figura 17.2, si può notare come il tempio sia *periptero* e *octastilo*. Lo stilobate misura 69,54 metri in senso longitudinale e 30,87 metri lungo la direzione trasversale e su di esso sono poste le colonne doriche del peristilio: 8 sul fronte e 17 su ciascun lato. All'interno dell'edificio, superati tre gradini, di un'altezza complessiva di 80 centimetri, vi era uno stretto ambulacro preceduto su entrambi i fronti da un vestibolo con 6 colonne doriche interne che precedeva l'ingresso nella cella. Quest'ultima era suddivisa in due parti da un muro interno: a est il *naos* (29,69 × 13,37 metri), dove era collocata la statua di Athena Parthenos e a ovest l'*opisthodomos* (19,19 × 13,37 metri), dove era custodito il tesoro. All'interno della cella orientale vi era un colonnato dorico disposto a Π, su due ordini sovrapposti, mentre in quella occidentale vi erano 4 colonne, probabilmente ioniche.

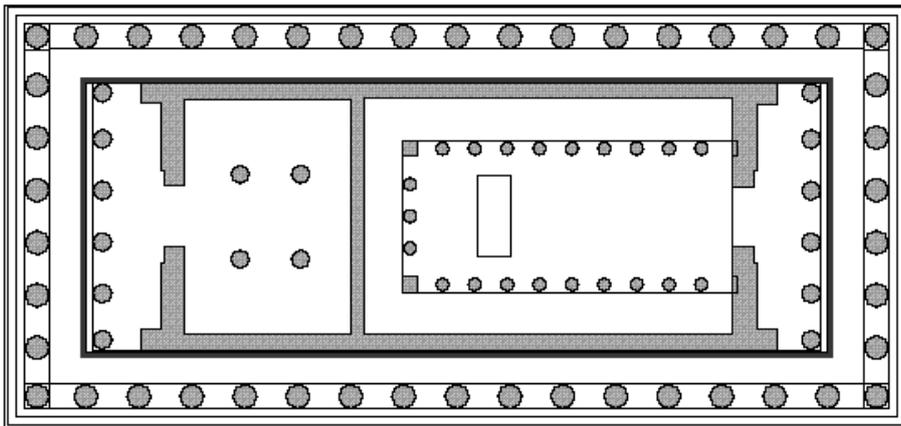


Figura 17.2: pianta Partenone

17.1.2 Caratteristiche alzato

L'altezza delle colonne esterne è di 11,70 metri, mentre le colonne interne e la cella risultano alte 10,90 metri, dato che il loro piano giace 80 centimetri più in alto rispetto a quello esterno.

La copertura a due falde, realizzata in lastre di marmo pentelico, era appoggiata su di un sistema di travi in legno. In particolare, il manto di copertura era sorretto da 5 travi longitudinali di sezione elevata su cui si appoggiavano travicelli, inclinati secondo la pendenza della falda ed incastrati nei blocchi di cornici della trabeazione perimetrale. Il carico gravante sull'orditura longitudinale veniva scaricato grazie a puntelli verticali che insistevano su travi orizzontali, disposte secondo la direzione trasversale. Data la grande luce degli ambienti, si pensi agli oltre 13 metri della cella, si realizzavano appositamente colonnati interni su cui appoggiare tali travi, diminuendone la luce e di conseguenza l'inflessione.

Il disegno in assonometria del Partenone, personalmente realizzato con AutoCad, può essere osservato in figura 17.3.

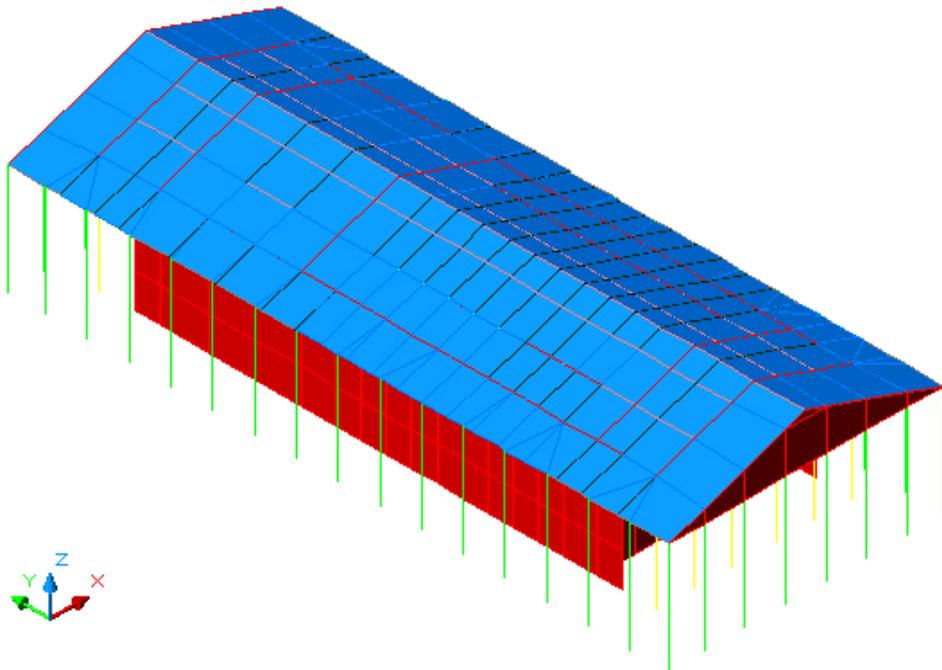


Figura 17.3: assonometria in AutoCad del Partenone

17.2 Modello agli elementi finiti

Si è realizzato il modello del Partenone con il programma di calcolo SAP 2000 al fine di effettuare un'analisi del comportamento statico e dinamico della struttura.

17.2.1 Modellazione colonne

In totale, il Partenone presenta 108 colonne, costituite da rocchi di marmo pentelico, che si è deciso di suddividere nei seguenti gruppi:

- 46 colonne esterne;
- 12 colonne interne;
- 23 colonne cella inferiori e 23 colonne cella superiori;
- 4 colonne tesoro.

Le colonne sono state modellate con elementi finiti monodimensionali tipo beam a due nodi, conferendo ad esse una sezione circolare realizzata con un materiale chiamato *marmo pentelico*, dotato delle seguenti caratteristiche meccaniche:

- ✓ Peso specifico $\gamma = 2500 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$
- ✓ Modulo di elasticità $E = 1000000 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$
- ✓ Resistenza $\sigma_{\text{comp}} = 70 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$; $\sigma_{\text{traz}} = 7 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$

Le colonne di un tempio dorico, e come tale anche quelle del Partenone, erano caratterizzate da una correzione ottica indicata con il nome di *entasi*, ovvero un rigonfiamento della sezione a circa un terzo dell'altezza. Conoscendo le misure del diametro alla base, cioè all'*imoscapo*, si è calcolata la misura del diametro in sommità, cioè al *sommoscapo*, sapendo che la larghezza in cima alla colonna è 4/5 di quella al piede, per effetto dell'entasi. Si è calcolato poi anche il diametro intermedio, effettuando la media matematica tra il diametro di base e quello in sommità. Al fine di modellare tale entasi ed ottenere una risposta strutturale più fedele alla realtà, le colonne sono state suddivise in 3 elementi finiti, attribuendo a quello inferiore il diametro di base, all'intermedio il diametro ottenuto con la media e al superiore il diametro di sommità. Le dimensioni adottate per i vari tipi di colonne sono riportate nella tabella 17.1.

Tipo di colonna	Diametro [cm]		
	Base	Intermedio	Sommità
Esterna	190,5	171,45	152,4
Inerna	178	160,2	142,5
Naos inferiore	110	99	88
Naos superiore	88	79,2	70,4
Tesoro	140	126	112

Tabella 17.1: diametri colonne

17.2.2 Modellazione trabeazione

La trabeazione, costituita dall'architrave, dal fregio (decorato con l'alternanza di metope e triglifi) e dal cornicione, correva lungo tutto il perimetro esterno, appoggiata sulle colonne del peristilio, ed inoltre era posta sulle colonne interne di entrambi i vestiboli. Come si vede dalla sezione longitudinale riportata in figura 17.4, i due ordini di colonne posti all'interno della cella erano collegati da un sistema architravato.

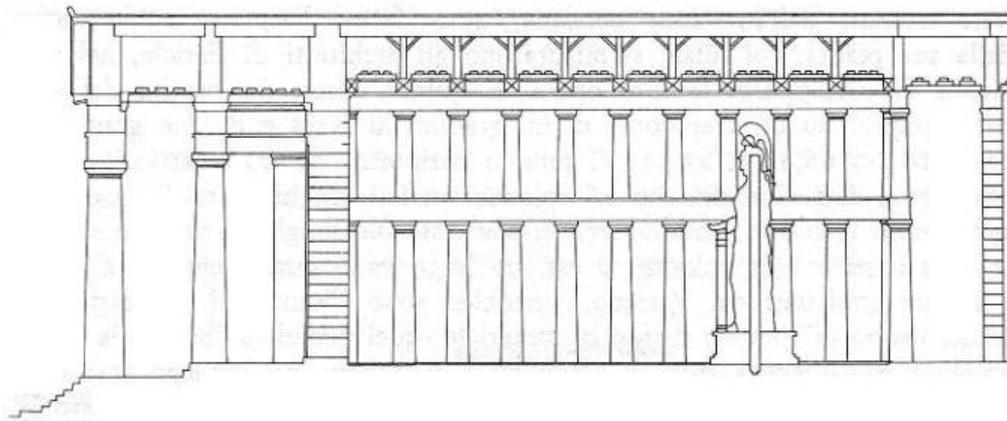


Figura 17.4: sezione longitudinale del naos

Si è scelto di modellare la trabeazione e tali architravi con elementi finiti tipo beam a cui si è attribuita una sezione rettangolare in marmo pentelico, dalle dimensioni differenti a seconda della loro destinazione. In particolare, si è separata la trabeazione esterna, da quella interna e da quella della cella, a sua volta suddivisa in inferiore e superiore. Le dimensioni delle sezioni si possono osservare nella tabella 17.2.

Tipo di trabeazione	Dimensione [cm]	
	Larghezza	Altezza
Esterna	152,4	300
Inerna	142,4	300
Naos inferiore	88	90
Naos superiore	70,4	60

Tabella 17.2: dimensioni trabeazione

17.2.3 Modellazione cella e frontoni

In relazione alle reali dimensioni dei propri muri, costruiti in opera quadrata isodomatica al di sopra di un filare di ortostati, la cella interna è stata modellata con elementi bidimensionali a 4 nodi tipo shell-thin in marmo pentelico, caratterizzati da differenti spessori. Essi sono riportati nella tabella 17.3, con riferimento alla pianta di figura 17.5.

Tipo cella	Spessore [cm]
1	170
2	130
3	200
4	110

Tabella 17.3: spessori cella

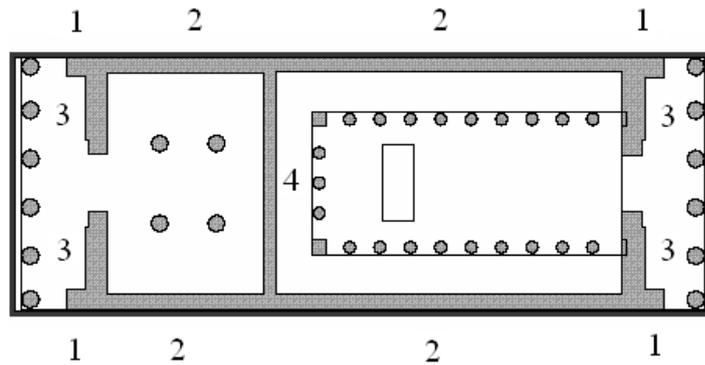


Figura 17.5: pianta cella

I frontoni posti sopra le colonne orientali e quelli posti sulle colonne occidentali sono stati realizzati con elementi bidimensionali a 4 nodi tipo shell-thin in marmo pentelico. Ai due frontoni esterni è stato attribuito uno spessore di 80 cm, mentre ai due interni uno spessore pari a 80 cm.

17.2.4 Modellazione copertura

La struttura lignea che sostiene i pannelli di copertura è formata dai seguenti componenti:

- travi trasversali;
- puntelli verticali;
- travi longitudinali;
- travi inclinate.

Questi sono stati modellati con elementi finiti monodimensionali a 2 nodi tipo beam, a cui è stata attribuita una sezione rettangolare in un materiale chiamato legno, caratterizzato dai seguenti parametri meccanici:

- ✓ Peso specifico $\gamma = 500 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$
- ✓ Modulo di elasticità $E = 100000 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$
- ✓ Resistenza $\sigma = 100 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$

Non conoscendo esattamente le dimensioni degli elementi strutturali dell'orditura del tetto poiché non pervenuti, si sono ragionevolmente ipotizzate le dimensioni delle loro sezioni, basandosi sulla luce massima che dovevano coprire. I valori scelti per la larghezza e l'altezza delle sezioni delle travi in legno sono riportate in tabella 17.4.

Tipo di trave	Dimensione [cm]	
	Larghezza	Altezza
Trasversale	50	60
Puntello	60	60
Longitudinale	50	60
Inclinata	50	50

Tabella 17.4: sezioni travi lignee

La copertura è stata modellata con elementi finiti bidimensionali a 4 nodi di tipo shell-thin in marmo pentelico dallo spessore di 3 centimetri.

17.2.5 Condizioni di vincolo

Si sono realizzati incastri, cioè vincoli che impediscono le 3 traslazioni e le 3 rotazioni nello spazio, alla base di tutte le 108 colonne e in tutti i nodi inferiori della prima fila di elementi shell che modellano la cella interna del tempio. Il modello tridimensionale di calcolo che è risultato a livello grafico è quello rappresentato in figura 17.6. e 17.7, riportato rispettivamente senza e con estrusione degli elementi componenti. Si indicano anche gli assi del sistema di riferimento considerato.

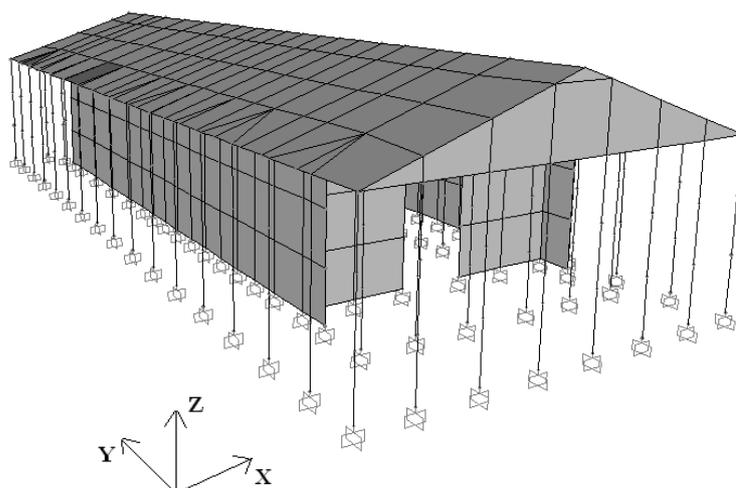


Figura 17.6: modello di calcolo tridimensionale con vincoli, senza estrusione

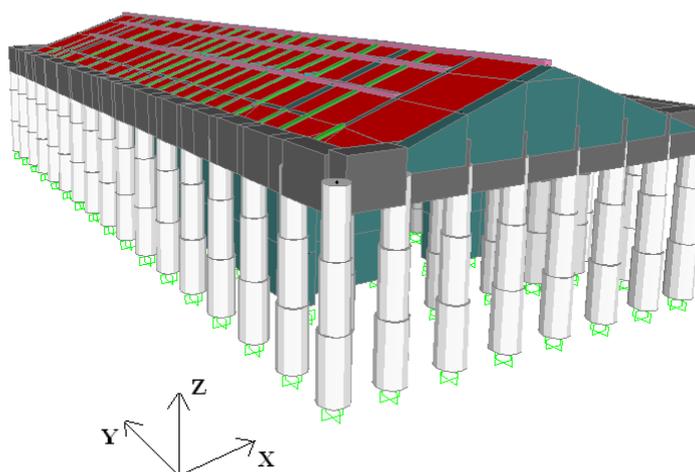


Figura 17.7: modello di calcolo tridimensionale con vincoli, con estrusione

17.2.6 Condizioni di carico

Al modello sono state applicate diverse tipologie di carico al fine di simulare le possibili situazioni che si possono verificare durante la vita utile dell'opera. Oltre al peso proprio degli elementi componenti la struttura, che il programma calcola automaticamente in base al peso specifico dei materiali designati, è stato inserito il peso del manto di copertura. Inoltre, sono state impresse all'intera struttura le forze dovute al sisma nelle direzioni X e Y, come carichi orizzontali distribuiti sui pannelli di copertura. Queste sono state valutate pari al 10% del peso, ottenuto

come somma del peso proprio delle strutture della porzione superiore dell'edificio e del peso del manto di copertura. Essendo:

- il peso proprio (trabeazione + frontoni + orditura in legno del tetto + marmo di copertura): = 3800 [t]
- il peso del manto di copertura: 128 [t]

dalla cui somma si ha un peso di 3928 [t]. Dato che la forza da applicare alla struttura è ipotizzata pari al 10% di tale valore, essa risulta di 400 [t] che, distribuita sull'area di 2129,3 [m²] della copertura, diventa un carico uniforme sulle piastre pari a 188 [Kg/m²].

Quindi, nel complesso, i carichi considerati sono i seguenti:

- ✓ Peso proprio degli elementi: calcolato dal software
- ✓ Peso del manto di copertura: 60 [Kg/m²]
- ✓ Sisma X: 188 [Kg/m²]
- ✓ Sisma Y: 188 [Kg/m²]

17.2.7 Combinazioni di carico

Considerando i carichi sopra descritti, si sono definite 3 combinazioni di carico, che vengono riportate nella tabella 17.5.

Combinazione di carico	<i>Comb1</i>	<i>Comb2</i>	<i>Comb3</i>
Peso proprio	✓	✓	✓
Manto di copertura	✓	✓	✓
Sisma X		✓	
Sisma Y			✓

Tabella 17.5: combinazioni di carico

17.3 Analisi statica

Applicando al modello i diversi carichi si sono ottenute le reazioni vincolari alla base della struttura, riportate nelle tabelle 17.6 e 17.7.

OutputCase	GlobalFX	GlobalFY	GlobalFZ
	Kgf	Kgf	Kgf
<i>DEAD</i>	-1,854E-08	8,378E-09	15595142,25
<i>Copertura</i>	1,943E-9	7,759E-11	127853,94
<i>SismaX</i>	-400609,01	-2,599E-10	2,376E-08
<i>SismaY</i>	1,311E-09	-400609,01	7,48E-09

Tabella 17.6: reazioni vincolari Fx, Fy, Fz

OutputCase	GlobalMX	GlobalMY	GlobalMZ
	Kgf-cm	Kgf-cm	Kgf-cm
<i>SismaX</i>	0,0002861	-568830927	6025921386
<i>SismaY</i>	568830927	-0,0002678	-13890000000

Tabella 17.7: reazioni vincolari Mx, My, Mz

17.3.1 Verifica reazioni vincolari

Si effettua la verifica delle reazioni vincolari più significative, opportunamente evidenziate con il grassetto.

La risultante delle reazioni vincolari in direzione Z, per la condizione di carico “DEAD”, equivale al peso proprio complessivo della struttura. Infatti si ha:

$$\sum F_z = 15600 [t]$$

Pari alla somma dei pesi dei singoli componenti del Partenone:

- colonne: 4285 [t]
- trabeazione: 2860 [t]
- pannelli di copertura: 159 [t]
- pareti della cella: 7560[t]
- frontoni: 625 [t]
- travi trasversali: 27[t]
- travi longitudinali: 45[t]
- travi inclinate: 60[t]
- puntelli: 14[t]

Totale = 15635 [t]

La risultante delle reazioni vincolari in direzione Z, per la condizione di carico “Copertura”, risulta:

$$\sum F_z = 128 [t]$$

In effetti, moltiplicando il carico del manto di copertura per la superficie su cui è applicato si ottiene il medesimo valore:

$$60 \text{ Kg} / \text{m}^2 \cdot 1064 \text{ m}^2 = 128 [t]$$

La risultante delle reazioni vincolari in direzione X, per la condizione di carico “Sisma X”, risulta pari alla forza sismica applicata lungo tale direzione:

$$\sum F_x = 400 [t]$$

La risultante delle reazioni vincolari in direzione Y, per la condizione di carico “Sisma Y”, risulta pari alla forza sismica applicata lungo tale direzione:

$$\sum F_y = 400 [t]$$

Il valore della sommatoria dei momenti attorno l’asse Y, per la condizione di carico “Sisma X”, risulta pari alla forza sismica applicata lungo la direzione X moltiplicata per il braccio rispetto al terreno. Infatti, poiché il Partenone è un sistema trilitico, si considera il caso di una mensola alta 11,70 [m] + 2,5 [m] (altezza colonne + metà altezza frontone) soggetta ad una forza orizzontale applicata in sommità, il cui momento alla base è:

$$M = F \cdot H = 400 [t] \cdot 14,2[m] = 5680 [t \cdot m]$$

Il valore calcolato dal SAP risulta in effetti molto simile:

$$\sum M_y = 5688 [t \cdot m]$$

Si procede analogamente per la verifica della sommatoria dei momenti attorno l’asse X, ovviamente risultato del medesimo valore, data la parità di carico sismico applicato nelle due direzioni.

$$\sum M_x = 5688 [t \cdot m]$$

17.3.2 Verifiche di resistenza

Si conducono le verifiche di resistenza dei seguenti elementi strutturali: colonne, trabeazione, graffe, travi trasversali, puntelli, travi longitudinali e travi inclinate.

Ci si sofferma con particolare attenzione sulle 108 colonne in marmo di cui è necessario verificare, oltre che resistano alla compressione presente, anche che la risultante cada entro il loro nocciolo centrale d'inerzia, data la sollecitazione di presso-flessione a cui sono soggette.

17.3.2.1 Verifica compressione colonne

Il valore di sforzo normale sollecitante le *colonne esterne* si ha nella combinazione di carico 3 e risulta pari a: $N_{\max} = 158461$ [Kg]. Sapendo che il diametro è di 190,5 cm, si calcola la tensione come:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{N}{\pi \cdot r^2} = \frac{158461}{28502} = 5,6 \text{ [kg / cm}^2\text{]} < 70 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

Il valore di sforzo normale sollecitante le *colonne interne* si ha nella combinazione di carico 3 e risulta pari a: $N_{\max} = 135939$ [Kg]. Sapendo che il diametro è di 178 cm, si calcola la tensione come:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{N}{\pi \cdot r^2} = \frac{135939}{24884,6} = 5,5 \text{ [kg / cm}^2\text{]} < 70 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

Il valore di sforzo normale sollecitante le *colonne della cella* si ha nella combinazione di carico 2 e risulta pari a: $N_{\max} = 41530$ [Kg]. Sapendo che il diametro è di 110 cm, si calcola la tensione come:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{N}{\pi \cdot r^2} = \frac{41530}{9503} = 4,4 \text{ [kg / cm}^2\text{]} < 70 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

Il valore di sforzo normale sollecitante le *colonne del tesoro* si ha nella combinazione di carico 2 e risulta pari a: $N_{\max} = 43929$ [Kg]. Sapendo che il diametro è di 140 cm, si calcola la tensione come:

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{N}{\pi \cdot r^2} = \frac{43929}{15393,8} = 2,9 \text{ [kg / cm}^2\text{]} < 70 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

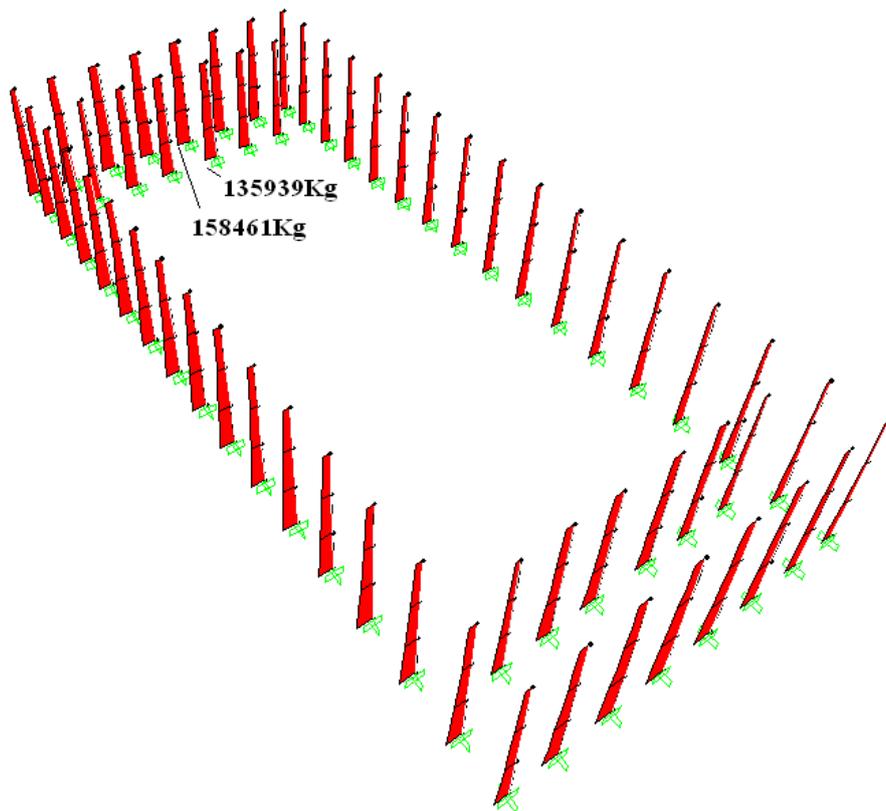


Figura 17.8: sforzo normale nelle colonne interne ed esterne dovuto alla combinazione di carico 3

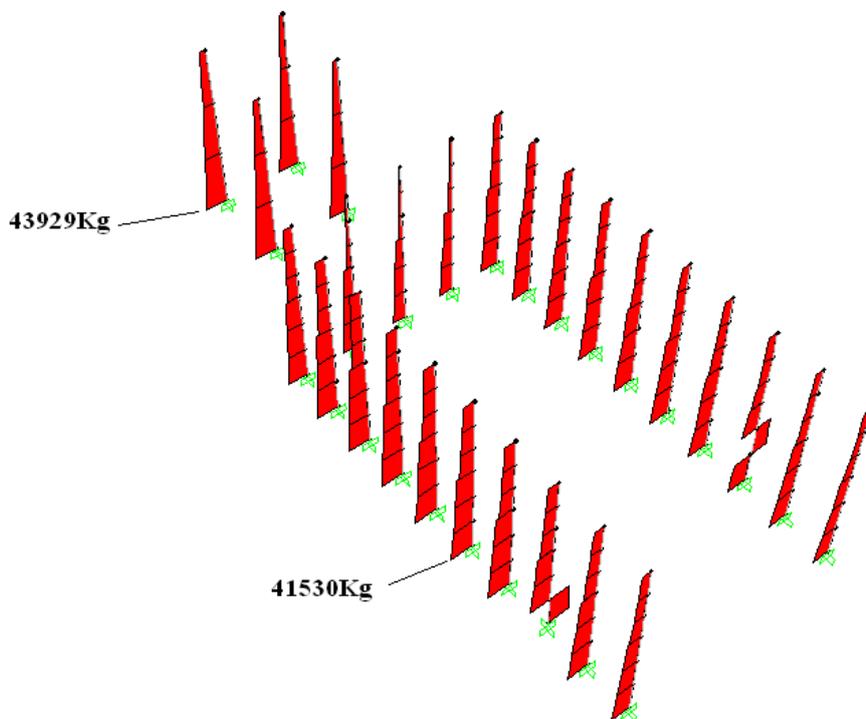


Figura 17.9: sforzo normale nelle colonne cella e tesoro dovuto alla combinazione di carico 2

17.3.2.2 Verifica eccentricità delle colonne

L'azione orizzontale dovuta al sisma genera degli elevati momenti flettenti alla base delle colonne, ma la contemporanea presenza dell'elevato sforzo normale di compressione dovuto alle oltre 15000 [t] di peso proprio della struttura, dovrebbe far sì che la risultante centri il nocciolo centrale di inerzia della sezione circolare delle colonne.

Come si vede dal disegno di figura 17.10, il nocciolo centrale di inerzia di una sezione circolare di diametro D è un cerchio di diametro d , tale che: $d = \frac{1}{4} \cdot D$.

Affinché la sezione risulti interamente compressa, è necessario che la risultante della sollecitazione di presso-flessione presente nella colonna ($N + M$) cada all'interno del nocciolo centrale di inerzia.

Bisogna quindi verificare che l'eccentricità e , ottenuta come rapporto tra il momento

flettente M e lo sforzo normale N sollecitanti, sia minore del raggio del cerchio di diametro d ; in pratica, deve essere verificata la seguente relazione:

$$e < \frac{1}{2} \cdot d$$

Tale verifica si conduce per la condizione più gravosa, cioè si effettua per quelle colonne di ciascun gruppo in cui si hanno i momenti massimi per le combinazioni di carico 2 e 3.

- *Colonne esterne*

$$\left. \begin{array}{l} D=190,5 [cm] \\ d=47,625[cm] \end{array} \right\} e < 23,8 [cm]$$

Nella combinazione di carico 3 si massimizza il momento che ruota attorno all'asse X, cioè M_{22} :

$$M_{22\max} = 660072 [Kg \cdot cm]$$

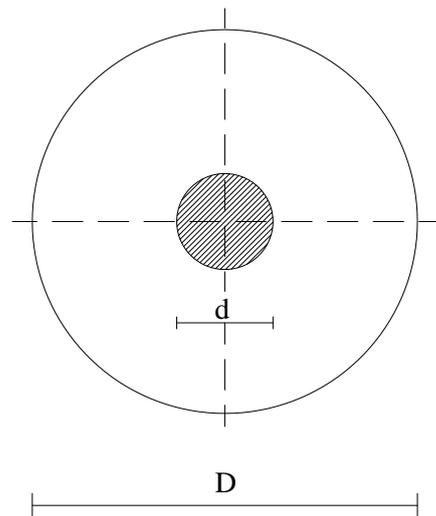


Figura 17.10: nocciolo centrale di inerzia di sezione circolare

$$N = 158460 \text{ [Kg]}$$

$$e = \frac{M}{N} = \frac{660072}{158460} = 4,2[\text{cm}] < 23,8[\text{cm}]$$

Nella combinazione di carico 2 si massimizza il momento che ruota attorno all'asse Y, cioè M_{33} :

$$M_{33\text{max}} = 2560480 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$N = 121087 \text{ [Kg]}$$

$$e = \frac{M}{N} = \frac{2560480}{121087} = 21,1[\text{cm}] < 23,8[\text{cm}]$$

- *Colonne interne*

$$\left. \begin{array}{l} D=178[\text{cm}] \\ d=44,5[\text{cm}] \end{array} \right\} e < 22,3 \text{ [cm]}$$

Nella combinazione di carico 3 si massimizza il momento che ruota attorno all'asse X, cioè M_{22} :

$$M_{22\text{max}} = 496697 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$N = 135939 \text{ [Kg]}$$

$$e = \frac{M}{N} = \frac{496697}{135939} = 3,7[\text{cm}] < 22,3[\text{cm}]$$

Nella combinazione di carico 2 si massimizza il momento che ruota attorno all'asse Y, cioè M_{33} :

$$M_{33\text{max}} = 1278359 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$N = 97177 \text{ [Kg]}$$

$$e = \frac{M}{N} = \frac{1278359}{97177} = 13,2[\text{cm}] < 22,3[\text{cm}]$$

- *Colonne cella*

$$\left. \begin{array}{l} D=110[\text{cm}] \\ d=27,5[\text{cm}] \end{array} \right\} e < 13,8 \text{ [cm]}$$

Nella combinazione di carico 3 si massimizza il momento che ruota attorno all'asse X, cioè M_{22} :

$$M_{22\text{max}} = 165528 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$N = 39059 \text{ [Kg]}$$

$$e = \frac{M}{N} = \frac{165528}{39059} = 4,2[cm] < 13,8[cm]$$

Nella combinazione di carico 2 si massimizza il momento che ruota attorno all'asse Y, cioè M_{33} :

$$M_{33\max} = 314517 [Kg \cdot cm]$$

$$N = 39573 [Kg]$$

$$e = \frac{M}{N} = \frac{314517}{39573} = 8[cm] < 13,8[cm]$$

- *Colonne tesoro*

$$\left. \begin{array}{l} D=140[cm] \\ d= 35[cm] \end{array} \right\} e < 17,5 [cm]$$

Nella combinazione di carico 3 si massimizza il momento che ruota attorno all'asse X, cioè M_{22} :

$$M_{22\max} = 92027 [Kg \cdot cm]$$

$$N = 42188 [Kg]$$

$$e = \frac{M}{N} = \frac{92027}{42188} = 2,2[cm] < 17,5[cm]$$

Nella combinazione di carico 2 si massimizza il momento che ruota attorno all'asse Y, cioè M_{33} :

$$M_{33\max} = 320315 [Kg \cdot cm]$$

$$N = 43928 [Kg]$$

$$e = \frac{M}{N} = \frac{320315}{43928} = 7,3[cm] < 17,5[cm]$$

Nelle figure 17.11 e 17.12, si riportano i diagrammi dei momenti flettenti in tutte le colonne nelle combinazioni di carico 2 e 3, con l'indicazione dei valori massimi con cui si è effettuata la precedente verifica di eccentricità.

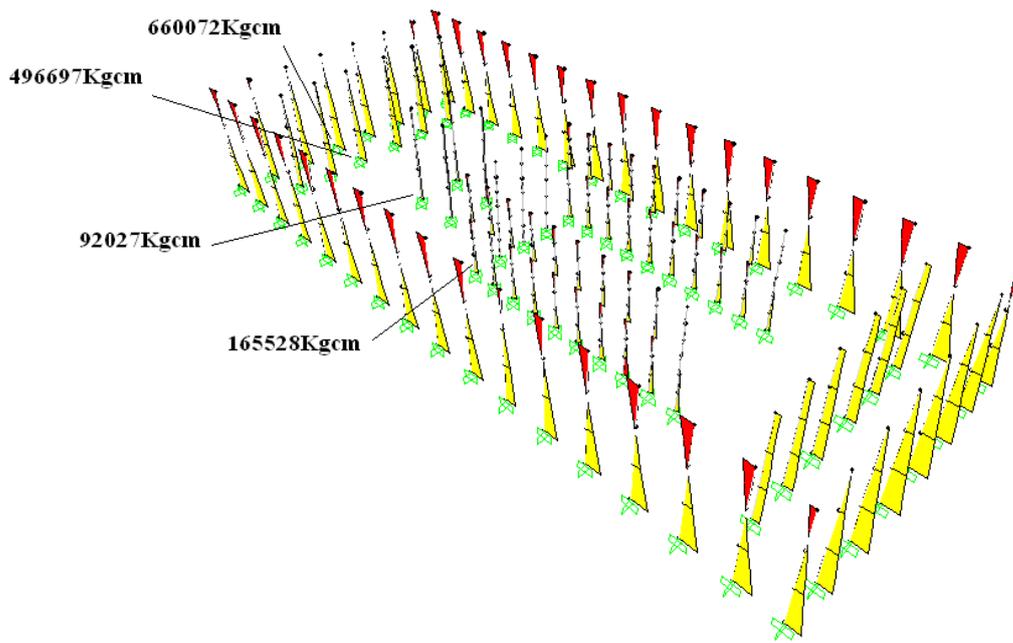


Figura 17.11: momenti flettenti M_{22} dovuti alla combinazione di carico 3

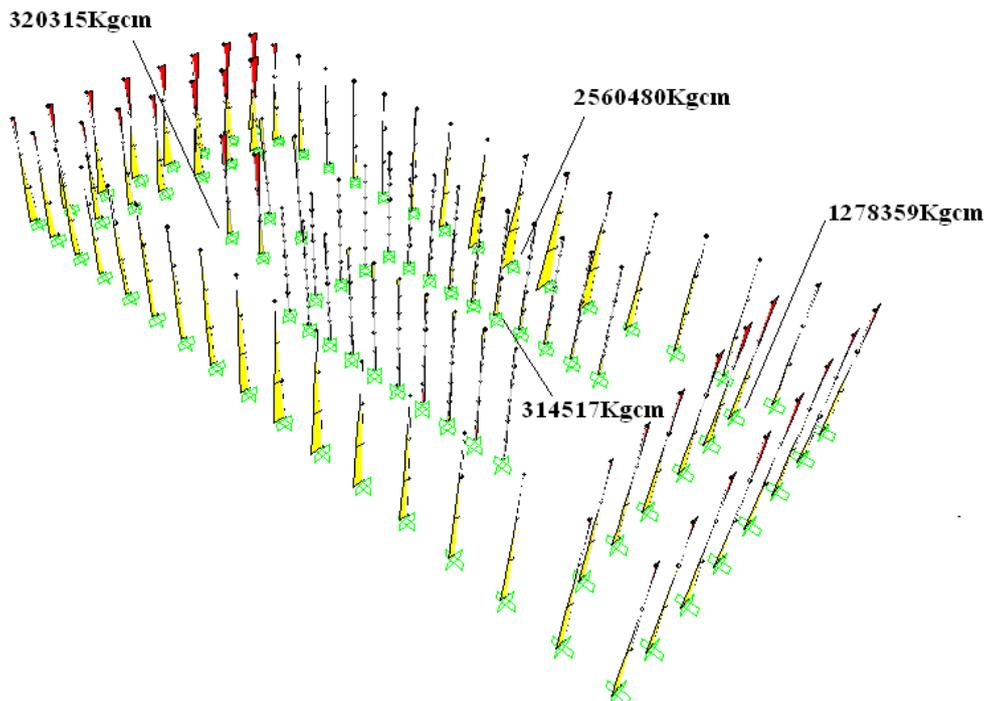


Figura 17.12: momenti flettenti M_{33} dovuto alla combinazione di carico 2

17.3.2.3 Verifica trabeazione

La verifica più gravosa per la trabeazione risulta quella a tenso-flessione.

$$N_{\max} = 16968 \text{ [Kg]}$$

$$A = B \cdot H = 152,4 \cdot 300 = 45720 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{16968}{45720} = 0,4 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{22\max} = 1574520 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]} \text{ nella combinazione 3}$$

$$W = \frac{300 \cdot 152,4^2}{6} = 1161288 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{1574520}{1161288} = 1,4 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{33\max} = 2789053 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]} \text{ nella combinazione 2}$$

$$W = \frac{152,4 \cdot 300^2}{6} = 2286000 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{2789053}{2286000} = 1,2 \text{ [kg / cm}^2\text{]} \leq 7 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = 0,4 + 1,4 + 1,2 = 3 \text{ [kg / cm}^2\text{]} \leq 7 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

17.3.2.4 Verifica graffe metalliche

Nell' immagine 17.13, oltre ad un disegno delle trabeazione, si riportano le foto, scattate durante i lavori di restauro, che ritraggono le graffe in bronzo sigillate con piombo fuso con cui i greci collegavano un blocco marmoreo all'altro.

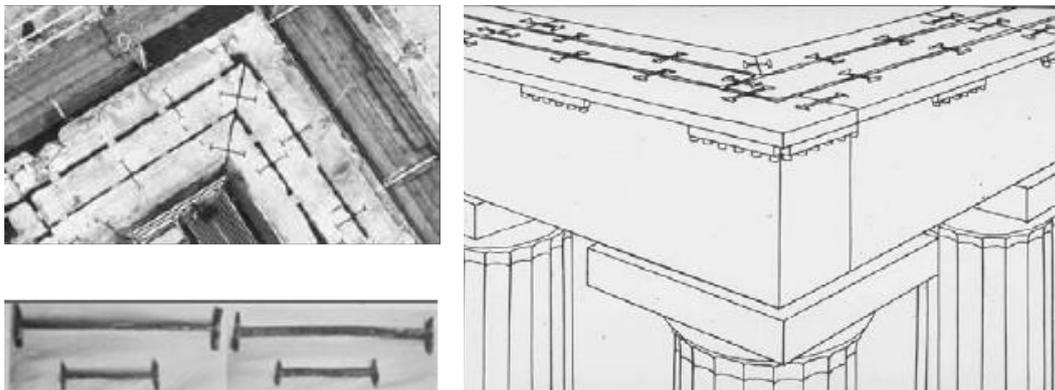


Figura 17.13: graffe in bronzo di collegamento dei blocchi marmorei

Tali elementi metallici possedevano una sezione rettangolare con dimensioni ipotizzate pari a 4×8 [cm] e una forma a doppio T.

Si deve verificare quindi che questi “legamenti artificiali delle pietre” (Milani, 1920) resistano allo sforzo di trazione a cui sono soggetti, esattamente pari al taglio in sommità della colonna, che ovviamente sarà massimo in corrispondenza di quelle combinazioni di carico in cui si considera l’azione sismica.

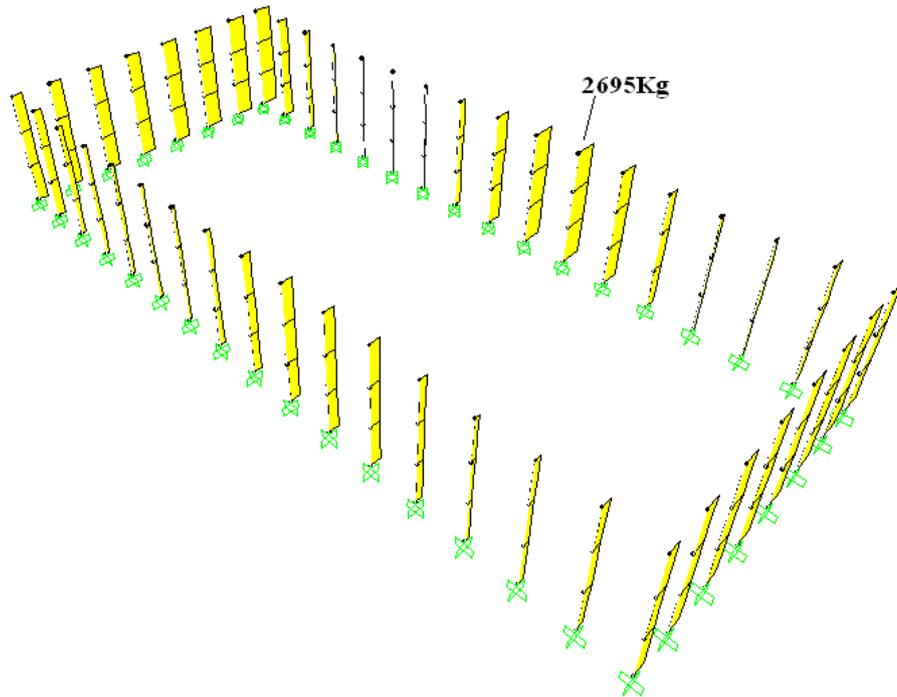


Figura 17.14: diagramma del taglio V_{22} delle colonne esterne nella combinazione di carico 2

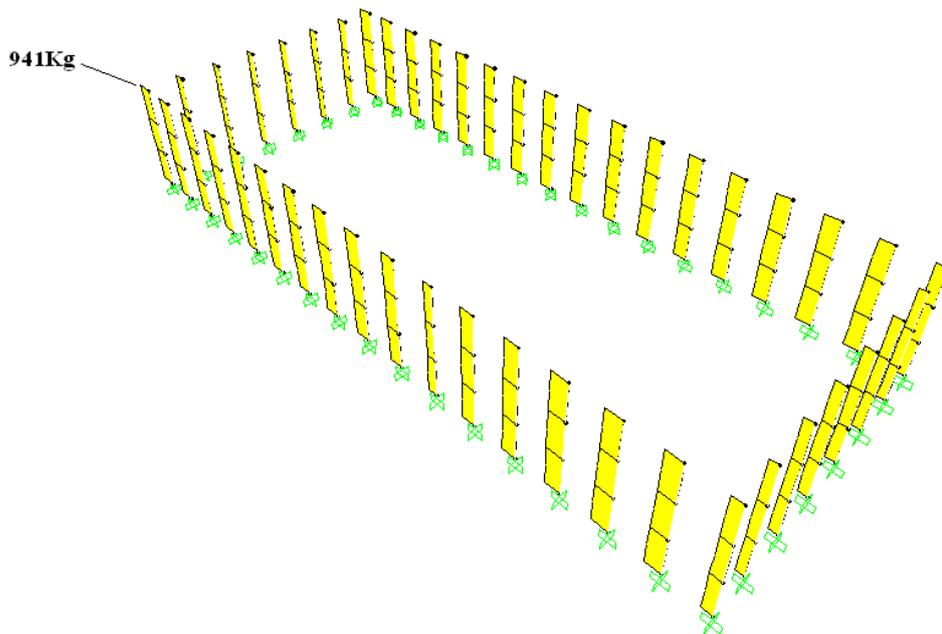


Figura 17.15: diagramma del taglio V_{33} delle colonne esterne nella combinazione di carico 3

Supponendo che il bronzo utilizzato abbia una resistenza a trazione di 200 $[Kg/cm^2]$ si ha:

$$V_{22max} = 2695[Kg] \text{ nella combinazione 2}$$

$$A = B \cdot H = 4 \cdot 8 = 32[cm^2]$$

$$\sigma = \frac{V}{A} = \frac{2695}{32} = 84 \text{ } \underline{Kg/cm^2} \leq 200 \text{ } \underline{Kg/cm^2}$$

$$V_{33max} = 941[Kg] \text{ nella combinazione 2}$$

$$A = B \cdot H = 4 \cdot 8 = 32[cm^2]$$

$$\sigma = \frac{V}{A} = \frac{941}{32} = 29 \text{ } \underline{Kg/cm^2} \leq 200 \text{ } \underline{Kg/cm^2}$$

17.3.2.5 Verifica travi di copertura

Si effettuano le verifiche a presso-flessione deviata per le travi lignee di copertura anche se, come si poteva ipotizzare, non presentano problemi di resistenza.

- *Travi Trasversali*

$$N_{max} = 4564 [Kg]$$

$$A = B \cdot H = 50 \cdot 60 = 3000 [cm^2]$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{4564}{3000} = 1,5 \text{ } \underline{Kg/cm^2}$$

$$M_{22max} = 31125 [Kg \cdot cm]$$

$$W = \frac{60 \cdot 50^2}{6} = 25000 [cm^3]$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{31125}{25000} = 1,2 \text{ } \underline{Kg/cm^2}$$

$$M_{33max} = 402294 [Kg \cdot cm]$$

$$W = \frac{50 \cdot 60^2}{6} = 30000 [cm^3]$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{402294}{30000} = 13,4 \text{ } \underline{Kg/cm^2}$$

$$\sigma = 1,5 + 1,2 + 13,4 = 16,1 \text{ } \underline{Kg/cm^2} \leq 100 \text{ } \underline{Kg/cm^2}$$

$$N_{\max} = -214 \text{ [Kg]}$$

$$A = B \cdot H = 50 \cdot 60 = 3000 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{214}{3000} = 0,07 \text{ [Kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{22\max} = -35145 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$W = \frac{60 \cdot 50^2}{6} = 25000 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{35145}{25000} = 1,4 \text{ [Kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{33\max} = -406438 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$W = \frac{50 \cdot 60^2}{6} = 30000 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{406438}{30000} = 13,5 \text{ [Kg / cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = 0,07 + 1,4 + 13,5 = 15 \text{ [Kg / cm}^2\text{]} \ll 100 \text{ [Kg / cm}^2\text{]}$$

- *Puntelli*

$$N_{\max} = 2802 \text{ [Kg]}$$

$$A = B \cdot H = 60 \cdot 60 = 3600 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{2802}{3600} = 0,8 \text{ [Kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{22\max} = 75526 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$W = \frac{60 \cdot 60^2}{6} = 36000 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{75526}{36000} = 2,1 \text{ [Kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{33\max} = 117985 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$W = \frac{60 \cdot 60^2}{6} = 36000 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{117985}{36000} = 3,3 \text{ [Kg / cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = 0,8 + 2,1 + 3,3 = 6,2 \text{ [Kg / cm}^2\text{]} \ll 100 \text{ [Kg / cm}^2\text{]}$$

$$N_{\max} = -6588 \text{ [Kg]}$$

$$A = B \cdot H = 60 \cdot 60 = 3600 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{6588}{3600} = 1,8 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{22\max} = -89106 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$W = \frac{60 \cdot 60^2}{6} = 36000 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{89106}{36000} = 2,5 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{33\max} = -110558 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$W = \frac{60 \cdot 60^2}{6} = 36000 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{110558}{36000} = 3,1 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = 1,8 + 2,5 + 3,1 = 7,4 \text{ [kg / cm}^2\text{]} \leq 100 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

- *Travi longitudinali*

$$N_{\max} = 1718 \text{ [Kg]}$$

$$A = B \cdot H = 50 \cdot 60 = 3000 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{1718}{3000} = 0,6 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{22\max} = 72126 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$W = \frac{60 \cdot 50^2}{6} = 25000 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{72126}{25000} = 3 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{33\max} = 208991 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$W = \frac{50 \cdot 60^2}{6} = 30000 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{208991}{30000} = 7 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = 0,6 + 3 + 7 = 10,6 \text{ [kg / cm}^2\text{]} \leq 100 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$N_{\max} = -1070 \text{ [Kg]}$$

$$A = B \cdot H = 50 \cdot 60 = 3000 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{1070}{3000} = 0,4 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{22\max} = -71128 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$W = \frac{60 \cdot 50^2}{6} = 25000 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{71128}{25000} = 2,8 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{33\max} = -275410 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$W = \frac{50 \cdot 60^2}{6} = 30000 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{275410}{30000} = 9,2 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = 0,4 + 2,8 + 9,2 = 12,4 \text{ [kg / cm}^2\text{]} \leq 100 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

- *Travi inclinate*

$$N_{\max} = 1855 \text{ [Kg]}$$

$$A = B \cdot H = 50 \cdot 50 = 2500 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{1855}{2500} = 0,8 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{22\max} = 18597 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$W = \frac{50 \cdot 50^2}{6} = 20833,3 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{18597}{20833,3} = 0,9 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{33\max} = 209797 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$W = \frac{50 \cdot 50^2}{6} = 20833,3 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{209797}{20833,3} = 10,1 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = 0,8 + 0,9 + 10,1 = 11,8 \text{ [kg / cm}^2\text{]} \leq 100 \text{ [kg / cm}^2\text{]}$$

$$N_{\max} = -2179 \text{ [Kg]}$$

$$A = B \cdot H = 50 \cdot 50 = 2500 \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = \frac{N}{A} = \frac{2179}{2500} = 0,9 \text{ [Kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{22\max} = -19073 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$W = \frac{50 \cdot 50^2}{6} = 20833,3 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{19073}{20833,3} = 1 \text{ [Kg / cm}^2\text{]}$$

$$M_{33\max} = -196557 \text{ [Kg}\cdot\text{cm]}$$

$$W = \frac{50 \cdot 50^2}{6} = 20833,3 \text{ [cm}^3\text{]}$$

$$\sigma = \frac{M}{W} = \frac{196557}{20833,3} = 9,4 \text{ [Kg / cm}^2\text{]}$$

$$\sigma = 0,9 + 1 + 9,4 = 11,3 \text{ [Kg / cm}^2\text{]} < 100 \text{ [Kg / cm}^2\text{]}$$

17.4 Analisi Dinamica

Lanciando l'analisi dinamica modale con il programma di calcolo agli elementi finiti, si ottiene che il periodo fondamentale del Partenone, così come è stato modellato, risulta pari a:

$$T = 0,079702 \text{ [s]}$$

Le frequenze e i periodi dei primi 12 modi di vibrare sono elencati in figura 17.16, mentre il primo modo fondamentale di vibrare è riportato in figura 17.17.

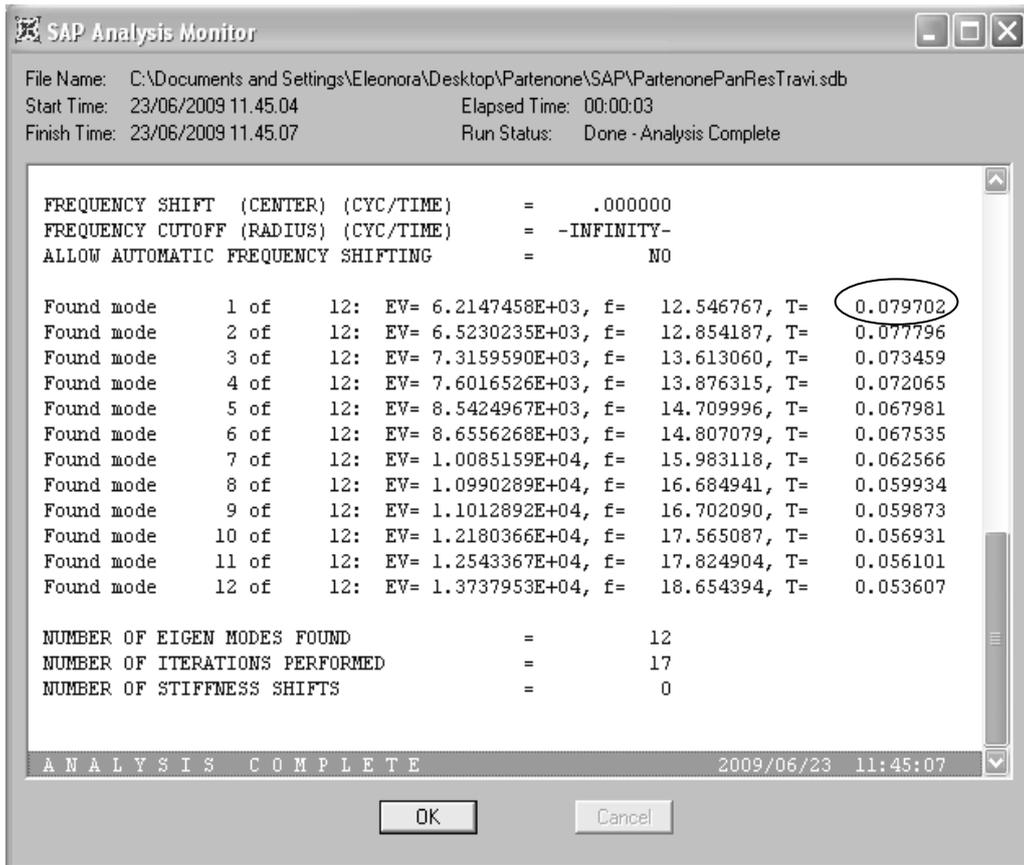


Figura 17.16: frequenze e periodi dei primi 12 modi di vibrare

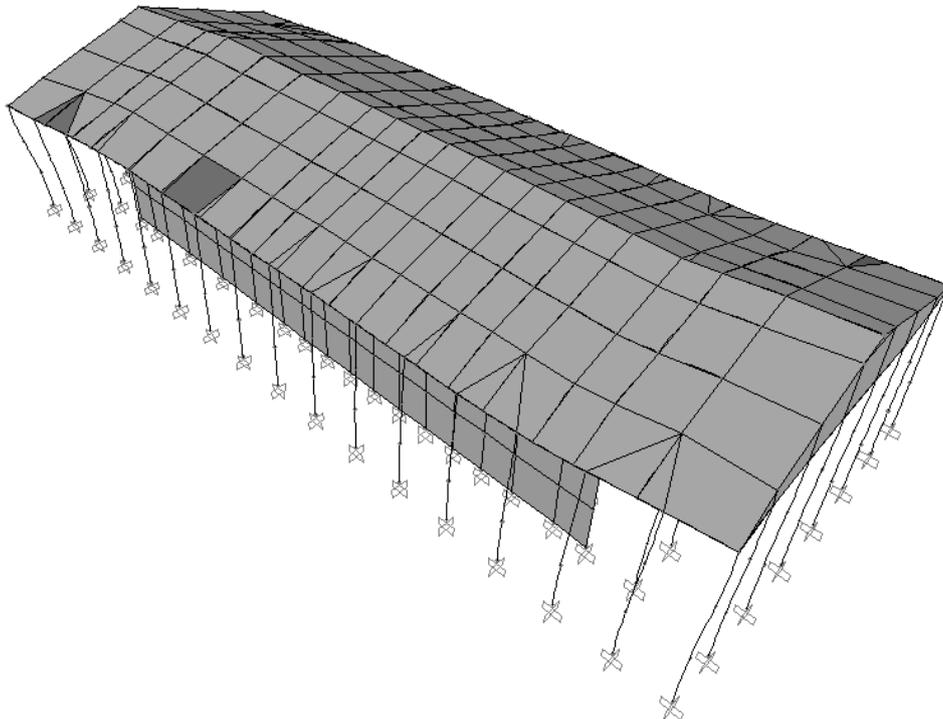


Figura 17.17: primo modo di vibrare, T=0,079702 [s]

Una verifica approssimativa circa la bontà del risultato consiste nel ricordare che il periodo proprio di un telaio in cemento armato si attesta intorno a 0,1 [s] a piano. Il periodo del tempo greco, considerato come una costruzione ad un unico piano, dovrebbe risultare quindi di 0,1 [s], ma il modello fornisce un valore leggermente inferiore, poiché si deve considerare che:

1. Nel Partenone è presente la cella interna con pareti portanti in marmo che aumenta notevolmente la rigidità complessiva della struttura. Infatti, la cella costituisce una sorta di nucleo centrale di controventamento con una rigidità di $K = \frac{3 \cdot EI}{h^3}$ che, a parità di altezza (h) e di materiale (E) rispetto alle colonne, presenta un momento di inerzia 3 ordini di grandezza superiore:

$$I_{cella} = \frac{130 \cdot 1300^3}{12} = 2,4 \cdot 10^{10} [cm^4]$$

$$I_{colonna} = \frac{\pi \cdot 95^4}{4} = 6,4 \cdot 10^7 [cm^4]$$

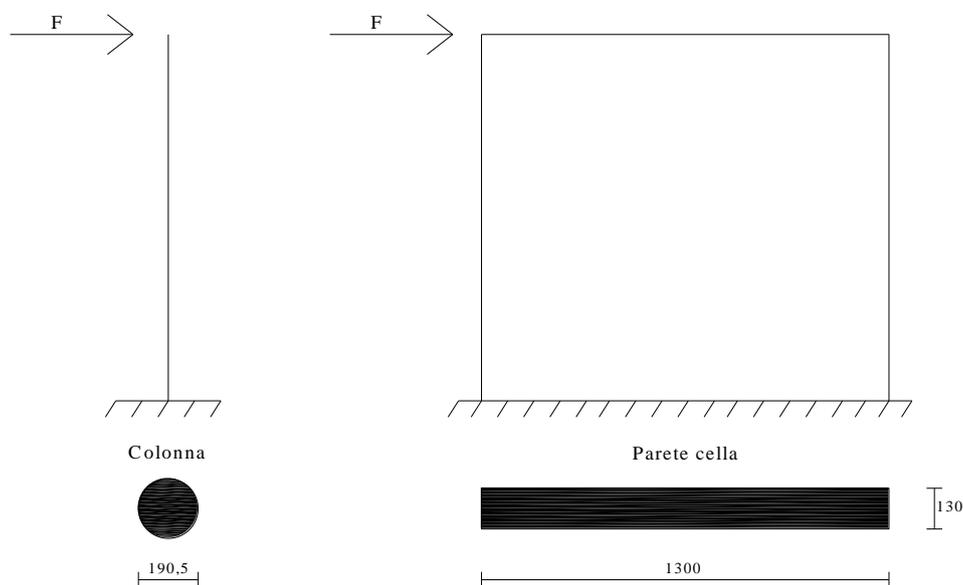


Figura 17.18: sezioni resistenti all'azione orizzontale in cm della colonna esterna e della parete della cella

2. Il Partenone è un sistema trilitico, in cui le colonne sono assimilabili a delle mensole con una rigidezza pari a $K = \frac{3 \cdot EI}{h^3}$, inferiore alla rigidezza

$$K = \frac{12 \cdot EI}{h^3} \text{ propria delle colonne di un telaio tipo shear-type in c.a..}$$

In conclusione, il grande aumento di rigidezza dovuto alla presenza della cella interna viene in parte compensato dalla grande flessibilità delle colonne e, complessivamente, la rigidezza risulta leggermente superiore rispetto a quella di un sistema intelaiato in c.a.. Quindi, sapendo che il periodo proprio di oscillazione si calcola come:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{K}}$$

all'aumentare della rigidezza K, il periodo T deve diminuire. Ciò è dimostrato dal risultato ottenuto con il modello, ovvero un periodo di poco inferiore rispetto al valore previsto:

$$T = 0,079702 [s] < 0,1[s]$$

17.4.1 Storia sismica

La Grecia è un territorio sismico che nel corso della storia è stato sottoposto a numerose scosse, più o meno violente. In figura 17.19, si riporta la distribuzione dei sismi con magnitudo maggiore di 6 avvenuti nella Grecia centrale, arricchita dell'indicazione del corrispettivo anno in cui tali fenomeni si sono verificati. Sebbene nell'età moderna il progresso sociale e scientifico abbia consentito di raccogliere una quantità sufficiente di registrazioni

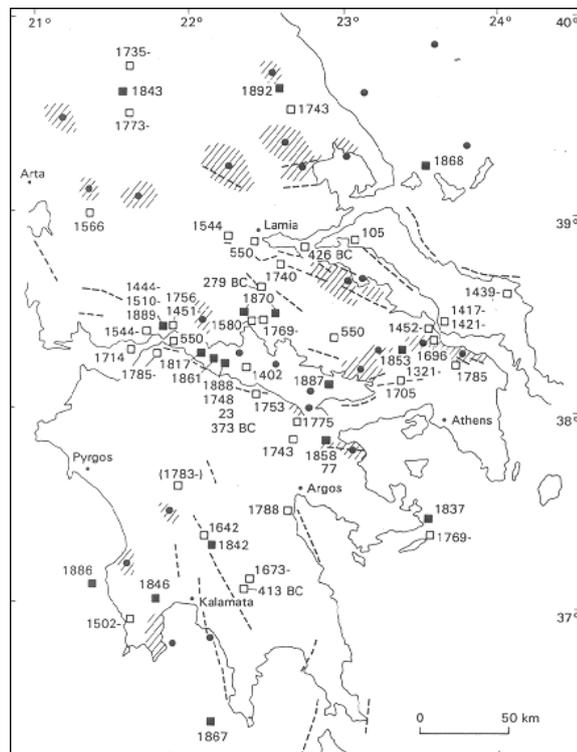


Figura 17.19: distribuzione sismi di $M_s > 6$ nella Grecia centrale (Ambraseys and Jackson, 1990)

sismiche, che con il passare degli anni è diventata sempre più dettagliata, la ricostruzione storica dei sismi avvenuti nel passato è molto difficile, a causa proprio della mancanza di dati e documentazioni. A dimostrazione di ciò, si può notare dalle date riportate nella piantina, che la maggior parte di sismi segnalati è avvenuta dopo il 1400. Fanno eccezione quelle scosse talmente forti da provocare danni enormi anche in regioni molto lontane nello spazio e per questo inevitabilmente testimoniate, nonostante avvenute in tempi molto remoti.

Per quanto riguarda Atene, i testi degli antichi scrittori greci confermano che il primo forte terremoto a cui sia stata sottoposta la città risale al 426 a.C., responsabile anche dello spostamento di 2,5 centimetri di un terzo della facciata del Partenone (Korres, 1985). Non sono mai pervenute testimonianze riguardo sismi avvenuti nel periodo che va dal II secolo d.C. al XVIII secolo d.C., non perché non ve ne furono, ma a causa del lungo periodo di decadenza sociale che attraversò la città, ormai tristemente lontana dai fasti dell'antichità. Successivamente, si verificarono forti terremoti nel 1705, nel 1894, nel 1914, nel 1928, nel 1930 e nel 1981, localizzati a distanze comprese tra i 40 e i 130 chilometri dal centro di Atene.

Negli anni recenti, il sisma che ha provocato i danni maggiori, tra cui 143 morti e 40 edifici collassati, è avvenuto il 7 settembre del 1999, localizzato in un'area a 20 chilometri a nord di Atene.

Il territorio colpito da tale forte terremoto appartiene alla zona II del codice sismico greco che prevede un'accelerazione effettiva pari a $0,16 \cdot g$. In figura 17.20, si riporta lo spettro di risposta elastico previsto dalla normativa antisismica greca per uno smorzamento del 5%, confrontato con lo spettro di risposta delle accelerazioni della componente orizzontale del sisma in questione, registrato nelle tre stazioni indicate con i nomi di ATH2, ATH3, ATH4.

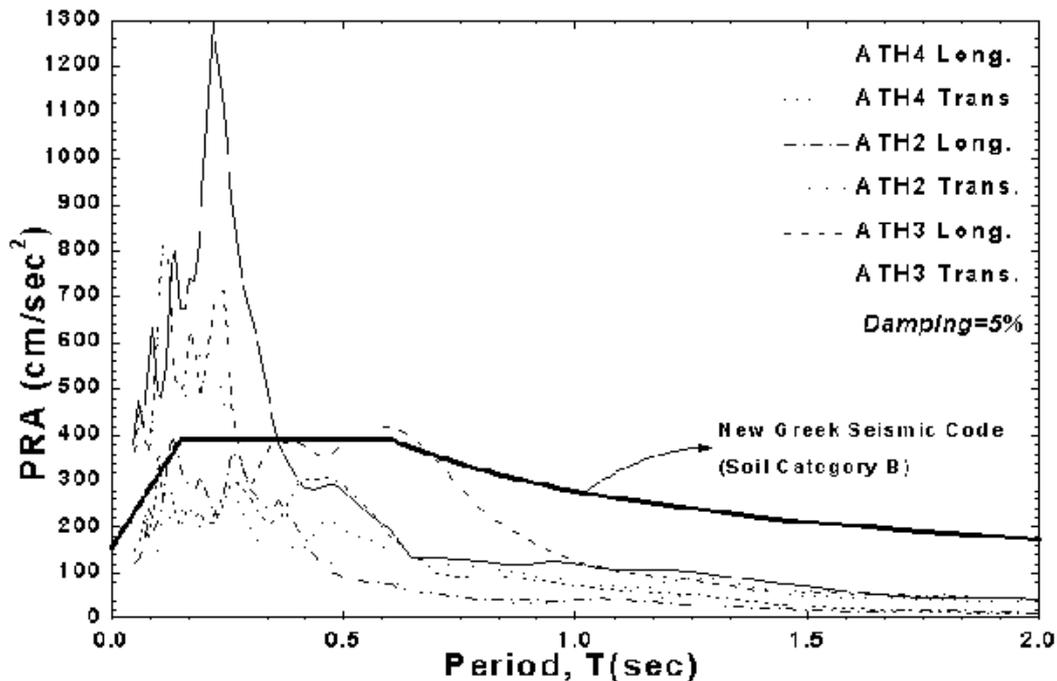


Figura 17.20: spettro di risposta delle accelerazioni del sisma del 07/09/1999 confrontato con lo spettro di progetto elastico della normativa sismica greca (ITSAK)

Si nota come il valore massimo di accelerazione effettivamente registrato è stato molto superiore a quello previsto da normativa. In particolare, prendendo in considerazione l'andamento più gravoso, l'accelerazione è stata all'incirca di 0,6·g in corrispondenza di periodi di 0,1 secondi, è salita fino ad un picco di 1,3·g in corrispondenza di periodi pari a 0,25 secondi e poi è scesa progressivamente, fino a raggiungere valori prossimi a 0,025·g per periodi superiori a 2 secondi.

In corrispondenza del periodo proprio di vibrazione del Partenone $T = 0,079702$ [s], l'accelerazione sarebbe risultata di 0,5·g e quindi il sisma del settembre 1999 avrebbe esercitato sulla struttura una forza orizzontale pari al 50% del peso proprio. Infatti:

$$F = m \cdot a = m \cdot 0,5 \cdot g = 0,5 \cdot W$$

Essendo $g = 9,8$ [m/s^2] l'accelerazione di gravità;

m: massa della struttura;

$W = m \cdot g$: peso proprio della struttura.

Tale azione orizzontale sarebbe stata sicuramente troppo forte e avrebbe provocato il crollo della struttura. Infatti, anche considerando un'accelerazione

sismica inferiore, solamente di 0,10·g, la forza orizzontale sulla struttura risulterebbe di:

$$F = m \cdot a = m \cdot 0,10 \cdot g = 0,10 \cdot W = 0,10 \cdot 16000 = 1600 [t]$$

Applicando tali 1600 [Ton], come forze distribuite sulle superfici di copertura con il valore di 751 [Kg/m²], la verifica a compressione delle colonne è soddisfatta, ma la verifica di eccentricità nelle combinazioni di carico 2 e 3 assolutamente no. Infatti, l'azione orizzontale è così violenta da generare delle sollecitazioni flettenti negli elementi verticali talmente alti, da far cadere al di fuori del nocciolo centrale di inerzia la risultante della presso-flessione presente, provocando la crisi delle colonne, realizzate in un materiale non resistente a trazione come il marmo.

A dimostrazione di ciò, si riportano i calcoli effettuati per le colonne esterne ed interne considerando i momenti generati dalla forza orizzontale di 1600 [t], da cui si può constatare la notevole eccentricità della risultante:

- *Colonne esterne*

$$M_{33\max} = 7533512 [Kg \cdot cm]$$

$$N = 122269 [Kg]$$

$$e = \frac{M}{N} = \frac{7533512}{122269} = 61,6 [cm] > 23,8 [cm]$$

- *Colonne interne*

$$M_{33\max} = 4244854 [Kg \cdot cm]$$

$$N = 101819 [Kg]$$

$$e = \frac{M}{N} = \frac{4244854}{101819} = 41,7 [cm] > 22,3 [cm]$$

Un'accelerazione sismica di soli 0,10 g sarebbe quindi fatale per il Partenone. A questo punto risulta ovvio domandarsi: -come e perchè il tempio è riuscito a resistere quasi indenne alle violenti scosse a cui è stato sottoposto, per oltre due millenni?

17.4.2 La colmata persiana

Si cerca di dare una risposta a tale quesito, definendo imprescindibile la presenza nell'edificio di dispositivi antisismici, necessari nella lotta contro le scosse

sismiche che ne hanno travagliato la storia. Infatti, al fine di rendere la struttura più resistente alle azioni orizzontali, oltre all'inserimento di graffe metalliche per collegare i vari blocchi di marmo della trabeazione e del muro della cella, si è riscontrata la presenza al di sotto dello stilobate di uno strato soffice di materiale. Questo ha contribuito a rendere il piano di posa omogeneo, livellando le irregolarità del terreno, ma ha costituito anche una sorta di filtro isolante nei confronti del sisma. Si sa infatti che la piattaforma rettangolare in marmo è stata collocata sopra di un letto deformabile in grado di smorzare le vibrazioni sismiche, realizzato con i resti e i detriti delle costruzioni ateniesi distrutte durante la guerra con i persiani. Ciò è stato dimostrato dagli scavi effettuati da Kavvadias tra il 1882 e il 1890, a sud e a sud-est del Partenone, in cui emerse una grande quantità di reperti archeologici caratterizzati da tracce evidenti di distruzione per incendio. Tale deposito di materiale è stato chiamato dagli studiosi "Perserschutt", ovvero *la colmata persiana*, poiché costituito dalle macerie di elementi architettonici e scultorei, causate dalla distruzione e dal saccheggio di Atene del 480 a.C., perpetuato dai persiani. I detriti, insieme agli ex-voto e agli oggetti ormai considerati profanati, furono seppelliti sull'Acropoli, realizzando quei terrapieni funzionali necessari per la ricostruzione. In particolare, l'invasione di Serse aveva interrotto la costruzione del Partenone pre-pericleo e la colmata persiana servì quindi da base per il più grande e successivo Partenone pericleo, la cui crepedine si sovrappose in parte a quella dell'edificio raso al suolo dai persiani ma si allargò anche, date le maggiori dimensioni del nuovo tempio.

Indipendentemente dalla consapevolezza con cui i costruttori greci lo sfruttarono, tale cumulo di macerie è divenuto base per gli edifici dell'Acropoli e può essere considerato un dispositivo antisismico paragonabile ai moderni isolatori. Questi ultimi sono elementi posti tra la fondazione e l'elevazione che, grazie alla loro scarsa rigidità alla traslazione laterale, concentrano su di sé la deformazione e trasformano la struttura in un sistema ad un unico grado di libertà. Inoltre, la loro elevata flessibilità fa aumentare notevolmente il periodo di vibrazione del sistema, che passa a valori di:

$$T = 2 \div 2,5[s]$$

Dato che le accelerazioni sismiche maggiori si registrano generalmente nell'intervallo di $T = 0,1 \div 0,7[s]$, in corrispondenza di periodi così più alti, lo spettro di risposta del sisma è più basso e di conseguenza l'edificio è sottoposto ad azioni orizzontali inferiori.

Nel caso del Partenone, si ipotizza quindi che il substrato deformabile alzi il primo periodo proprio fondamentale sino a: $T = 2,5[s]$. Si realizza per questo un ulteriore modello agli elementi finiti del Partenone in cui, in corrispondenza dei nodi di base, si mettono vincoli che impediscono le rotazioni e la traslazione in direzione Z, oltre che molle con una rigidezza alla traslazione orizzontale in direzione X e Y, pari a $K_{x,y} = 640 [Kg / cm]$.

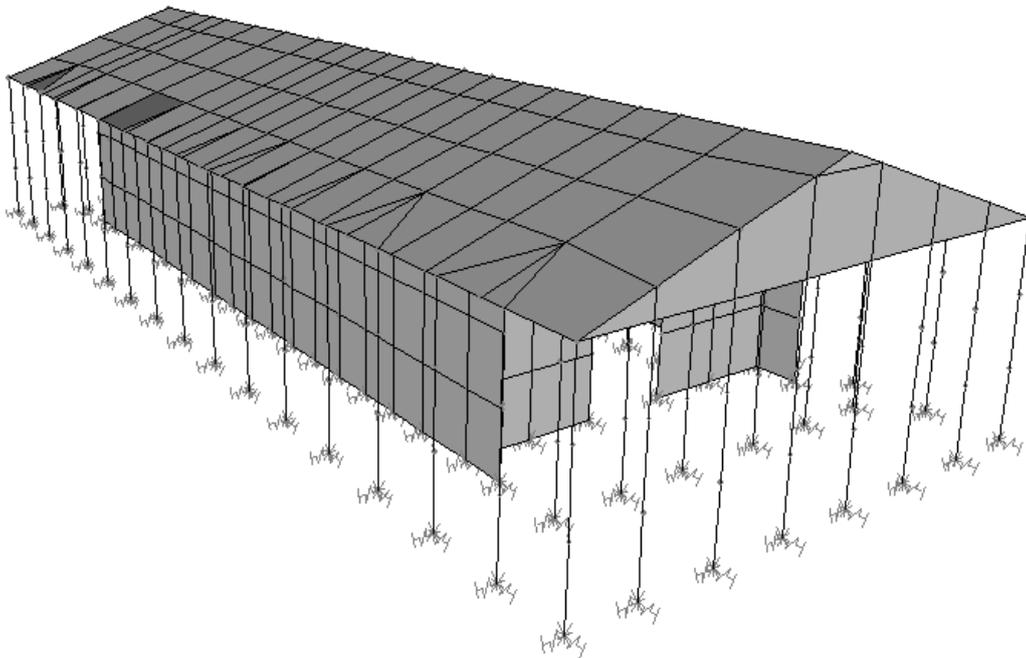


Figura 17.21: modello di calcolo con le molle poste in corrispondenza dei nodi di base

Tale valore è calcolato come la rigidezza equivalente orizzontale di un moderno isolatore sismico. Infatti:

$$T = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{K}}$$

$$2,5 = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{K}}$$

$$6,25 = 4\pi^2 \cdot \frac{m}{K}$$

$$K = \frac{4\pi^2 \cdot m}{6,25}$$

$$m = \frac{P}{g} = \frac{100}{g} = 10,2[t \cdot s^2 / m] \text{ essendo } P \text{ il carico medio su ogni colonna}$$

$$K = \frac{4\pi^2 \cdot 10,2}{6,25} = 64[t / m] = 640 [Kg / cm]$$

In tal maniera, si è modellata la presenza del “filtro isolante” posizionato al di sotto del Partenone e dall’analisi dinamica modale si ottiene un primo periodo pari a:

$$T = 2,721403 [s]$$

come si può notare dalla figura 17.22

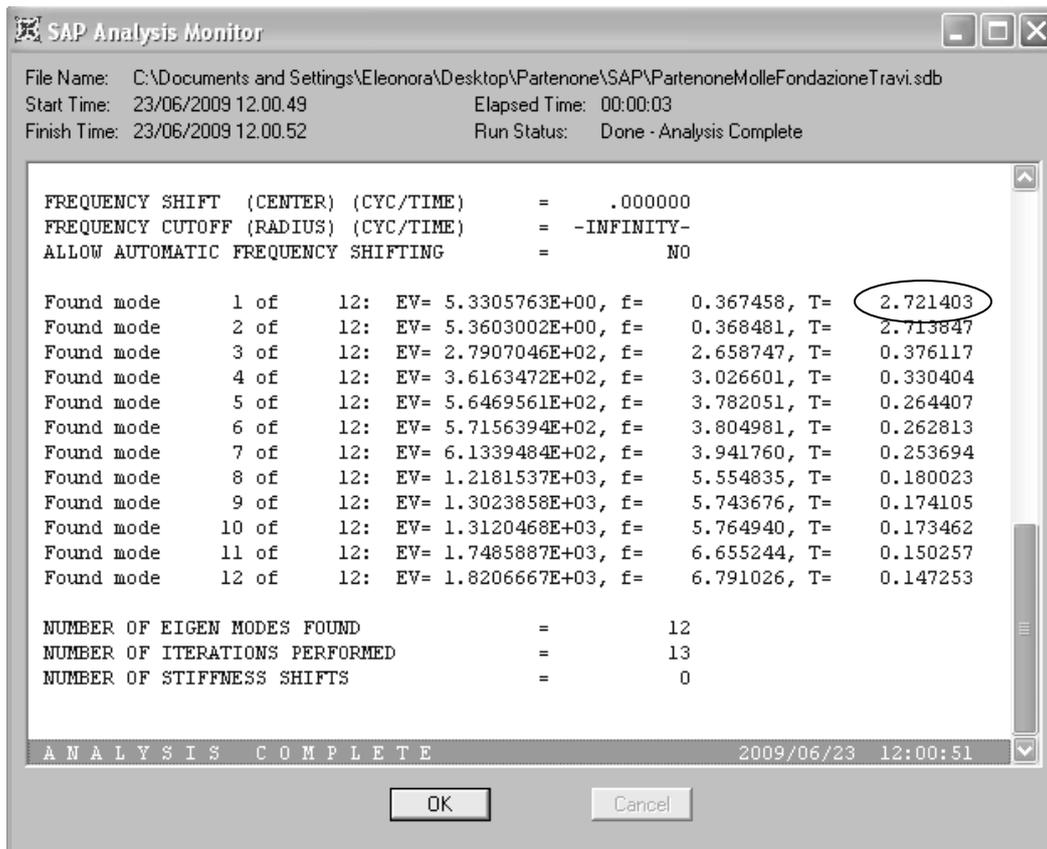


Figura 17.22: frequenze e periodi dei primi 12 modi di vibrare

In corrispondenza di tale periodo, lo spettro delle accelerazioni fornisce valori di accelerazione molto bassi: $a=0,025 \cdot g$; quindi la forza sismica sollecitante risulta:

$$F = m \cdot a = m \cdot 0,025 \cdot g = 0,025 \cdot W = 0,025 \cdot 16000 = 400 [t]$$

Questo è esattamente il valore della azione sismica che si è applicata alla struttura per effettuare l'analisi statica (cfr. 17.3.2) e con cui sono risultate soddisfatte tutte le verifiche.

18. PALAZZETTO DELLO SPORT DI ROMA: ANALISI STATICA E DINAMICA

18.1 Geometria

Il Palazzetto dello Sport è stato costruito tra il 1956 e il 1957, in occasione delle Olimpiadi di Roma del 1960. Pier Luigi Nervi fu il creatore ed il progettista di tale edificio, avvalendosi della collaborazione di Annibale Vitellozzi. Ne si svolge l'analisi statica e dinamica poiché è un mirabile esempio di struttura spingente, appartenente alla categoria dei gusci sottili in cemento armato.

Si tratta di un impianto a pianta circolare facilmente adattabile alle diverse discipline sportive indoor e dotato degli appositi servizi ricavati al di sotto delle gradinate, dove si può ospitare un numero variabile tra i 4000 e i 5000 spettatori.

Dal punto di vista strutturale, il Palazzetto dello Sport di Roma è una calotta sferica che insite su una corona perimetrale di 36 cavalletti a forma di Y, disposti in direzione radiale ed inclinati lungo il medesimo profilo della cupola. Essi costituiscono l'ideale prolungamento della copertura fino a terra, ove sono ancorati ad un anello circolare di fondazione.

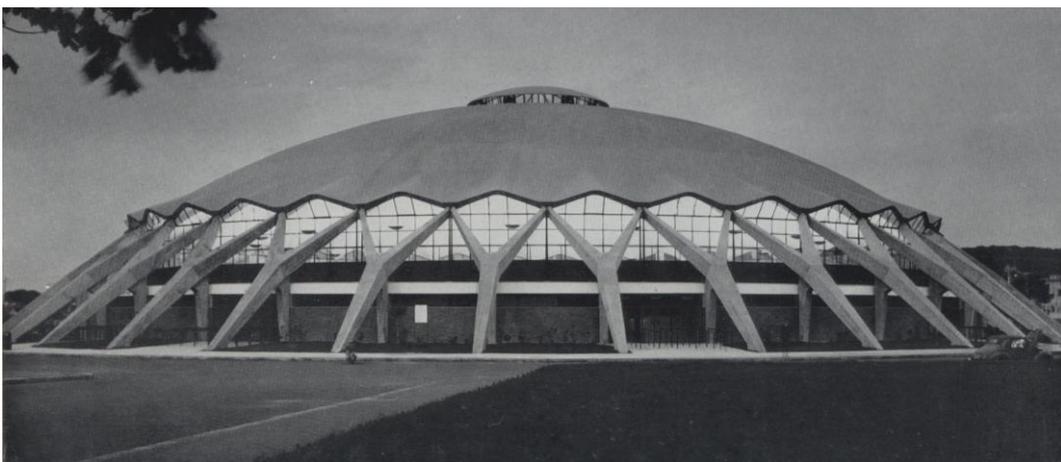


Figura 18.1: veduta esterna (Desideri, 1992)



Figura 18.2: veduta interna (Desideri, 1992)

18.1.1 Caratteristiche cupola

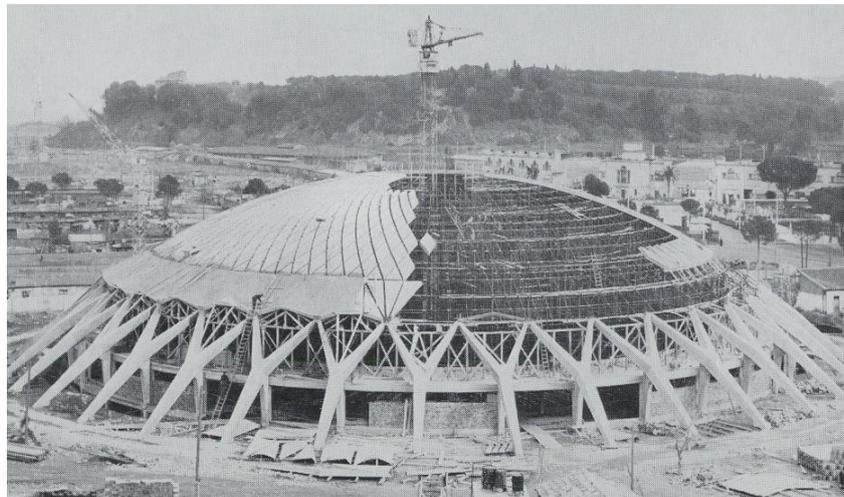


Figura 18.3: montaggio tavelloni prefabbricati (Desideri, 1992)

La cupola è una calotta sferica avente un diametro di 60 metri, con altezza di 21 metri in chiave rispetto al livello di gioco e di 7 metri rispetto al piano di imposta. Come si vede in figura 18.3, tale copertura è stata realizzata mediante l'assemblaggio di 1620 elementi romboidali dallo spessore di 2,5 centimetri; realizzati a terra, all'interno di casseforme in muratura, e poi sollevati da una gru operante al centro dell'edificio in costruzione, sono stati posizionati in opera su di un ponteggio metallico. Successivamente, si sono gettate le nervature e la soletta

di ricoprimento, completando la copertura in un tempo record di 30 giorni. Il tavellone prefabbricato tipo in c.a. presenta uno spessore di circa 5 centimetri e delle nervature verticali di un'altezza pari a 30 centimetri.

18.2.1 Caratteristiche cavalletti

Il collegamento della calotta con i cavalletti avviene tramite i cosiddetti “ventagli strutturali” ad ognuno dei quali compete $1/36$ della spinta della copertura. I cavalletti scaricano l'azione ricevuta sull'anello di fondazione, realizzato in cemento armato precompresso e caratterizzato da un diametro di 81,5 metri e da uno spessore di 2,5 metri. Come si vede dalla figura 18.4, in cui ne è rappresentato lo schema statico, il cavalletto, oltre ad assorbire la spinta della volta S , trasmettendone la componente verticale V al terreno e la componente orizzontale H alla fondazione anulare, è anche dotato di un elemento verticale atto a scaricare a terra il proprio peso P . Tale puntone è alto 5 metri, mentre l'altezza complessiva del cavalletto è di 10 metri.

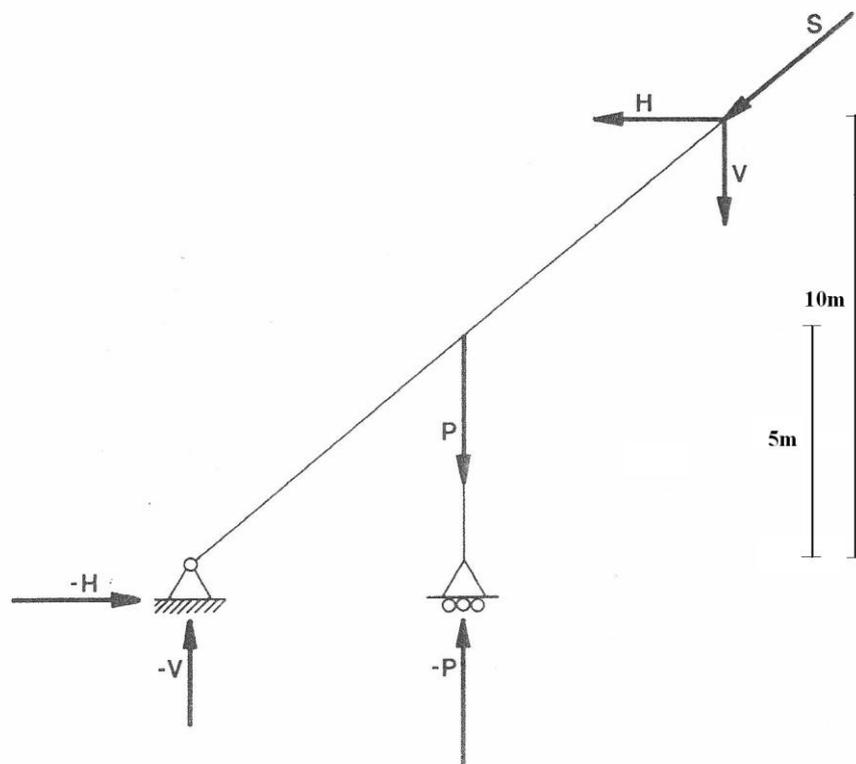


Figura 18.4: schema statico cavalletto (da P. Desideri)



Figura 18.5: particolare dei cavalletti a Y

Si è disegnato il Palazzetto dello Sport con AutoCad, rispettando in maniera fedele le dimensioni degli elementi strutturali appena descritti; in figura 18.6 è riportata la visione prospettica del disegno tridimensionale realizzato.

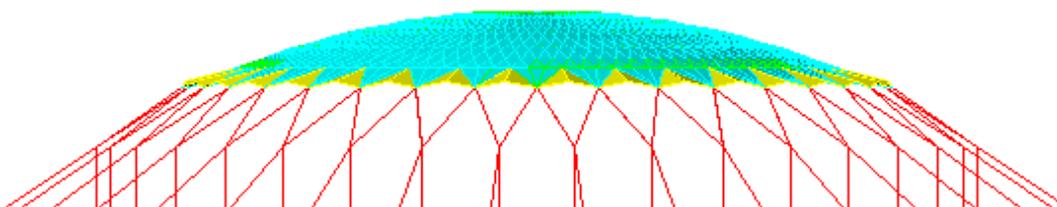


Figura 18.6: prospetto del Palazzetto realizzato con AutoCad

18.2 Modello agli elementi finiti

Si è realizzato il modello del Palazzetto dello Sport di Roma con il programma di calcolo SAP 2000, al fine di effettuare un'analisi del comportamento statico e dinamico della struttura.

18.2.1 Modellazione cavalletti

In totale, il Palazzetto presenta 36 cavalletti, realizzati in cemento armato e con una forma a Y. Essi sono stati modellati con elementi finiti monodimensionali tipo beam a 2 nodi, conferendo loro una sezione rettangolare realizzata con un

materiale chiamato *conc*, dotato delle seguenti caratteristiche meccaniche (si ipotizza un calcestruzzo Rck 350):

- ✓ Peso specifico $\gamma = 2500 \text{ [Kg/m}^3\text{]}$
- ✓ Modulo di elasticità $E = 326000 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$
- ✓ Resistenza di progetto $f_{cd} = 164 \text{ [Kg/cm}^2\text{]}$;

Al fine di modellare l'effettiva sezione dei cavalletti, essi sono stati suddivisi in più elementi finiti. In particolare, ogni elemento di sostegno è stato suddiviso nelle seguenti tre porzioni:

- una parte inferiore: tratto F-E;
- una parte superiore: tratto D-C
- un puntone verticale: tratto G-G2 .

I tratti F-E e D-C sono stati suddivisi in tre elementi finiti, mentre il tratto G-G2 in due. Le dimensioni delle sezioni adottate per i vari tratti dei cavalletti, riportate nella tabella 18.1, sono coerenti con quelle effettivamente progettate dall'ingegnere Nervi e trovate raffigurate nei disegni tecnici di Paolo Desideri.

Porzione di cavalletto	Tratto di cavalletto	Dimensioni [cm]		Schema sezioni
		Base	Altezza	
Inferiore	Sez. F	40	65	
	Sez. EF	65	90	
	Sez. E	90	90	
Superiore	Sez. D	58	70	
	Sez. CD	40	50	
	Sez. C	25	40	
Puntone	Sez. G	50	40	
	Sez. G2	68	40	

Tabella 18.1: sezioni cavalletti

18.2.2 Modellazione calotta

La calotta è stata modellata con elementi finiti tipo shell-thin a 4 nodi, di forma romboidale, a cui è stato attribuito il materiale *conc*. A tali piastre si è conferito uno spessore di 5 centimetri al fine di modellare complessivamente i tavelloni prefabbricati e la soletta di completamento gettata sopra di essi. Elementi finiti shell-thin triangolari a 3 nodi, con medesima sezione e materiale dei precedenti,

sono stati adottati per i ventagli strutturali e le volte che li collegano, in corrispondenza dell'imposta della calotta.

Anche le nervature presenti all'intradosso della copertura a guscio sono state modellate con elementi finti tipo shell-thin quadrangolari a 4 nodi in *conc*, con uno spessore di 5 centimetri.

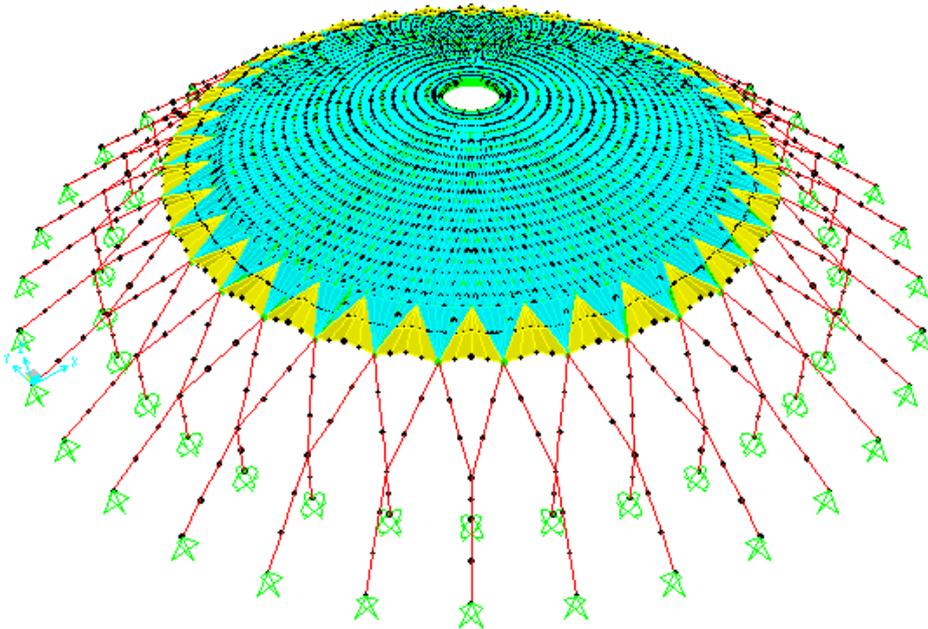


Figura 18.7: modello di calcolo tridimensionale con vincoli. senza estrusione

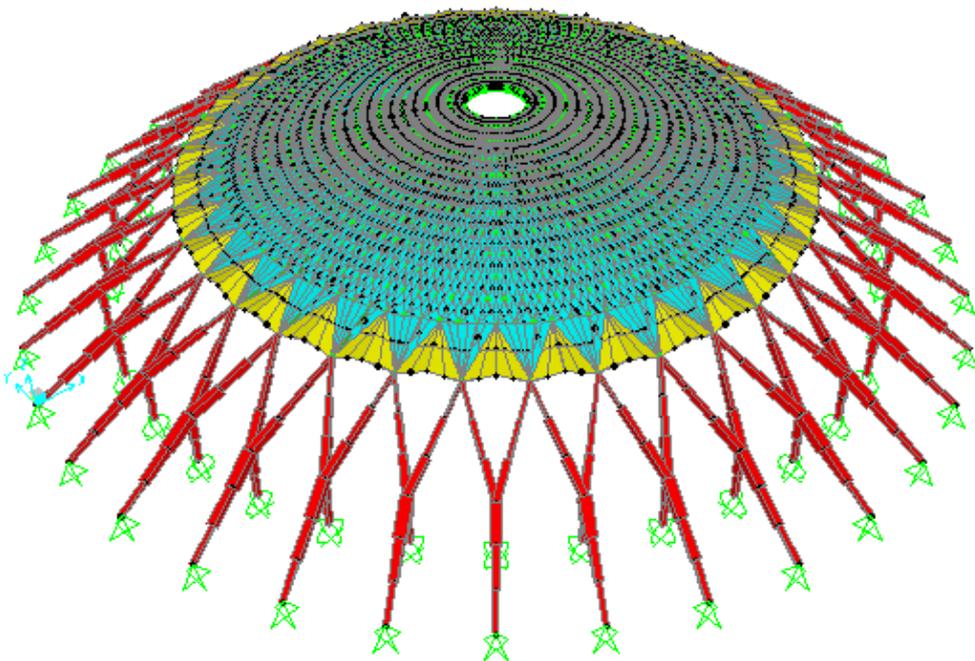


Figura 18.8: modello di calcolo tridimensionale con vincoli. con estrusione

18.2.3 Condizioni di vincolo

Si sono assegnate cerniere, cioè vincoli che impediscono le 3 traslazioni ma consentono le 3 rotazioni nello spazio, alla base di tutti i 36 cavalletti, mentre alla base dei 36 puntoni si sono realizzati carrelli che impediscono solamente la traslazione in direzione Z. Il modello tridimensionale di calcolo che è risultato a livello grafico è quello rappresentato in figura 18.7 e 18.8, riportato rispettivamente senza e con estrusione degli elementi componenti. Si indicano anche gli assi del sistema di riferimento considerato.

18.2.4 Condizioni di carico

Al modello sono state applicate diverse tipologie di carico, al fine di simulare le possibili situazioni che si possono verificare durante la vita utile dell'opera. Oltre al peso proprio degli elementi componenti la struttura, che il programma calcola automaticamente in base al peso specifico dei materiali designati, è stato inserito il carico della neve che potrebbe gravare sulla copertura.

In particolare, Roma si trova nella zona III in cui, il carico di neve al suolo risulta:

$$q_{sk} = 60 [\text{Kg} / \text{m}^2] \text{ con } a_s \leq 200 [\text{m}]$$

Il coefficiente di forma della copertura è: $\mu_1 = 1$

Il coefficiente di esposizione è: $C_E = 1$

Il coefficiente termico è: $C_T = 1$

Quindi, il carico neve sulla copertura sarà pari a:

$$q_s = \mu_1 \cdot q_{sk} \cdot C_E \cdot C_T = 1 \cdot 60 [\text{Kg} / \text{m}^2] = 60 [\text{Kg} / \text{m}^2]$$

Tale carico è stato applicato come carico distribuito lungo la direzione $-Z$ sulla superficie della calotta sferica, per un carico complessivo di:

$$60 [\text{Kg}/\text{m}^2] \cdot 2900 [\text{m}^2] = 174000 [\text{Kg}] = 174 [\text{t}]$$

Inoltre, sono state impresse all'intera struttura le forze dovute al sisma nelle direzioni X e Y, come carichi orizzontali distribuiti sulla calotta sferica. Queste sono state valutate pari al 10% del peso, ottenuto come somma del peso proprio del Palazzetto e del 30% del carico neve. In particolare:

- il peso proprio = 1580 [t]
- il 30 % del carico della neve = $0,3 \cdot 174[t] = 42,2[t]$

dalla cui somma si ha un peso di 1632[t]. Dato che la forza da applicare alla struttura è ipotizzata pari al 10% di tale valore, essa risulta di 163[t] che, distribuita sull'area di 2900 [m²] della copertura, diventa un carico uniformemente distribuito sulle piastre pari a 56 [Kg/m²].

Quindi, nel complesso, i carichi considerati sono i seguenti:

azioni permanenti (G):

- ✓ Peso proprio degli elementi strutturali o DEAD: calcolato dal software

azioni variabili (Q):

- ✓ Neve: 60[Kg/m²]

azioni sismiche (E):

- ✓ Sisma X: 56[Kg/m²]
- ✓ Sisma Y: 56[Kg/m²]

18.2.5 Combinazioni di carico

Considerando i carichi sopra descritti, si sono definite le 5 combinazioni di carico riportate nella tabella 18.2.

Combinazione di carico	<i>Comb1</i>	<i>Comb2</i>	<i>Comb3</i>	<i>Comb4</i>	<i>Comb5</i>
Peso proprio	✓	✓	✓	✓	✓
Neve	✓				
Sisma X		✓		✓	✓
Sisma Y			✓	✓	✓

Tabella 18.2: combinazioni di carico

Con riferimento al D.M. del 14/01/2008, si considera la combinazione fondamentale per gli stati limite ultimi (SLU):

$$F_d = \gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{K1} + \sum \psi_{0i} \cdot \gamma_{Qi} \cdot Q_{Ki}$$

Non essendoci precompressione e considerando come carico variabile la neve, nel presente caso diventa:

$$F_d = 1,3 \cdot DEAD + 1,5 \cdot Neve$$

Si deve tener conto anche della seguente combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica:

$$F_d = E + G_1 + G_2 + P + \sum \psi_{2j} \cdot Q_{kj}$$

Nel caso in esame si ha:

$$F_d = Sisma + DEAD$$

poiché il valore del coefficiente di combinazione ψ_{2j} è pari a 0, per l'azione variabile della neve a quota inferiore di 1000 metri sul livello del mare. Siccome il modello è tridimensionale, si combinano anche le azioni sismiche nelle direzioni X e Y, considerandone una come intera e l'altra al 30%:

$$F_d = SismaX + 0,3 \cdot SismaY + DEAD$$

$$F_d = SismaY + 0,3 \cdot SismaX + DEAD$$

18.3 Analisi statica

Applicando al modello i diversi carichi, si sono ottenute le reazioni vincolari alla base della struttura, riportate nelle tabelle 18.3 e 18.4.

OutputCase	GlobalFX	GlobalFY	GlobalFZ
	Kgf	Kgf	Kgf
<i>Dead</i>	5,895E-08	-6,25E-09	1584293,15
<i>Neve</i>	2,017E-08	-2,065E-09	174373,6
<i>SismaX</i>	-162748,69	-1,729E-08	-3,244E-07
<i>SismaY</i>	-2,334E-08	-162748,69	-1,081E-07

Tabella 18.3: reazioni vincolari F_x, F_y, F_z

OutputCase	GlobalMX	GlobalMY	GlobalMZ
	Kgf-cm	Kgf-cm	Kgf-cm
<i>SismaX</i>	0,000309	-214216118	-189550810
<i>SismaY</i>	214216118	0,0005164	-707413887

Tabella 18.4: reazioni vincolari M_x, M_y, M_z

18.3.1 Verifica reazioni vincolari

Si effettua la verifica delle reazioni vincolari più significative, opportunamente evidenziate con il grassetto.

La risultante delle reazioni vincolari in direzione Z, per la condizione di carico “DEAD”, equivale al peso proprio complessivo della struttura. Infatti si ha:

$$\sum F_z = 1584 [t]$$

Pari alla somma dei pesi dei singoli componenti del Palazzetto:

- cavalletti: 1000[t]
- nervature: 224[t]
- calotta sferica: 360[t]

$$\text{Totale} = 1584[t]$$

La risultante delle reazioni vincolari in direzione Z, per la condizione di carico “Neve”, risulta:

$$\sum F_z = 174 [t]$$

In effetti, moltiplicando il carico neve per la superficie su cui è applicato si ottiene il medesimo valore:

$$60 \text{ Kg} / \text{m}^2 \cdot 2900 \text{ m}^2 = 174 [t]$$

La risultante delle reazioni vincolari in direzione X, per la condizione di carico “Sisma X”, risulta pari alla forza sismica applicata lungo tale direzione:

$$\sum F_x = 163 [t]$$

La risultante delle reazioni vincolari in direzione Y, per la condizione di carico “Sisma Y”, risulta pari alla forza sismica applicata lungo tale direzione:

$$\sum F_y = 163 [t]$$

Il valore della sommatoria dei momenti attorno l’asse Y, per la condizione di carico “Sisma X”, risulta pari a

$$\sum M_y = 2142 [t \cdot m]$$

Semplificando la struttura al fine di ottenere una semplice e veloce verifica di tale momento flettente, la si può considerare come un pilastro alto 16,5 metri sollecitato da una forza orizzontale di 163[t], ed esaminare quindi i seguenti due casi limite:

1. mensola, il cui momento alla base risulta:

$$M = F \cdot H = 163 [t] \cdot 16,5[m] = 2690 [t \cdot m]$$

2. shear-type, il cui momento alla base risulta:

$$M = F \cdot \frac{H}{2} = 163 [t] \cdot \frac{16,5}{2} [m] = 1345 [t \cdot m]$$

Come si può notare, il valore calcolato dal SAP risulta intermedio tra i precedenti:

$$1345 [t \cdot m] < 2142 [t \cdot m] < 2690 [t \cdot m]$$

Si procede analogamente per la verifica della sommatoria dei momenti attorno l'asse X, ovviamente risultato del medesimo valore, data la parità di carico sismico applicato nelle due direzioni.

$$\sum M_x = 2142 [t \cdot m]$$

18.3.2 Verifiche di resistenza

Si conducono le verifiche di resistenza dei cavalletti, eseguendo per essi le verifiche a compressione e a presso-flessione.

18.3.2.1 Verifica compressione cavalletti

Come già precedentemente affermato, il puntone di ogni cavalletto avrebbe la funzione di scaricare a terra il peso del singolo cavalletto e non assorbire alcun altro sforzo. Dall'analisi, si ottiene che il valore massimo di sforzo normale sollecitante il tratto GG2 risulta pari a: $N_{\max} = 23563,72 [Kg]$, poco differente dal peso calcolato di 27000 [Kg]. La sezione alla base del puntone, cioè quella sollecitata da tale compressione, possiede le seguente caratteristiche:

- Base, $B = 50[cm]$,
- Altezza, $H = 40[cm]$
- Armatura tesa, $A_s = 2 \phi 16 = 4,02[cm^2]$
- Armatura compressa, $A_s' = 2 \phi 16 = 4,02[cm^2]$

Si calcola la tensione nel calcestruzzo come:

$$\sigma_c = \frac{N}{A_c + n \cdot A_s} = \frac{24000}{50 \cdot 40 + 15 \cdot 8,04} = 11 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right] \leq 115 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right] \leq 0,7 \cdot 164 \left[\frac{Kg}{cm^2} \right]$$

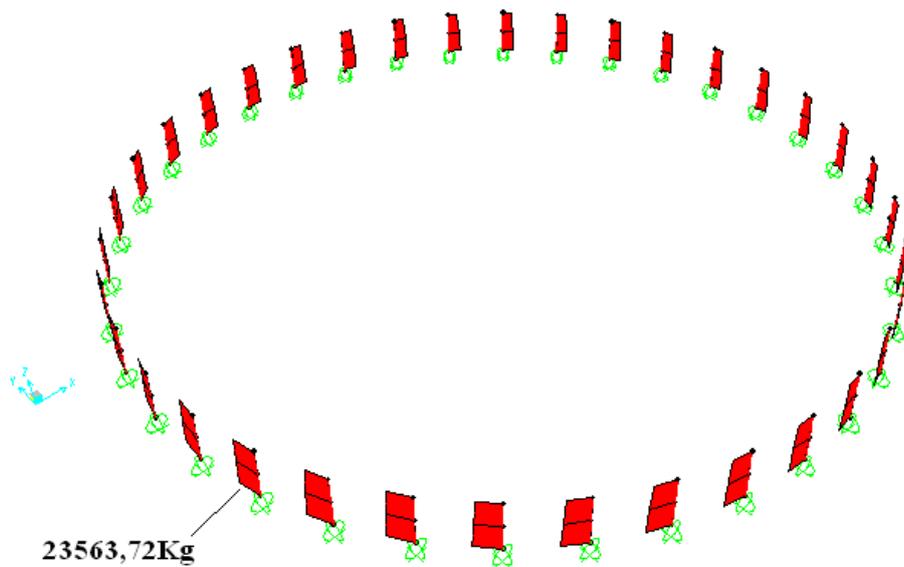


Figura 18.9: diagramma dello sforzo normale nei puntoni

18.3.2.2 Verifica presso-flessione per i cavalletti

Si conduce la verifica a presso-flessione per la porzione inferiore e superiore dei cavalletti, cioè quelle parti sollecitate sia a compressione sia a flessione.

- *Cavalletto inferiore, sezione E*

Come si vede dalla figura 18.10, il momento massimo sollecitante risulta:

$$M_{\max} = M_{33} = 2798840,17[\text{Kg}\cdot\text{cm}]$$

Si verifica nella combinazione di carico 4, cioè in presenza dell'azione sismica.

Lo sforzo normale presente nel medesimo cavalletto sollecitato da tale momento flettente è: $N = 49970,99 [\text{Kg}]$, riportato in figura 18.11.

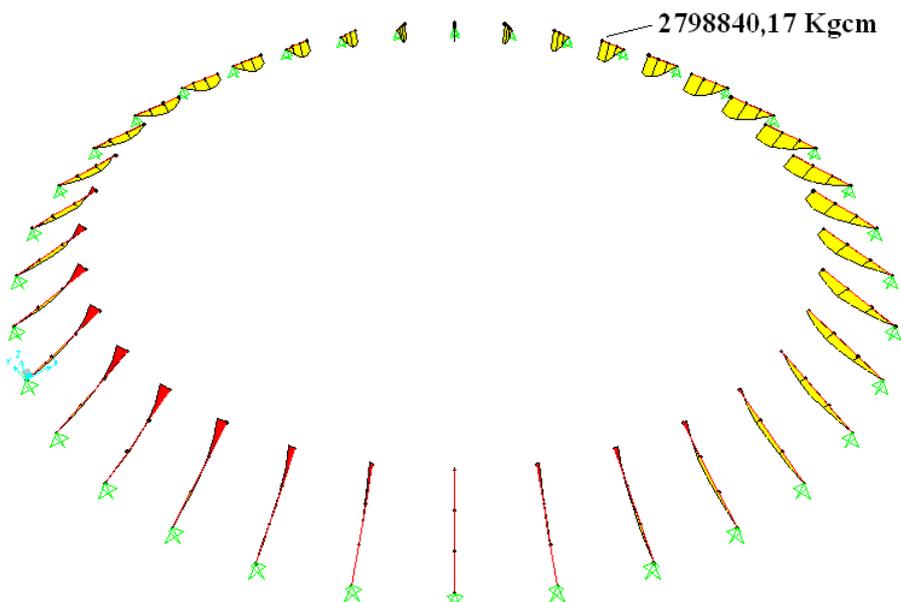


Figura 18.10: diagramma momento M_{33} nei cavalletti inferiori, combinazione di carico 4

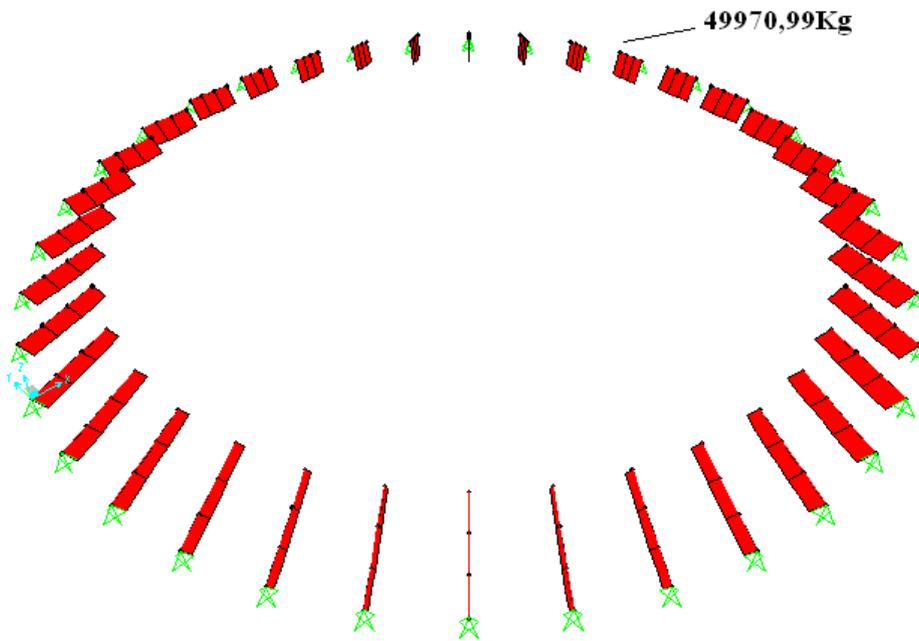


Figura 18.11: diagramma sforzo normale nei cavalletti inferiori, combinazione di carico 4

Con il metodo del momento di trasporto, si sposta tale N in corrispondenza dell'armatura tesa, associando un momento pari al valore dello sforzo normale moltiplicato per la distanza tra l'asse di simmetria e l'armatura tesa.

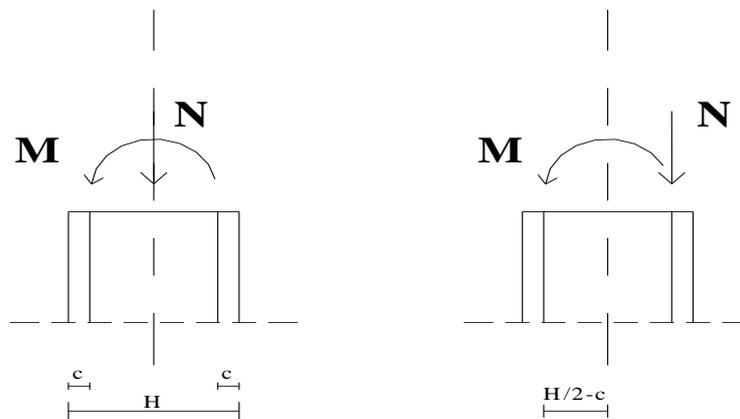


Figura 18.12: metodo del momento di trasporto

Il momento così calcolato lo si somma al momento presente M_{33} , ottenendo una sollecitazione flettente sulla sezione maggiorata, esattamente pari a:

$$M_{sd} = M + N \cdot \left(\frac{H}{2} - c\right) = 2798840,17 + 49970,99 \cdot \left(\frac{90}{2} - 3\right) = 4897621,75 [Kg \cdot cm]$$

Si considera poi la sezione semplicemente inflessa e non più presso-inflessa, potendo così effettuare una verifica a flessione semplice. La sezione in questione presenta le seguenti caratteristiche:

- Base, $B = 90[cm]$,
- Altezza, $H = 90[cm]$
- Copriferro, $c = 3[cm]$
- Armatura tesa, $A_s = 4 \phi 20 + 3 \phi 16 = 18,6[cm^2]$
- Armatura compressa, $A_s' = 4 \phi 20 + 3 \phi 16 = 18,6 [cm^2]$
- Resistenza di progetto acciaio, $f_{yd} = 3910 [Kg/cm^2]$

Il momento resistente di progetto risulta calcolabile con la seguente formula:

$$M_{rd} = \frac{f_{cd} \cdot B \cdot d^2}{r^2} = \frac{M_0}{r^2}$$

In cui il momento di riferimento è:

$$M_0 = B \cdot d^2 \cdot f_{cd} = 90 \cdot 87^2 \cdot 164 = 11,2 \cdot 10^7 [Kg \cdot cm]$$

La percentuale meccanica dell'armatura della sezione è:

$$\rho_M = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{f_{cd} \cdot B \cdot d} = \frac{18,6 \cdot 3910}{164 \cdot 90 \cdot 87} = \frac{72726}{1284120} = 0,057$$

Dalla tabella relativa all'acciaio utilizzato, in corrispondenza della colonna con $\xi = d'/d = 0,034$ e $\beta = 1$, si ottiene:

r'cal	$\xi = x/d$	ρ_M
3,73	0,10	0,074

$$M_{rd} = \frac{f_{cd} \cdot B \cdot d^2}{r^2} = \frac{164 \cdot 90 \cdot 87^2}{3,73^2} = 8029846 [Kg \cdot cm]$$

La verifica risulta soddisfatta, poiché il momento sollecitante M_{sd} è minore del momento resistente di progetto M_{rd} :

$$M_{rd} > M_{sd}$$

$$803 [KN \cdot m] > 490 [KN \cdot m]$$

- *Cavalletto superiore, sezione D*

Come si può notare in figura 18.13, il momento massimo sollecitante risulta:

$$M_{max} = M_{33} = 1496738,71 [Kg \cdot cm]$$

Si verifica nella combinazione di carico 4 e lo sforzo normale presente nel medesimo cavalletto sollecitato da tale momento flettente è:

$N = 26982,36$ [Kg], riportato in figura 18.14.

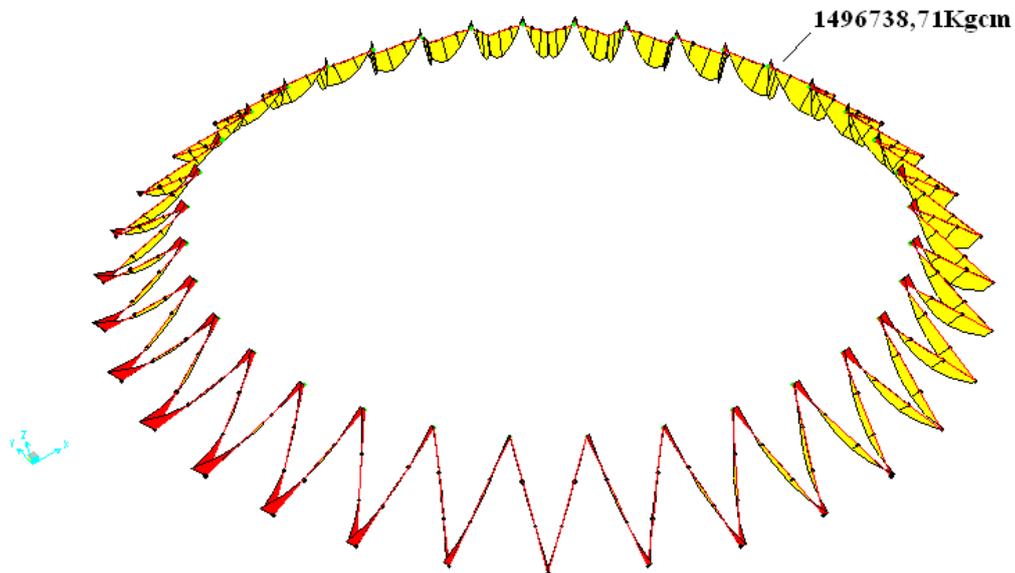


Figura 18.13: diagramma momento M_{33} nei cavalletti superiori, combinazione di carico 4

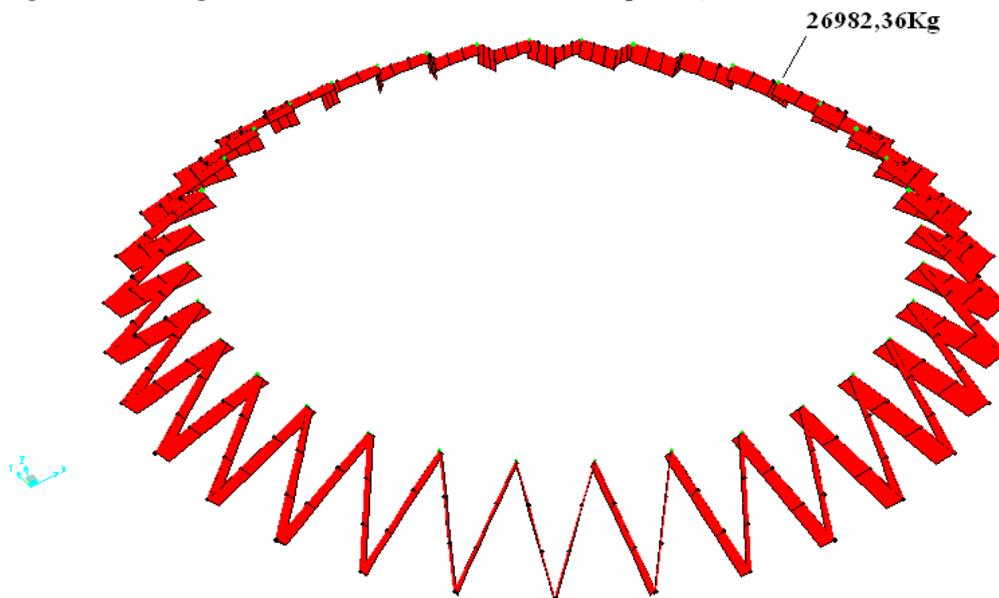


Figura 18.14: diagramma sforzo normale nei cavalletti superiori, combinazione di carico 4

Per eseguire la verifica, si applica il metodo del momento di trasporto come in precedenza, ottenendo il seguente valore di momento sollecitante:

$$M_{sd} = M + N \cdot \left(\frac{H}{2} - c \right) = 1496738,71 + 26982,36 \cdot \left(\frac{90}{2} - 3 \right) = 2629997,83 \text{ [Kg} \cdot \text{cm]}$$

Si considera la sezione D, poiché sollecitata dal massimo momento flettente, con le proprie caratteristiche:

- Base, $B = 58[cm]$,
- Altezza, $H = 90[cm]$
- Copriferro, $c = 3[cm]$
- Armatura tesa, $A_s = 4 \phi 20 + 1 \phi 16 = 14,6[cm^2]$
- Armatura compressa, $A_s' = 4 \phi 20 + 1 \phi 16 = 14,6 [cm^2]$
- Resistenza di progetto acciaio, $f_{yd} = 3910 [Kg/cm^2]$

Il momento resistente di progetto risulta calcolabile con la seguente formula:

$$M_{rd} = \frac{f_{cd} \cdot B \cdot d^2}{r^2} = \frac{M_0}{r^2}$$

In cui, il momento di riferimento è:

$$M_0 = B \cdot d^2 \cdot f_{cd} = 58 \cdot 87^2 \cdot 164 = 7,2 \cdot 10^7 [Kg \cdot cm]$$

La percentuale meccanica dell'armatura della sezione:

$$\rho_M = \frac{A_s \cdot f_{yd}}{f_{cd} \cdot B \cdot d} = \frac{14,6 \cdot 3910}{164 \cdot 58 \cdot 87} = \frac{57086}{827544} = 0,069$$

Dalla tabella, in corrispondenza della colonna con $\xi = d'/d = 0,034$ e $\beta = 1$, si ottiene:

r'cal	$\xi = x/d$	ρ_M
3.73	0.10	0.074

$$M_{rd} = \frac{f_{cd} \cdot B \cdot d^2}{r^2} = \frac{164 \cdot 58 \cdot 87^2}{3,73^2} = 5174789 [Kg \cdot cm]$$

La verifica a flessione della sezione risulta soddisfatta, poiché il momento sollecitante M_{sd} è minore del momento resistente di progetto M_{rd} :

$$M_{rd} > M_{sd}$$

$$517 [KN \cdot m] > 263 [KN \cdot m]$$

18.3.3 Calcolo della precompressione nella fondazione

L'anello di fondazione è in cemento armato precompresso con cavi posti in tensione mediante un tiro tale da annullare la trazione nell'anello dovuta ai carichi esterni, in modo che il calcestruzzo non risulti teso durante la vita dell'opera e, di

conseguenza, lavori al meglio. Si vuole per questo motivo calcolare il valore del tiro applicato ai cavi da precompressione.

Dall'analisi statica effettuata con il programma di calcolo è stato possibile ottenere il valore dello sforzo normale di compressione massimo che sollecita i cavalletti nella loro porzione inferiore, precisamente in corrispondenza della cerniera di attacco alla fondazione. Questo valore si verifica nella combinazione di carico 1 e risulta pari a: $N_{\max} = 54151$ [Kg]. Tale sforzo è pari alla spinta che la copertura trasmette al cavalletto e che, a sua volta, quest'ultimo trasmette al terreno, come già precedentemente affermato. In particolare, esso si scompone in:

- una componente verticale: $V = N \cdot \sin \alpha = 30045$ [Kg]
- una componente orizzontale: $H = N \cdot \cos \alpha = 45051$ [Kg]

essendo α l'angolo di inclinazione del cavalletto rispetto al piano orizzontale:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{5}{7,5} \right) = 33,7^\circ .$$

La componente H ha direzione radiale e agisce su una porzione di anello pari ad 1/36 della circonferenza. Essendo la fondazione un cerchio di diametro 81,50 metri, la lunghezza l di tale arco di circonferenza risulta:

$$l = \frac{1}{36} \cdot 2\pi \cdot R = \frac{1}{36} \cdot 2\pi \cdot 40,75 = 7,1[m]$$

Si considera il carico uniformemente distribuito su tale tratto:

$$p = \frac{H}{l} = \frac{45051}{7,1} = 6345 \text{ [Kg / m]}$$

Si tratta del problema dell'anello circolare soggetto ad una pressione interna p agente in direzione centrifuga che genera una sollecitazione di trazione pari a:

$$T = p \cdot R = 6345 \cdot 40,75 = 258567 \text{ [Kg]}$$

Affinché l'anello di fondazione non risulti teso, ma le sezioni in calcestruzzo siano puramente compresse, è stato necessario applicare ai cavi di precompressione un tiro superiore a questo valore, cioè:

$$Tiro > 260 [t]$$

di modo che si creasse uno stato di autotensione nella struttura di fondazione, tale da opporsi ai carichi esterni.

18.4 Analisi dinamica

Si desidera valutare quali siano i modi di vibrare ed il periodo fondamentale dell'edificio. Effettuando un'analisi dinamica modale si ottiene che il primo modo di vibrare del Palazzetto è torsionale con periodo $T_1 = 0,838128$ [s], mentre il secondo ed il terzo sono traslazionali, con periodi rispettivamente di $T_2 = 0,815405$ [s] e $T_3 = 0,815403$ [s].

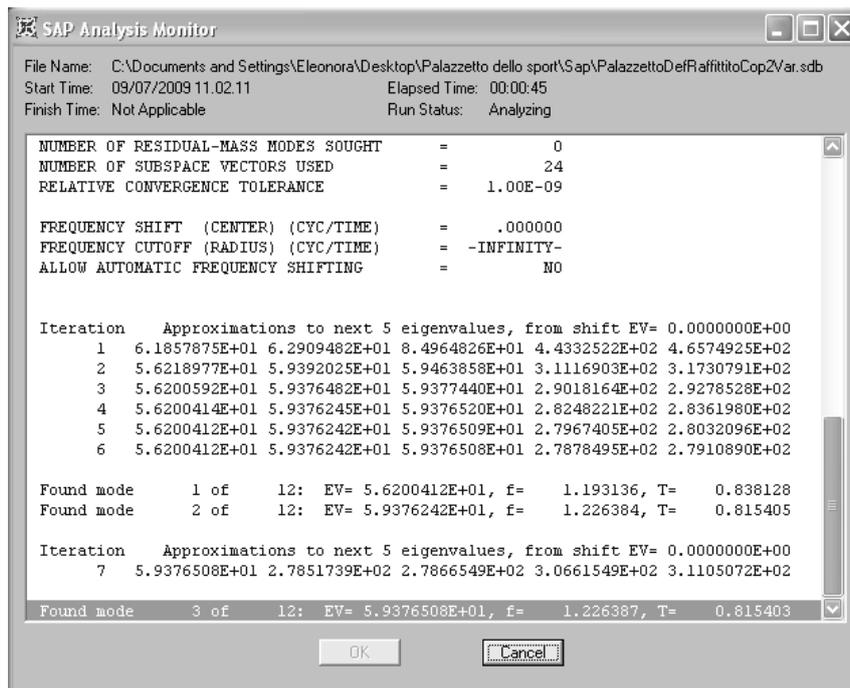


Figura 18.15: frequenze dei primi tre modi di vibrare

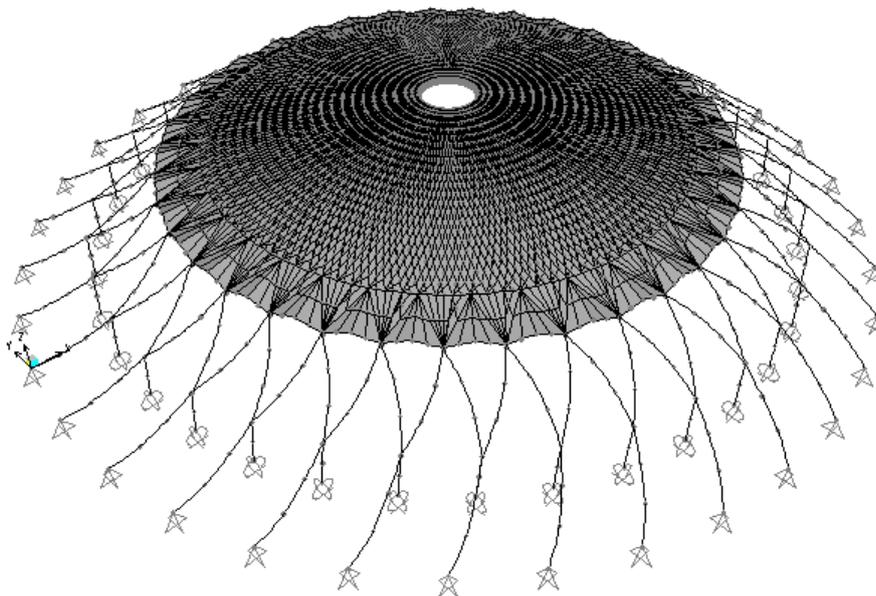


Figura 18.16: primo modo di vibrare, $T=0.838128$ [s]

I valori di tali periodi sono osservabili nella schermata di analisi del SAP, riportata in figura 18.15, mentre il primo modo di vibrare è rappresentato in figura 18.16.

18.4.1 Verifica del periodo proprio fondamentale

Data la natura torsionale del primo modo di vibrare, ne si è verificato il periodo $T_1 = 0,838128$ [s] e quindi la frequenza $f_1 = 1,193136$ [Hz], sfruttando il modello dell'oscillatore semplice torsionale (OST).

Si ricorda che, se si applica un momento torcente M ad un disco di massa m e raggio R , fissato ad un sostegno di massa trascurabile, ma dotato di una certa rigidezza, funzione delle proprie caratteristiche geometriche (d e L) e meccaniche (G), esso ruota di un certa quantità θ . L'unico grado di libertà che possiede il sistema in questione è proprio θ e l'equazione del moto risulta la seguente:

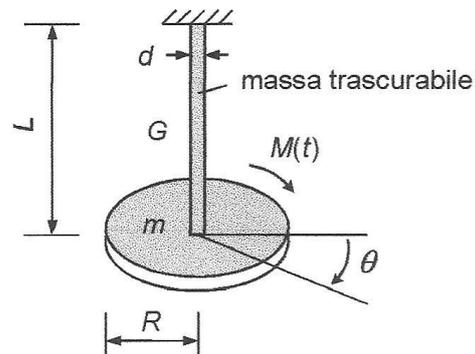


Figura 18.17: oscillatore semplice torsionale

$$I_p \cdot \ddot{\theta} + K \cdot \theta = M(t)$$

dove K è la rigidezza torsionale ottenibile come:

$$K = \frac{M}{\theta}, \text{ in ambito statico;}$$

mentre I_p è il momento di inerzia polare, che per un disco circolare risulta:

$$I_p = \frac{m \cdot R^2}{2}.$$

Con riferimento all'oscillatore semplice torsionale appena descritto e riportato in figura 18.17, si è costruito un diverso modello agli elementi finiti del Palazzetto per ottenerne la rigidezza torsionale K . In particolare, si è ottenuto il nuovo modello cancellando tutti gli elementi shell presenti in quello originario, cioè i pannelli della calotta, i ventagli strutturali e le nervature, mantenendo solo i cavalletti. Si è assegnato a tutti i loro 72 nodi sommitali un *constraint* tipo BODY, che li collega tra loro e al nodo appositamente realizzato al centro della calotta, in

modo da creare un corpo rigido nello spazio, caratterizzato da uguali spostamenti in tutti i punti che lo costituiscono (figg. 18.18, 18.19).

A tale modello si è applicato un momento torcente pari a $M_z = 50 [t \cdot m]$, in corrispondenza del nodo centrale e, lanciando l'analisi statica lineare, si è valutata la rotazione di uno qualsiasi dei nodi appartenenti al BODY assegnato.

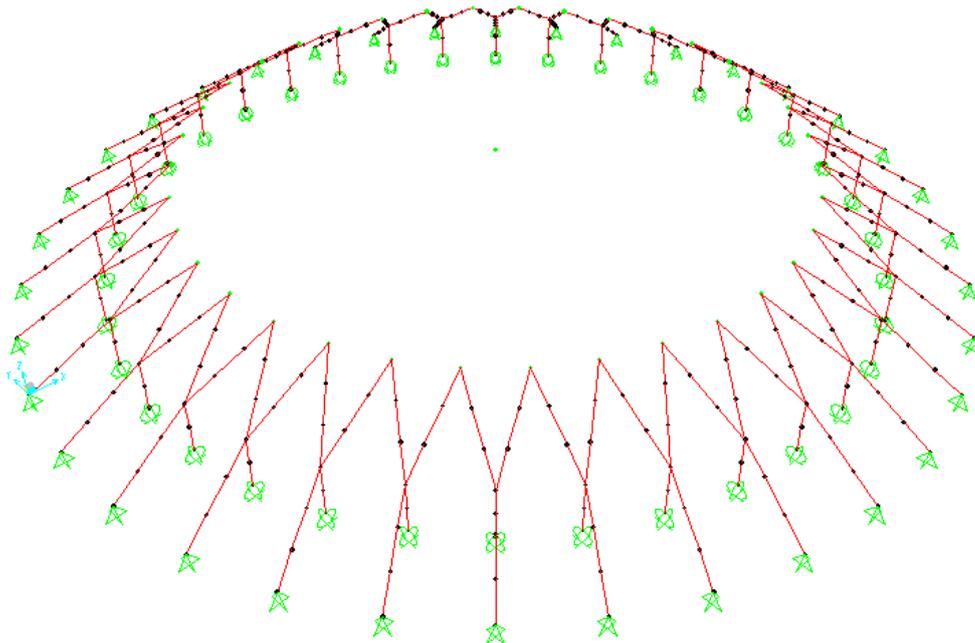


Figura 18.18: Modello senza shell e con nodo centrale

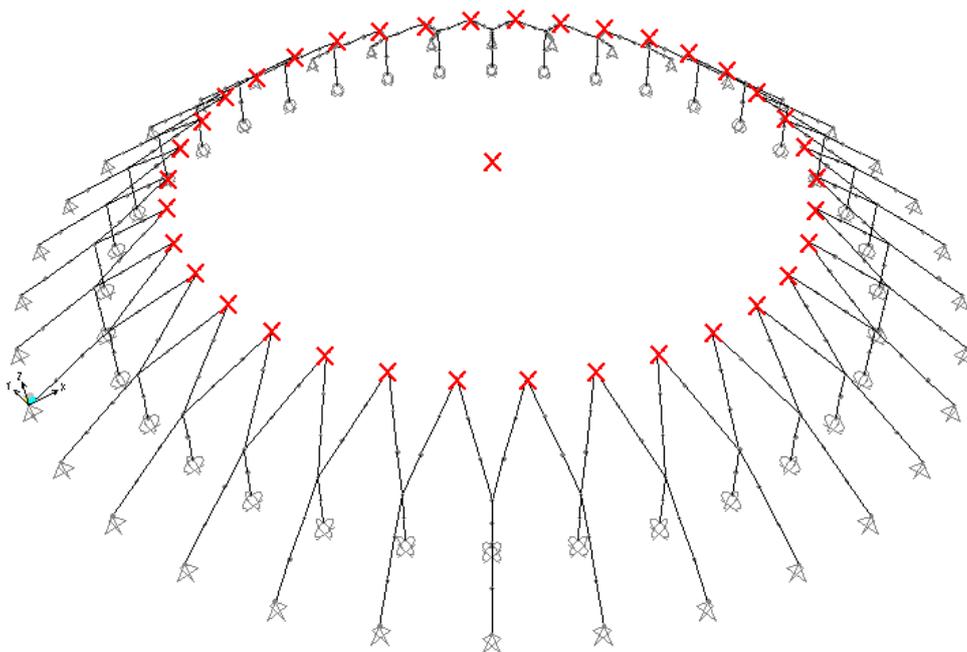


Figura 18.18: modello con indicazione dei nodi appartenenti al BODY

Dato che la rotazione è risultata pari a $\theta = 0.000005861$ [rad], si è ricavata la seguente rigidezza torsionale:

$$K = \frac{M_{\varepsilon}}{\theta} = \frac{50}{0.000005861} = 8530967 \text{ [t} \cdot \text{m / rad]}$$

Si è valutato poi, con calcoli manuali, il momento di inerzia polare della calotta di copertura, sapendo che essa possiede una massa pari a $m = 580/9,8 = 60$ [t·s²/m] e un raggio pari a $R = 30$ [m]. Approssimando la calotta sferica del Palazzetto ad un disco circolare, il suo momento di inerzia polare è risulta pari a:

$$I_p = \frac{m \cdot R^2}{2} = \frac{60 \cdot 30^2}{2} = 27000 \text{ [t} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^2 \text{]}$$

Ottenuti i valori di K e di m, si è potuta calcolare la frequenza come:

$$f_{OST} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{8530967}{27000}} = 2,83 \text{ [Hz]}$$

Si nota come dal conto effettuato, è risultata una frequenza maggiore rispetto a quella del primo modo di vibrare dell'edificio ottenuta con l'analisi dinamica modale; infatti: $2,8 \text{ [Hz]} > 1,2 \text{ [Hz]}$. Il motivo di questa differenza potrebbe essere duplice:

1. poca accuratezza del modello, forse non adatto ad un analisi dinamica, dati i tanti elementi shell che forniscono una rappresentazione povera, al più bilineare, del campo di spostamenti;
2. erronea valutazione della massa in gioco, considerata come momento di inerzia polare di un disco rappresentante solamente la copertura.

La seconda ipotesi sembra la più ragionevole poiché, nel calcolo di I_p si è tenuto conto unicamente della massa della calotta di copertura, senza considerare la presenza dei cavalletti. Ciò è conforme all'oscillatore semplice torsionale di riferimento, ma non rappresenta esattamente cosa accade nella realtà, in cui i cavalletti sono presenti con una data rigidezza e una data massa.

È stato quindi necessario modellarli e, per svolgere l'analisi dinamica modale da cui si sono ottenuti i modi di vibrare, il software ha preso in considerazione oltre che la loro rigidezza con la matrice di rigidezza $\underline{\underline{K}}$, anche la loro massa presente all'interno della matrice delle masse $\underline{\underline{M}}$. Infatti, le equazioni del moto governanti il problema sono le seguenti:

$$\underline{\underline{M}} \cdot \underline{\underline{\ddot{u}}} + \underline{\underline{K}} \cdot \underline{\underline{u}} = \underline{\underline{0}}$$

E' pertanto verosimile che, il non aver considerato la loro massa, tra l'altro pari a 2/3 di quella complessiva dell'edificio, abbia comportato un aumento della frequenza e una conseguente diminuzione del periodo fondamentale della struttura: $0,36[s] < 0,83[s]$

Per avere una verifica tangibile della bontà di tale ipotesi, si è considerato un terzo modello del Palazzetto, del tutto analogo a quello iniziale, ma in cui si è annullata la massa dei cavalletti. Come si vede dalla figura 18.20, lanciando l'analisi dinamica modale, si sono ottenuti i primi due modi di vibrare, con periodi $T_1 = 0,599763 [s]$ e $T_2 = 0,599763 [s]$, entrambi traslazionali. Il terzo modo di vibrare, riportato in figura 18.21, è risultato invece torsionale, con un periodo di oscillazione pari a $T_3 = 0,338001 [s]$.

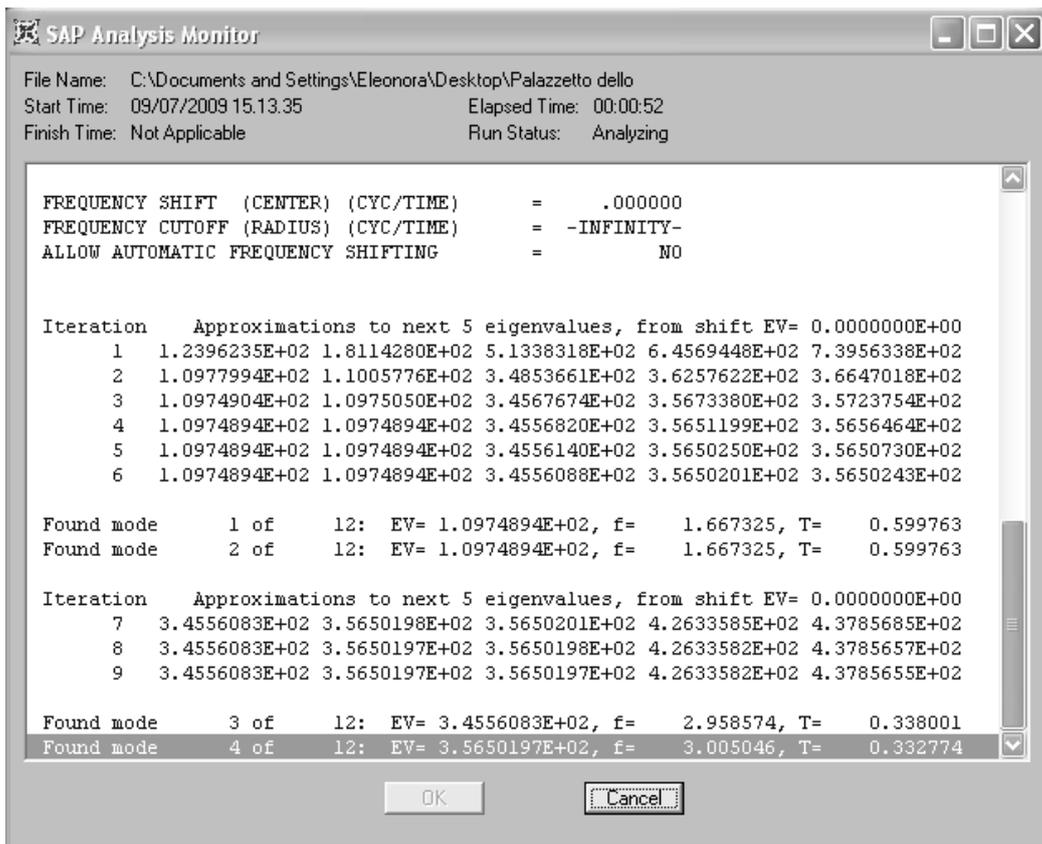


Figura 18.20: frequenze e periodi dei primi tre modi di vibrare

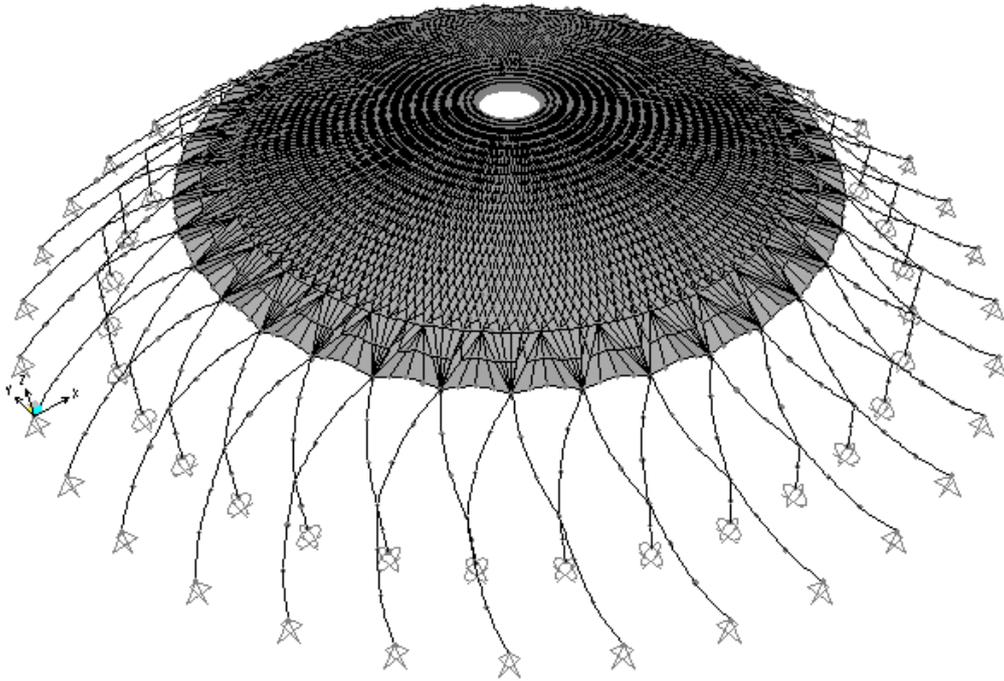


Figura 18.21: modo di vibrare torsionale del modello senza masse dei cavalletti

L'estrema similitudine tra il periodo e la frequenza del modo di vibrare torsionale ottenuto non considerando le masse dei cavalletti, $T_3 = 0,34 [s]$ e $f_3 = 2,96 [Hz]$, con quelli calcolati manualmente usufruendo del modello dell'oscillatore semplice torsionale, $T_{OST} = 0,36 [s]$ e $f_{OST} = 2,83 [Hz]$, avvalorata la seconda ipotesi delle due formulate. In conclusione, tale risultato permette di considerare verificato il periodo proprio fondamentale di vibrazione del Palazzetto $T_1 = 0,838128 [s]$ e la corrispondente frequenza $f_1 = 1,193136 [Hz]$, valutati con il modello agli elementi finiti realizzato.

BIBLIOGRAFIA

Testi:

- Renato Sparacio, *La scienza e i tempi del costruire*, UTET università, 1999.
- Salvatore Di Pasquale, *L'arte del costruire*, Marsilio Editori, 2003.
- Giancarlo Cataldi, *Sistemi statici in architettura*, CEDAM Padova, 1979.
- N. Sandaker, P. Eggen, *Principi del costruire*, BE-MA Editrice, 1993.
- G. Tarelli, C. Millo, *Elementi di fabbrica e sistemi costruttivi*, Edizioni Calderini, 1980.
- Jan Gypfel, *Storia dell'architettura – dall'antichità ad oggi*, Könemann, 1999.
- David Watkin, *Storia dell'architettura occidentale*, Zanichelli, 1999.
- Marco Bussagli, *Capire l'architettura*, Giunti, 2003.
- Piero Adorno, *L'arte italiana - Voll. I-II-III*, Casa editrice G. D'Anna, 1998.
- Erasmo Viola, *Lezioni di scienza delle costruzioni*, Pitagora Editrice Bologna, 2003.
- Luigi Caleca, *Architettura tecnica*, Dario Flaccovio Editore, 2000.
- Giovanni Battista Milani, *L'ossatura murale – parte I e III*, C. Crudo & C. Torino, 1920.
- Fred Angerer, *Volte sottili*, Edizioni C.E.L.I. Bologna, 1957.
- G.A. Breyman, *Archi Volte Cupole - Trattato di costruzioni civili*, Dedalo Roma, 1885.

- E. Dassori e F. Zampini, *Grandi coperture*, Il gabbiano, 1991.
- A. Izzo, c. Gubitosi, *Evoluzione dei grattacieli di Chicago (dal 1879 al 1974)*, Officina Edizioni Roma, 1975
- D. S. Landes, *Prometeo liberato. Trasformazioni tecnologiche e sviluppo industriale nell'Europa occidentale dal 1750 ai nostri giorni*. Einaudi, 1978.
- R. Walther, M. Miehlabrad, *Progettare in calcestruzzo armato*, HOEPLI, 1994.
- E. Lippolis, M. Liviadotti, G. Rocco, *Architettura greca – Storia del mondo della polis dalle origini al V secolo*, Bruno Mondadori, 2007.
- Cairoli Fulvio Giuliani, *L'edilizia nell'antichità*, Carocci, 2006.
- Giuseppe Cozzo, *Ingegneria romana*, Libreria editrice Mantegazza, 1928.
- AA.VV., *Il gotico*, Gribaudo – Könemann, 2006.
- Salvatore Di Pasquale, *Brunelleschi – La costruzione della cupola di Santa Maria del Fiore*, Marsilio Editori, 2002.
- Paolo Desideri, *Pier Luigi Nervi*, Zanichelli, 1992.

Siti consultati:

- www.tecnologos.com
- www.Federica.unina.it
- www.giovannardierontini.it
- www.casadellarchitettura.it
- www.wikipedia.it
- www.kataweb.it