

*Dipartimento di Ingegneria*

*Università degli Studi di Ferrara*

*Corso di*

**“PROGETTAZIONE DEGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI”**

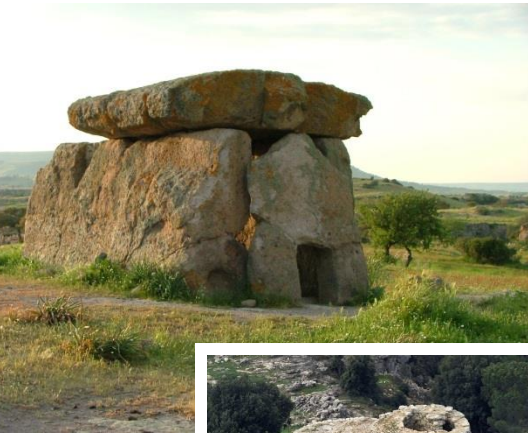
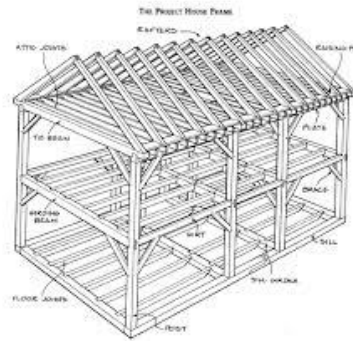
*Prof. Ing. Maurizio Biolcati Rinaldi*

***SISTEMI COSTRUTTIVI***

*Sintesi degli argomenti trattati a lezione*

# PROGETTAZIONE DEGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI

## SISTEMI COSTRUTTIVI



# PROGETTAZIONE DEGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI

## SISTEMI COSTRUTTIVI

Morfologie triangolari:  
le piramidi egiziane



Morfologia a pseudo-arco:  
la porta dei Leoni a Micene



Morfologie trilitiche:  
i templi greci



Morfologie ad arco:  
archi trionfali romani



## SISTEMI COSTRUTTIVI

**STRUTTURA** – indica il complesso di opere specificamente dedicate a sopportare i **carichi** che gravano su di esse e necessarie per la stabilità dell'insieme.

**CARICHI** – si dividono in **statici** e **dinamici**.

**Carichi statici** – sono il **peso proprio** della struttura

**Carichi permanenti** – gravano sulla struttura (pavimenti, manti di copertura, macchinari fissi, ecc..)

**Carichi accidentali (o sovraccarichi)** – gravano sulla struttura in modo non permanente (persone, arredi, neve, vento, ecc.).

**Carichi dinamici** – sono forze di cui può variare l'intensità, come l'azione sismica.

I carichi possono essere considerati:

**Carichi concentrati** – se agiscono su una superficie piccola e possono essere pensati come agenti in un punto della struttura

**Carichi distribuiti** – se la loro azione è distribuita su una superficie sufficientemente ampia.

## SISTEMI COSTRUTTIVI

**VINCOLI** – La struttura tende a reagire ai carichi con forze di reazione espresse dai **vincoli (reazioni vincolari)**.

**EQUILIBRIO STATICO** – La struttura è in **equilibrio statico** quando le reazioni vincolari ed i carichi si annullano a vicenda creando un sistema a risultante nulla. **Un corpo è in equilibrio nello spazio quando sono inibiti gli spostamenti in tre direzioni (X, Y, Z), e le rotazioni attorno ai tre assi (X, Y, Z).**

**GRADO DI LIBERTA'** – Ognuno di questi movimenti è chiamato **grado di libertà**.

Nello spazio **gli elementi hanno 6 gradi libertà**

Nel piano XY **gli elementi hanno solo 3 gradi di libertà** (spostamenti lungo X e lungo Y, e rotazione attorno all'origine).

# PROGETTAZIONE DEGLI ELEMENTI COSTRUTTIVI

## SISTEMI COSTRUTTIVI

**VINCOLI** – Si ricorre ai **vincoli per avere** la struttura sia equilibrata staticamente

**REAZIONI** – I **vincoli** devono essere in grado di offrire le reazioni necessarie ad inibire quegli spostamenti e quelle rotazioni.

Ad ogni grado di libertà inibito corrisponde una reazione vincolare.

I vincoli si dividono in :

1. **semplici**, se tolgono un grado di libertà,
2. **doppi** se ne tolgono due,
3. **tripli** se ne tolgono tre.

- **Vincoli semplici** - sono l'appoggio semplice, il carrello scorrevole e l'asta o pendolo.
- **Vincoli doppi** - sono la cerniera fissa nel piano, il manicotto, il pattino e il bipendolo.
- **Vincoli tripli** - sono la cerniera ed il tripendolo.

Questi tipi di vincoli sono schematizzazioni e semplificazioni di quanto avviene nella realtà tra gli elementi strutturali.

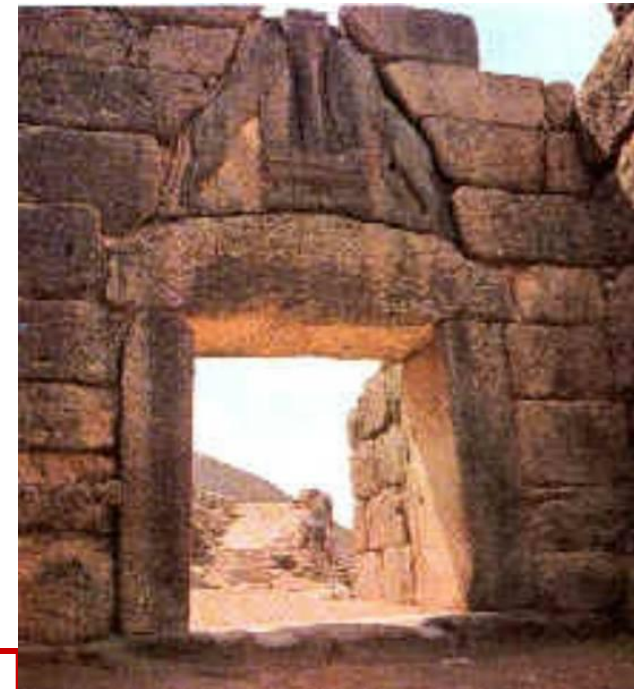
I vincoli più importanti nel piano sono:

- il **carrello** - inibisce un grado di libertà e dà una reazione,
- la **cerniera** - inibisce due gradi di libertà e dà due reazioni,
- l'**incastro** - inibisce tre gradi di libertà e dà tre reazioni.

# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMI PESANTE - *TRILITE*

È il principio costruttivo più intuitivo ed antico. Si basa sull'appoggio di un elemento orizzontale trasversale (**architrave**), soggetto a flessione e taglio, su due elementi verticali (**piedritti**). Il limite principale è costituito dal fatto di instabilizzarsi facilmente rispetto ad un'azione orizzontale.



# SISTEMI COSTRUTTIVI

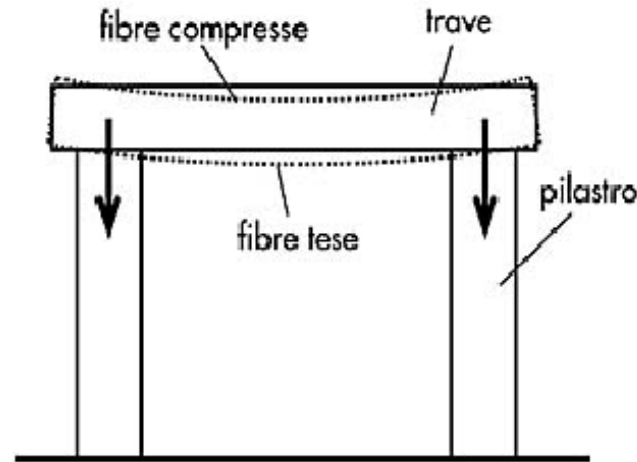
## SISTEMA PESANTE - TRILITE

Il sistema costruttivo trilitico costituito da una trave appoggiata su due muri, quindi ad una struttura isostatica.

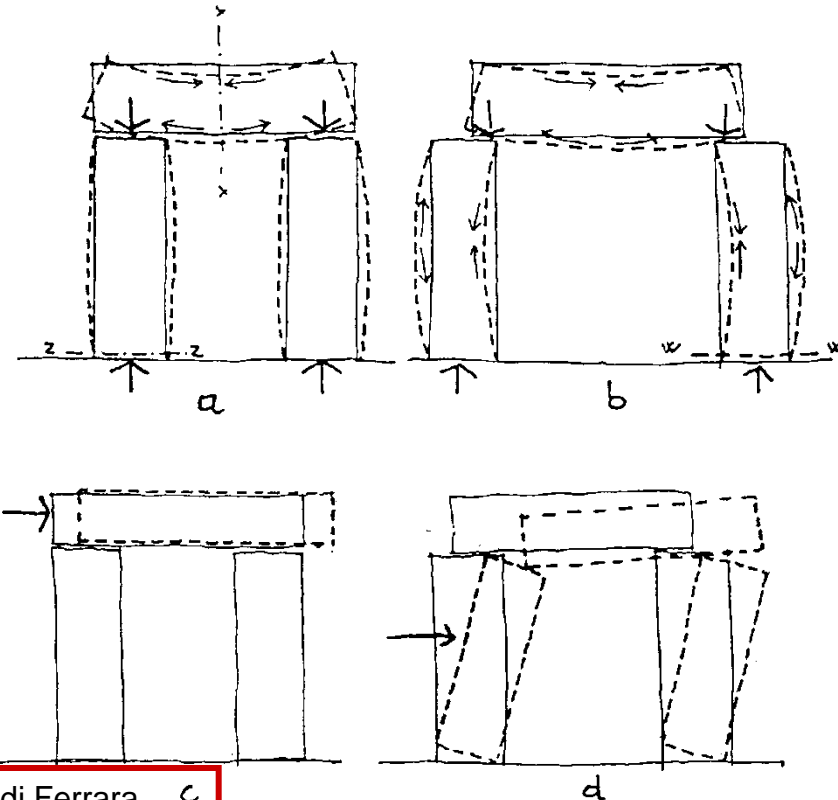
**Carichi verticali** – entra in gioco la capacità elastica dell'elemento trasversale di deformarsi a flessione.

**Elemento orizzontale** – è appoggiato ma non è collegato a quelli verticali da un vincolo rigido, per cui il sistema costruttivo derivato da questo principio è poco stabile e sicuro nel caso di forze orizzontali.

Le travi appoggiate, nella realtà, sfruttano parte dell'incastro nella muratura o altre condizioni di vincolo attritivo per resistere alle azioni orizzontali.



Nel sistema trilitico l'elemento orizzontale, detto trave, è soggetto a flessione: le sue fibre tendono a comprimersi nella parte superiore e a tendersi nella parte inferiore. I due elementi verticali, detti pilastri, per effetto della forza-peso verticale scaricata ai due estremi dalla trave sono soggetti a compressione semplice: le loro fibre tendono a schiacciarsi uniformemente.





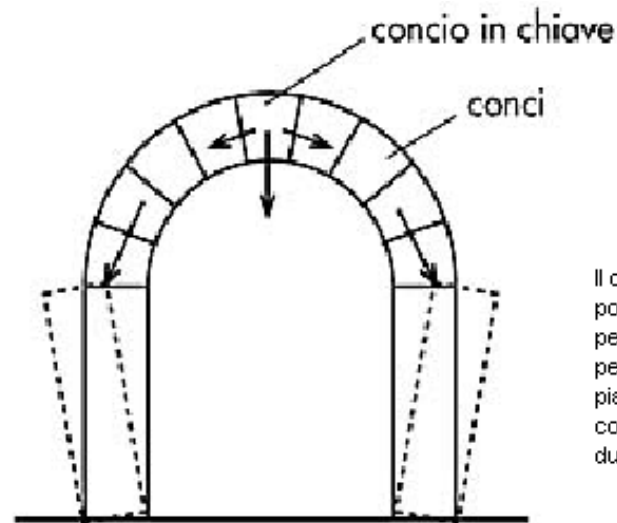
# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – ARCO

Se all'elemento unico dell'architrave si sostituiscono due elementi che si reggono in **equilibrio per mutuo contrasto**, si ottiene un sistema spingente.

Le **azioni sui piedritti** non sono più verticali ma generano una **spinta** che tende a ribaltarli. Il valore della spinta è in rapporto all'inclinazione dei due elementi.

Se si aumenta il numero degli elementi (conci) disponendoli lungo un asse curvilineo che coincide con la funicolare dei carichi si ottiene una struttura spingente (ad arco) sottoposta in ogni sezione a compressione semplice.

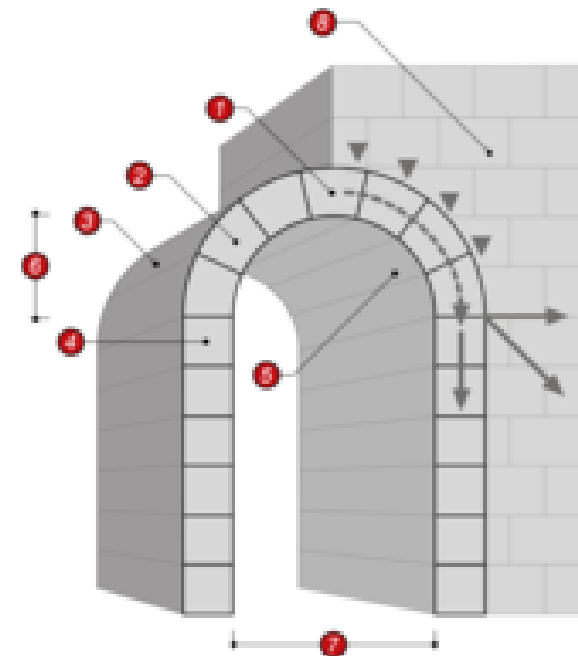


Il concio in chiave, non potendo scaricare il proprio peso in verticale, lo scarica perpendicolarmente al piano di appoggio con i conci laterali, determinando due forze inclinate

Le forze inclinate, originate dal mutuo contrasto tra i conci, determinano una forza totale, anche essa inclinata, che è il peso totale dell'arco sui sostegni. Questi, pertanto, non sono soggetti a compressione semplice, ma a compressione deviata: tendono a ribaltarsi verso l'esterno

*Il comportamento dell'arco è caratterizzato dal mutuo sostegno delle due parti simmetriche, ovvero dalla presenza di una spinta orizzontale.*

**"L'arco è una costruzione nata da due debolezze dalla cui unione risulta una grande forza"**  
Leonardo da Vinci



# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – ARCO

### ARCO

Elemento strutturale a forma curva che si appoggia su due piedritti ed è sospeso su uno spazio vuoto.

È costituito normalmente da **conci**, cioè pietre tagliate, o da laterizio, i cui **giunti** sono disposti in maniera radiale verso un ipotetico centro: per questo hanno forma trapezoidale e sono più propriamente detti **cunei**

Per costruire un arco si ricorre tradizionalmente a una particolare impalcatura lignea, chiamata **centina**



Archi a tutto sesto



Falso arco



Archi a sesto acuto



Archi parabolici

# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – ARCO

Per capire il funzionamento di un arco si può partire a rovescio, considerando il funzionamento di una **catenaria** ottenuta dalla posizione che assume un filo teso o una catena (omogeneo, flessibile e non estendibile) soggetto al peso proprio (o a cui sono attaccati dei pesi).

Il filo o la catena si dispone secondo una catenaria (curva piana simile alla parabola) che **rappresenta l'equilibrio fra disposizione e centralità dei carichi**, cioè assume una posizione che ha la proprietà di avere in ogni suo punto una distribuzione uniforme del suo peso totale.

Le strutture realizzate secondo tale curva subiscono soltanto sforzi a trazione, come le funi di sostegno nei ponti sospesi, oppure, in alternativa, a compressione, quando la struttura realizzata ha la forma di una catenaria riflessa rispetto ad una retta orizzontale,



Il ponte ferroviario *Garabit* (Eiffel)



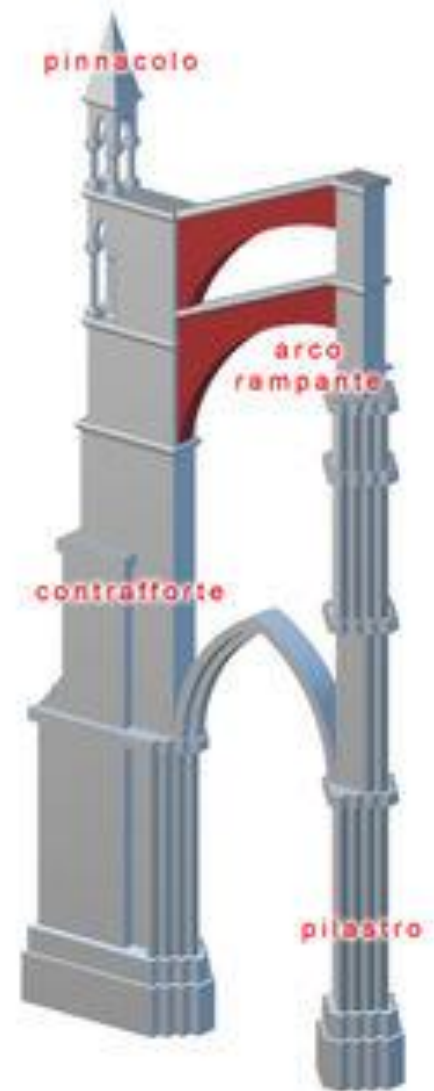
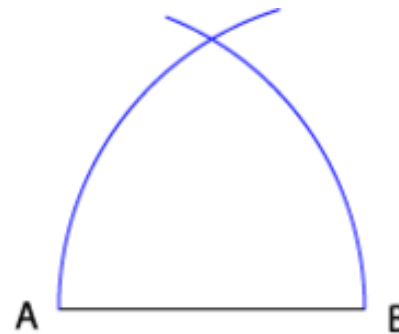
Cupola di S. Paul a Londra (Hooke)

# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – ARCO

Storicamente, per contrastare la spinta, si ricorreva a soluzioni statiche particolari:

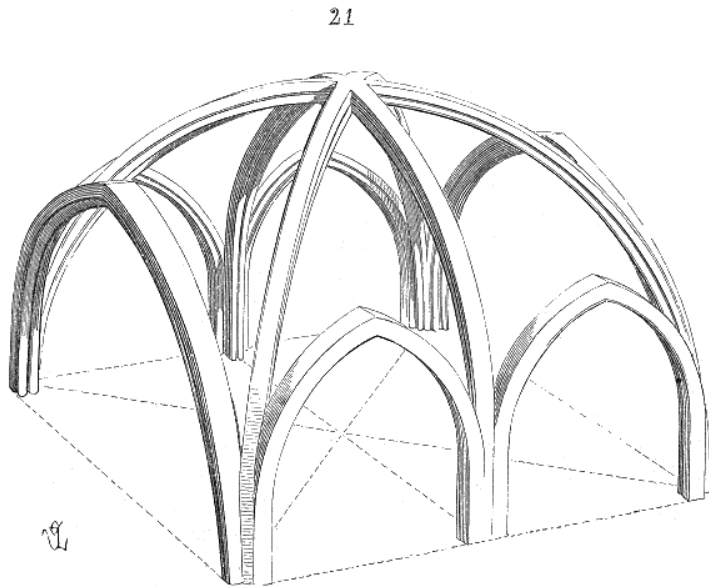
1. **Aumento del peso del piedritto** rispetto a quello dell'arco,
2. **Muri più alti e pinnacoli** sopra di essi, per abbassare la direzione della spinta,
3. **Aumento delle dimensioni di base del piedritto** stesso con sezioni murarie a scarpa o contrafforti.



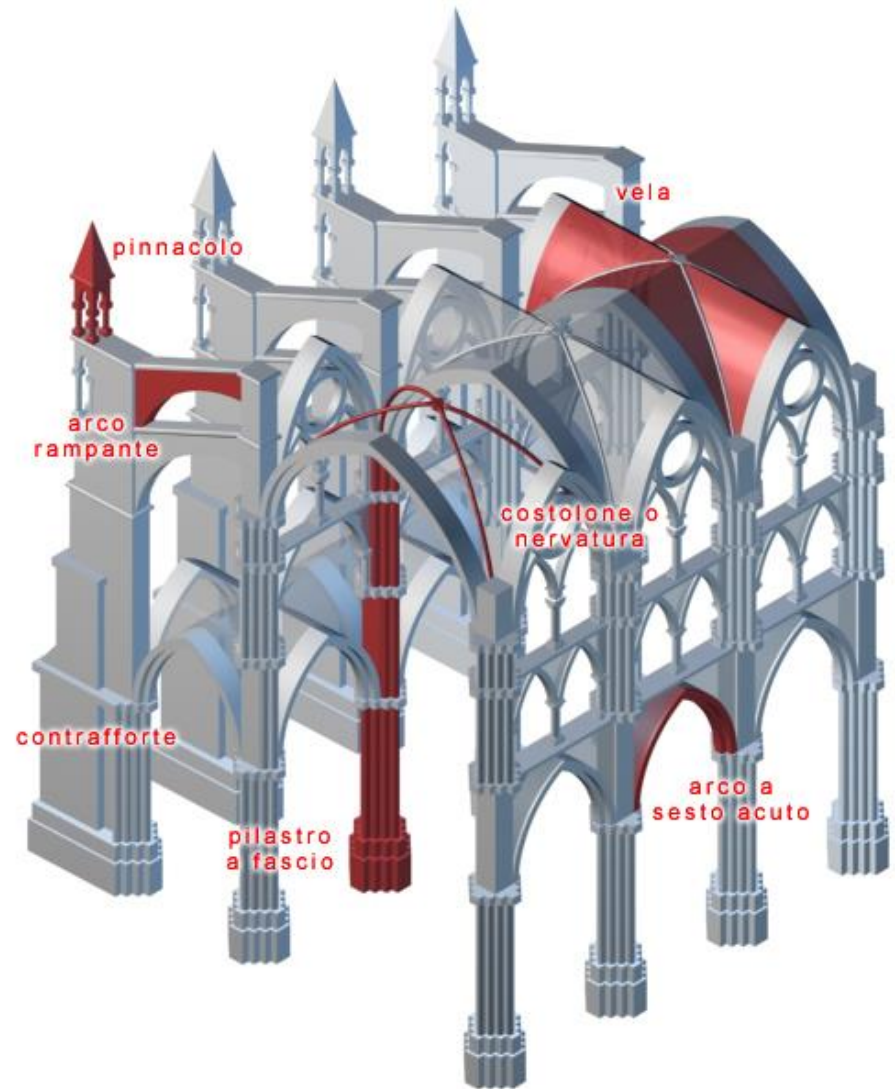
Questi concetti sono stati l'origine di forme e stili architettonici nella storia, dagli esempi dell'epoca romanica a quella gotica

# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – ARCO



Struttura di una volta a crociera gotica  
(E. Viollet-le-Dcu, *Dictionnaire raisonné  
de l'architecture française du XIe au XVI  
siècle*, 1856)

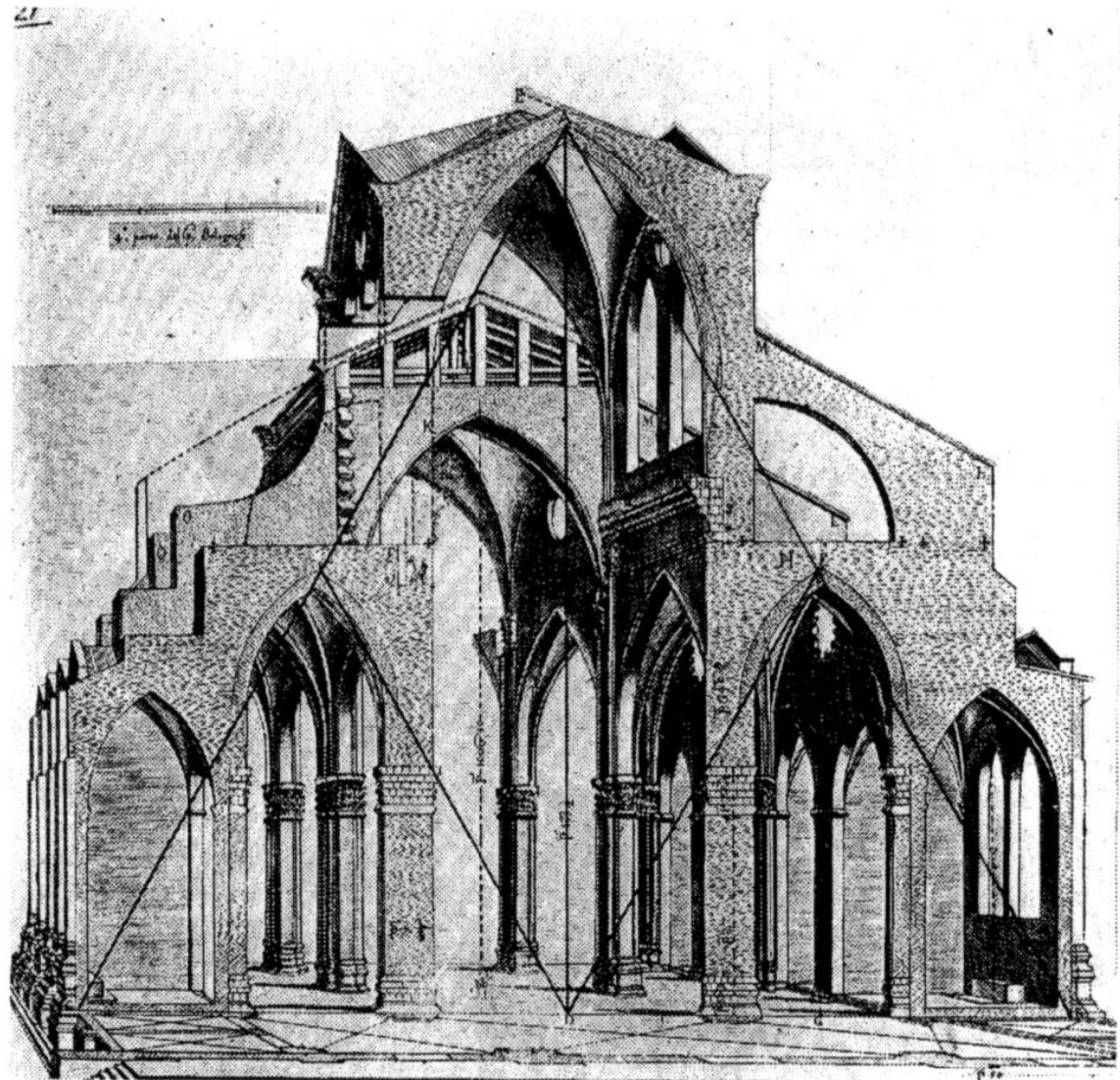


Schema strutturale di una chiesa gotica

# SISTEMI COSTRUTTIVI

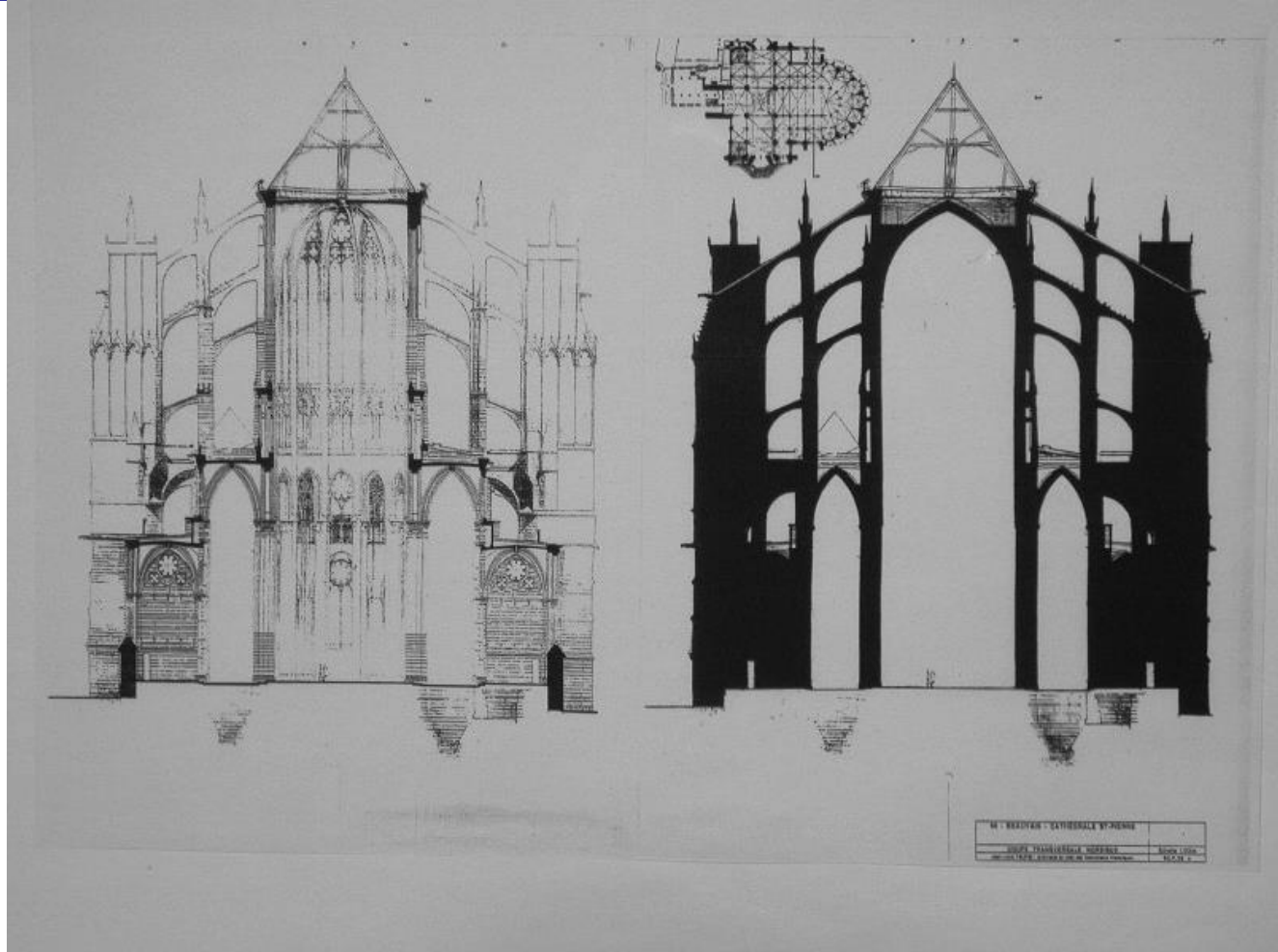
## SISTEMA SPINGENTE – ARCO

Archi rampanti di scarico delle spinte nelle cattedrali gotiche: la sezione di sinistra è inscritta in un triangolo equilatero.



# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – SISTEMA VOLTATO



**Cattedrale di Beauvais** – Doppi archi rampanti, necessari perché è la cattedrale con il rapporto più ardito fra altezza e larghezza della navata centrale. La chiesa è crollata 7 volte durante la costruzione. Le volte raggiungono infatti "solo" i 48 metri di altezza.

# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – ARCO



Cattedrale di Bourges

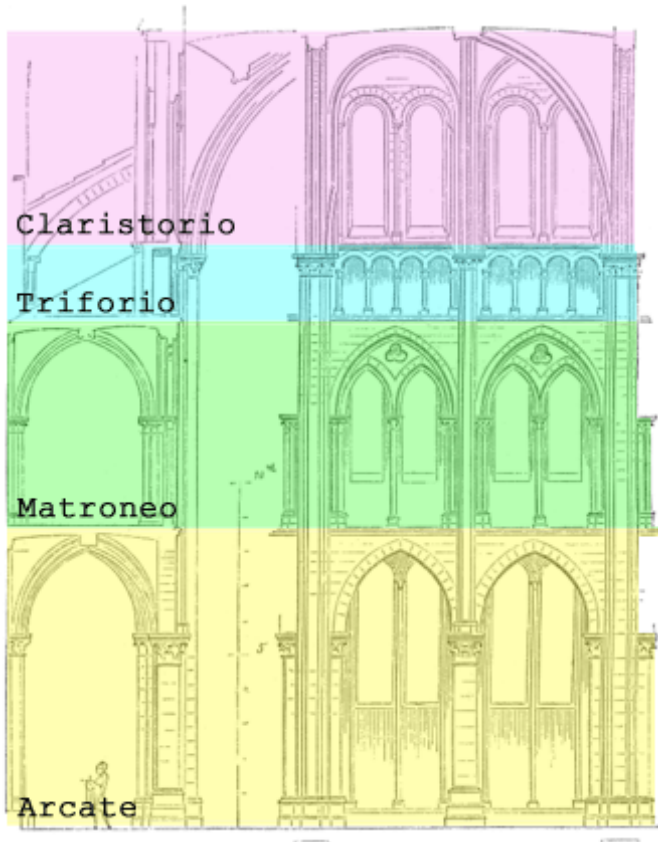


Cattedrale di Strasburgo



# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – ARCO



Disegno delle pareti della navata centrale nella **Cattedrale Notre Dame di Noyon**

Volte nella cattedrale di Saint-Pierre di **Bouevais**



# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – ARCO

### VERIFICA DI STABILITÀ DI UNA VOLTA SIMMETRICA E SIMMETRICAMENTE CARICATA

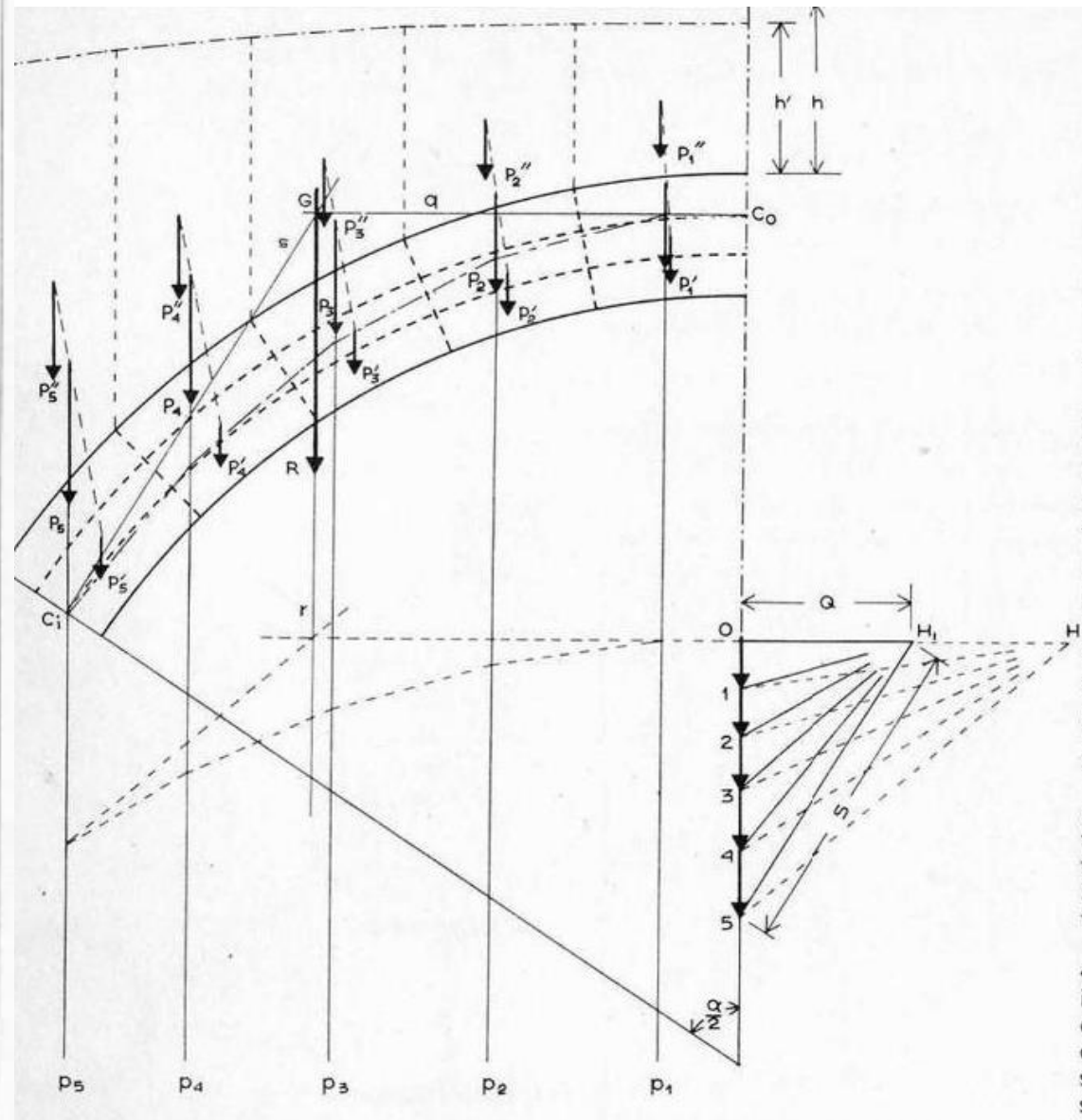
Si esegue il disegno della sezione di mezza volta e della relativa struttura sovrastante; si determina, se la semivolta comprende un angolo  $\frac{\alpha}{2} > 60^\circ$ , il giunto al rene ossia il giunto inclinato di  $60^\circ$  sulla verticale; si rendono le aree omogenee rispetto alla densità  $\gamma$  della volta; si divide il tratto di volta limitato dalla sezione di chiave e dalla sezione al rene in un numero  $n$  di conci ideali e si innalzano le verticali per i punti di divisione all'estradosso; quindi si riducono le altezze  $h$  su tali verticali del rapporto tra la densità  $\gamma_i$  di ogni materiale della struttura sovrastante e la densità  $\gamma_0$  della volta;  $h' = h \frac{\gamma_i}{\gamma_0}$ .

Calcolati i pesi  $P'_i$  di ogni tronco e i pesi  $P''_i$  del relativo solido omogeneo sovrastante, considerando 1 metro in profondità, ed applicati ai rispettivi baricentri, se ne determinano le singole risultanti  $P_i$ , le cui linee di azione  $p_i$  possono ottenersi graficamente. Tracciato il poligono 0,1,2,...,5 di dette forze  $P_i$  si costruisce un poligono funicolare ausiliario relativo ad un polo  $H$  arbitrariamente scelto e si determina, nella intersezione del primo ed ultimo suo lato, il punto di applicazione del peso totale  $R$  della  $\frac{1}{2}$  volta e relativa struttura sovrastante.

Dall'estremo superiore  $C_0$  del terzo medio della sezione in chiave, si traccia una retta  $q$  orizzontale, retta di applicazione della spinta  $Q$ ; essa interseca la retta  $r$  di applicazione del peso totale  $R$  nel punto  $G$ ; congiungendo il punto  $G$  con l'estremo inferiore  $C_1$  del terzo medio della sezione al rene, si ottiene la retta  $s$  di applicazione della risultante  $S$ .

Dal punto  $O$  del poligono delle forze si traccia una retta parallela alla spinta  $Q$ , che è intersecata dalla parallela alla risultante  $S$  condotta per il punto  $S$ , estremo del poligono delle forze, in un punto  $H_1$ ; esso determina nel segmento  $OH_1$  la intensità della spinta  $Q$  della semivolta di destra sulla semivolta di sinistra e nel segmento  $S-H_1$  l'intensità della risultante  $S$ .

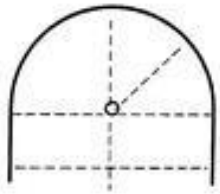
Il poligono funicolare relativo al polo  $H_1$  rappresenta il « poligono delle successive risultanti »; ciascuna di queste interseca il relativo giunto nel « centro di pressione »; il luogo dei centri di pressione costituisce la « curva delle pressioni » che deve risultare tutta compresa tra le linee di nocciolo della sezione verticale della semivolta, in modo che nella volta non si suscitino sforzi di trazione. In caso contrario si ripete la costruzione per quel giunto per il quale la curva delle pressioni è tangente alla linea di nocciolo interna.



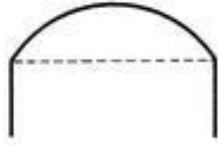
# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – ARCO

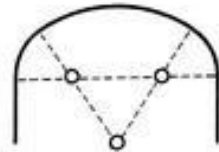
Altre forme di arco.



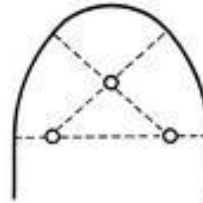
A tutto sesto



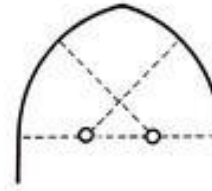
Circolare



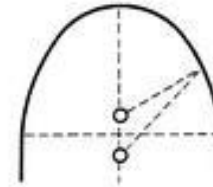
Policentrico ribassato



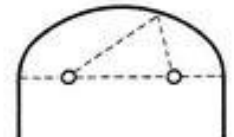
Policentrico rialzato



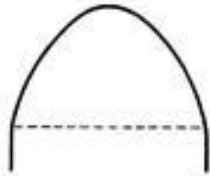
A sesto acuto



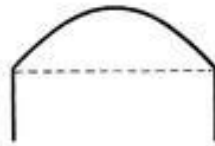
Ellittico



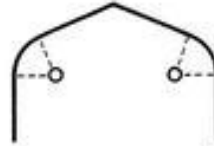
Ellittico



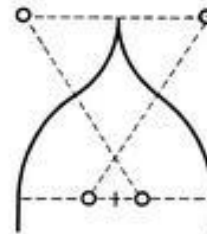
Parabolico



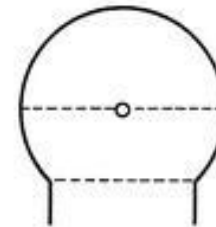
Parabolico



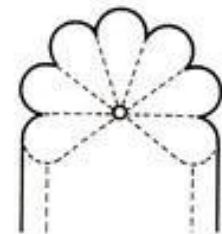
Tudor



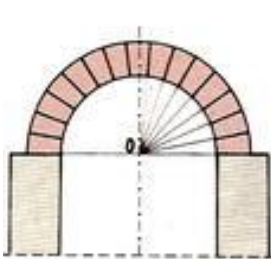
Fiammeggiante o inflesso



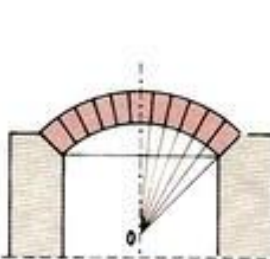
A ferro di cavallo



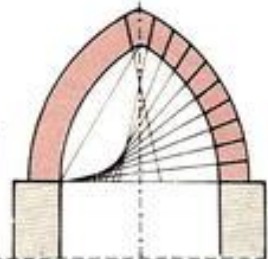
Lobato



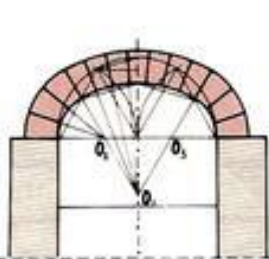
A tutto sesto



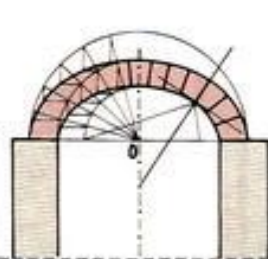
A sesto ribassato



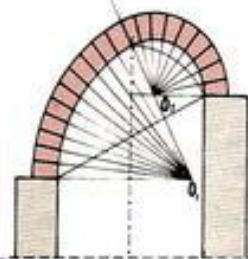
A sesto acuto



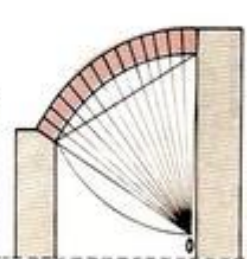
Ribassato policentrico



Ellittico



Rampante a due centri



Rampante monocentrico

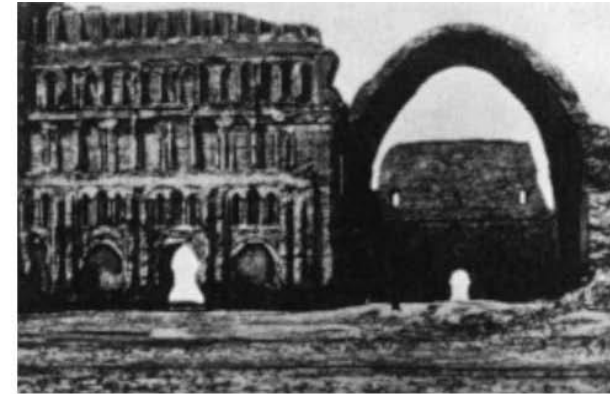
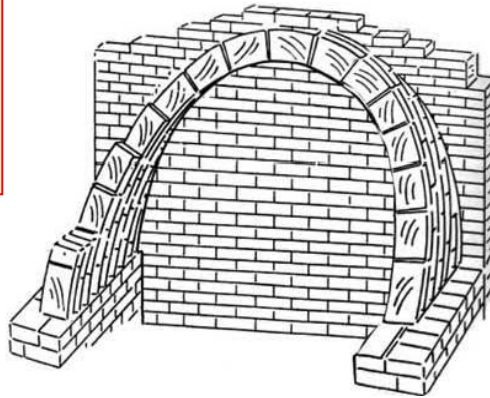
# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – SISTEMA VOLTATO E CUPOLE

**VOLTA** - serie di archi affiancati in profondità a formare la terza dimensione, oppure del risultato della rotazione di un arco di conica

VOLTE SEMPLICI – a) a botte, b) a vela, c) a cupola

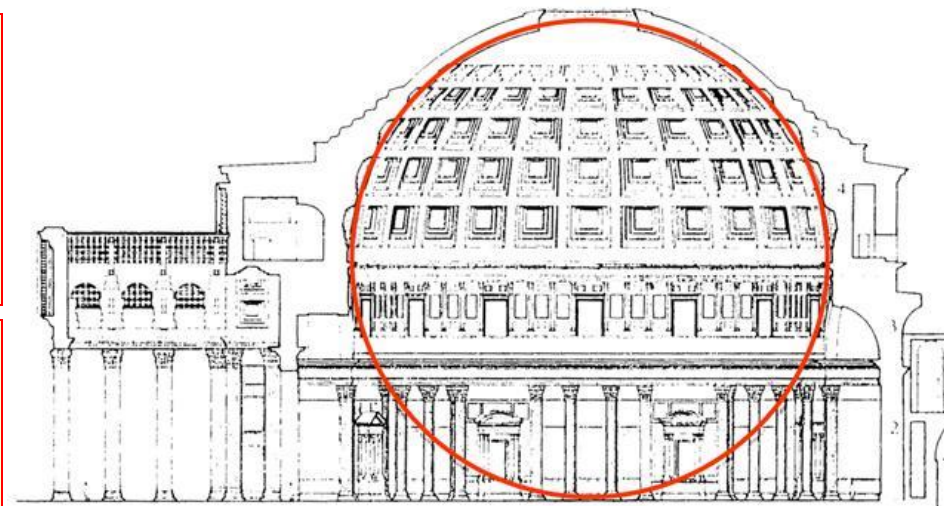
VOLTE COMPOSTE – a) a crociera, b) a crociera gotica, ecc.



**CUPOLA** - Volta a calotta con perfetta simmetria centrale con base poligonale circolare, ellittica.

La cupola idealmente si costituisce per rotazione di un arco sull'asse verticale e assume le denominazioni uguali o analoghe a quelle derivanti dal sesto dell'arco: sferica, emisferica, rotonda, ribassata, rialzata, archiacuta, parabolica, conica, ovoide, a spicchi, a ombrello, ecc.

Una cupola in architettura 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.



# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – SISTEMA VOLTATO

FILIPPO BRUNELLESCHI, S. Maria del Fiore, Duomo di Firenze - Tamburo della cupola del Duomo pronta nel 1314 (Arnolfo di Cambio).

Si doveva trovare la soluzione a dove appoggiare le enormi centine di legno che avrebbero dovuto sostenerla fino alla sua chiusura definitiva con la chiave di volta.

Concorso pubblico per la cupola bandito nel 1418. Il concorso, non ha ufficialmente vincitori, e Filippo Brunelleschi e Lorenzo Ghiberti vengono nominati capomaestri.

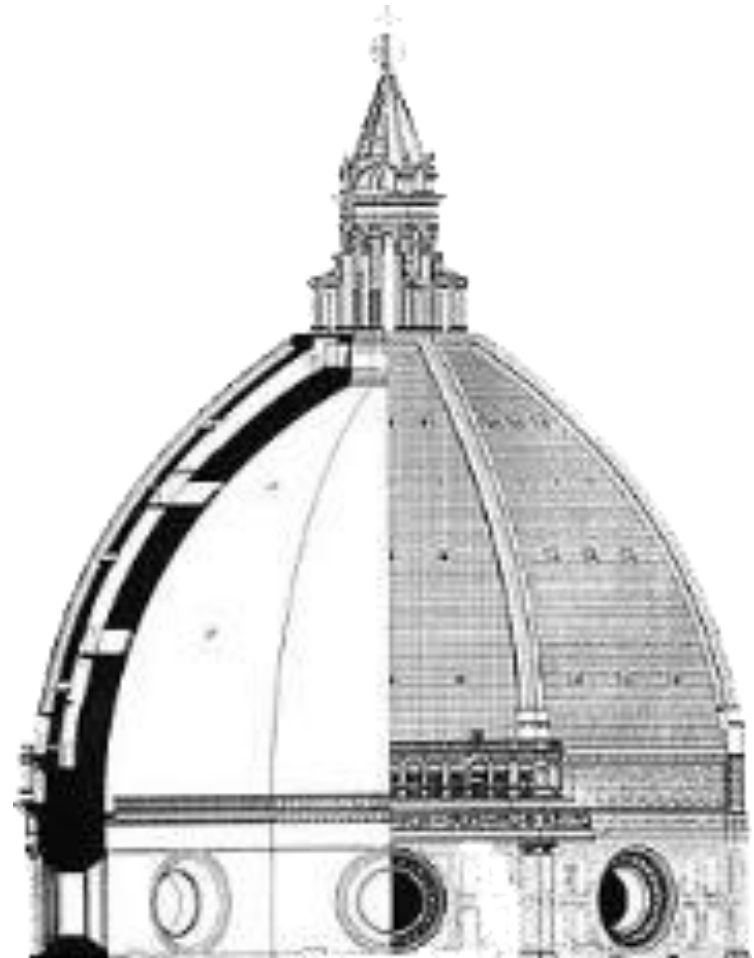
Inizio costruzione 7-8-1420. Ghiberti estromesso dai lavori nel 1425.

Completamento cupola alla base della lanterna 1-8-1436.

Brunelleschi in 12 punti illustra la struttura, la forma e le dimensioni del manufatto, ed enuncia il progetto impartendo disposizioni esecutive .

Il profilo della Cupola assume una forma d'estrema importanza per la sua stabilità: infatti, si avvicina molto a quella di una catenaria rovesciata. Questo nome deriva dal fatto che la sua forma è quella che assume una catena appesa, tenendo fermi i suoi due estremi. Bernoulli alla fine del seicento, dimostra che tale forma è la più adatta per sostenere una cupola che si regge col proprio peso.

E' la più grande cupola in muratura mai costruita (diagonale maggiore della cupola interna: 45 metri, quella dell'esterna: 54)



Cupola del Brunelleschi a Firenze

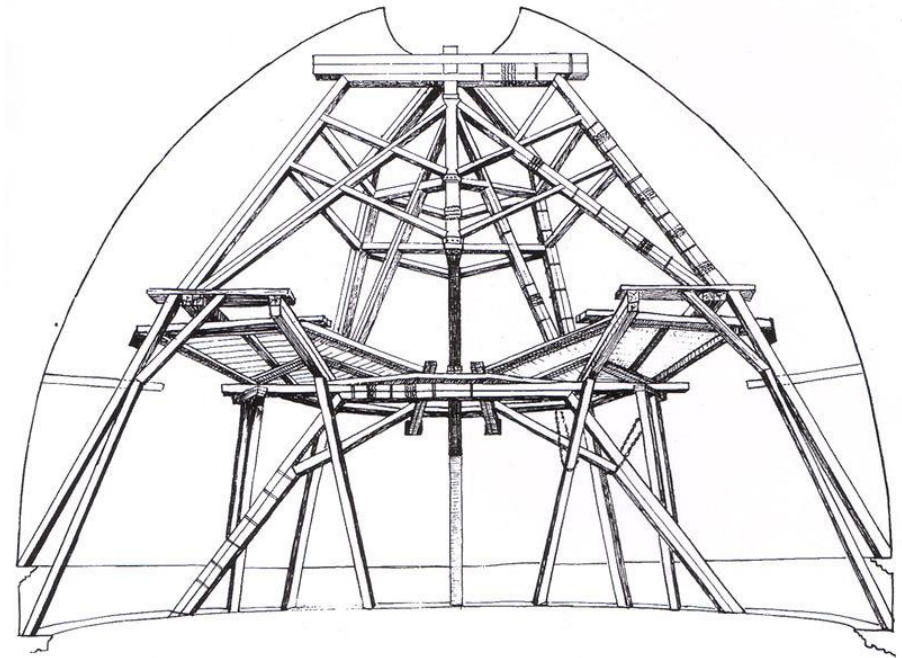
# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – SISTEMA VOLTATO

La Cupola poggia su un tamburo ottagonale e si erge su otto spicchi, le vele, organizzati su due calotte separate da uno spazio vuoto con funzione di alleggerimento. Lo spazio fra le due calotte misura circa 1,20 metri ed è attraverso il suo percorso che conduce fino alla Lanterna. Una catena lignea formata da 24 travi collegate tra loro da staffe e perni di ferro circonda tutta la costruzione.

La sua base d'imposta si trova a circa 55 metri dal suolo, la lanterna è alta 21 metri, il tamburo misura 13 metri e l'altezza della Cupola è, in media, 34 metri. L'elevazione totale dell'intera struttura, compresa la palla dorata e la croce che la sormontano, è di metri 116,50.

La cupola è una volta ottagonale, descrivibile come l'intersezione a 45° di due volte a pianta quadrata (molto simili, in effetti, alle volte della navata della stessa Cattedrale). A differenza di una cupola di rotazione, una volta non è autoreggente. L'impiego di centine, cioè di impalcature lignee cui affidare il sostegno delle murature in costruzione fino alla presa delle malte, era in questo caso indispensabile



Santa Maria del Fiore a Firenze

Ricostruzione dei ponteggi interni della cupola di Brunelleschi, seconda metà del XVII secolo

i letti di posa dei mattoni non sono orizzontali, ma seguono una curva aperta verso l'alto, detta *a corda blanda*.

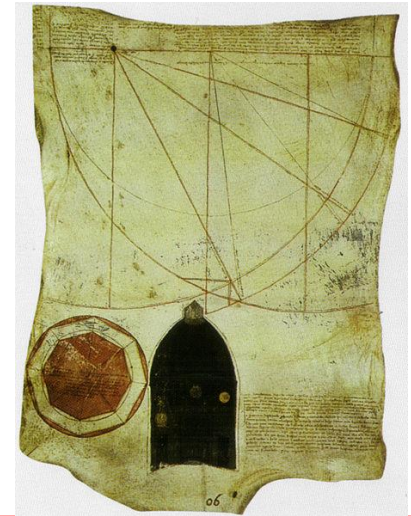
Le facce dei mattoni non sono parallele, ma sistemate lungo rette originate da un punto situato al centro dell'ottagono di base della cupola.

# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – SISTEMA VOLTATO

Per il prof. Di Pasquale i mattoni erano sistemati come se fossero stati disposti per costruire una cupola di rotazione, come se la cupola a facce piane fosse stata costruita tagliando via parti di muratura costruite come una cupola classica; perché la struttura fosse autoreggente era quindi sufficiente che nello spessore delle murature fosse possibile inscrivere una cupola di rotazione di spessore adeguato alle necessità statiche. Brunelleschi costruisce una cupola *normale* mascherandola come una cupola *impossibile*.

Santa Maria del Fiore Disegno con osservazioni sul tracciamento della Cupola (1426)



Per il prof. Ricci la tecnologia della cupola non risponderebbe affatto, nemmeno nelle strutture interne, ad una cupola di rotazione: i mattoni a *spinapesce* non sarebbero apparecchiati secondo *corsi circolari*, ma *paralleli* alle superfici delle vele.

La struttura della cupola è concepita come una *successione di piattabande radiali orizzontali*. Recenti verifiche su questa ipotesi costruttiva, fatte nell'intradosso delle calotte, verificherebbero che la struttura della cupola fu sviluppata in senso radiale-verticale e non orizzontale, come l'ipotesi *di rotazione* richiederebbe. L'utilizzo di un sistema radiale orizzontale è limitato all'assetto dei mattoni a *spinapesce*; Brunelleschi avrebbe fatto uso di una *curva pseudocircolare* posta sull'impalcato d'imposta della cupola e di un centro sulla verticale del monumento, materializzato mediante corde incrociate piombate sulle diagonali di base e fissate negli angoli relativi .

In questo modo fu possibile tracciare gli angoli della cupola utilizzando piccole centine mobili, ed allo stesso tempo (con la curva pseudo circolare a cui viene riferita una cordicella mobile fissata da un lato su questa e passante per il centro sulla verticale) offrire ai muratori un riferimento in ogni punto della costruzione per porre in opera i mattoni. Questo sarebbe quindi l'effettivo ruolo dei mattoni a *spinapesce*, il che spiegherebbe la muratura a *corda blanda*

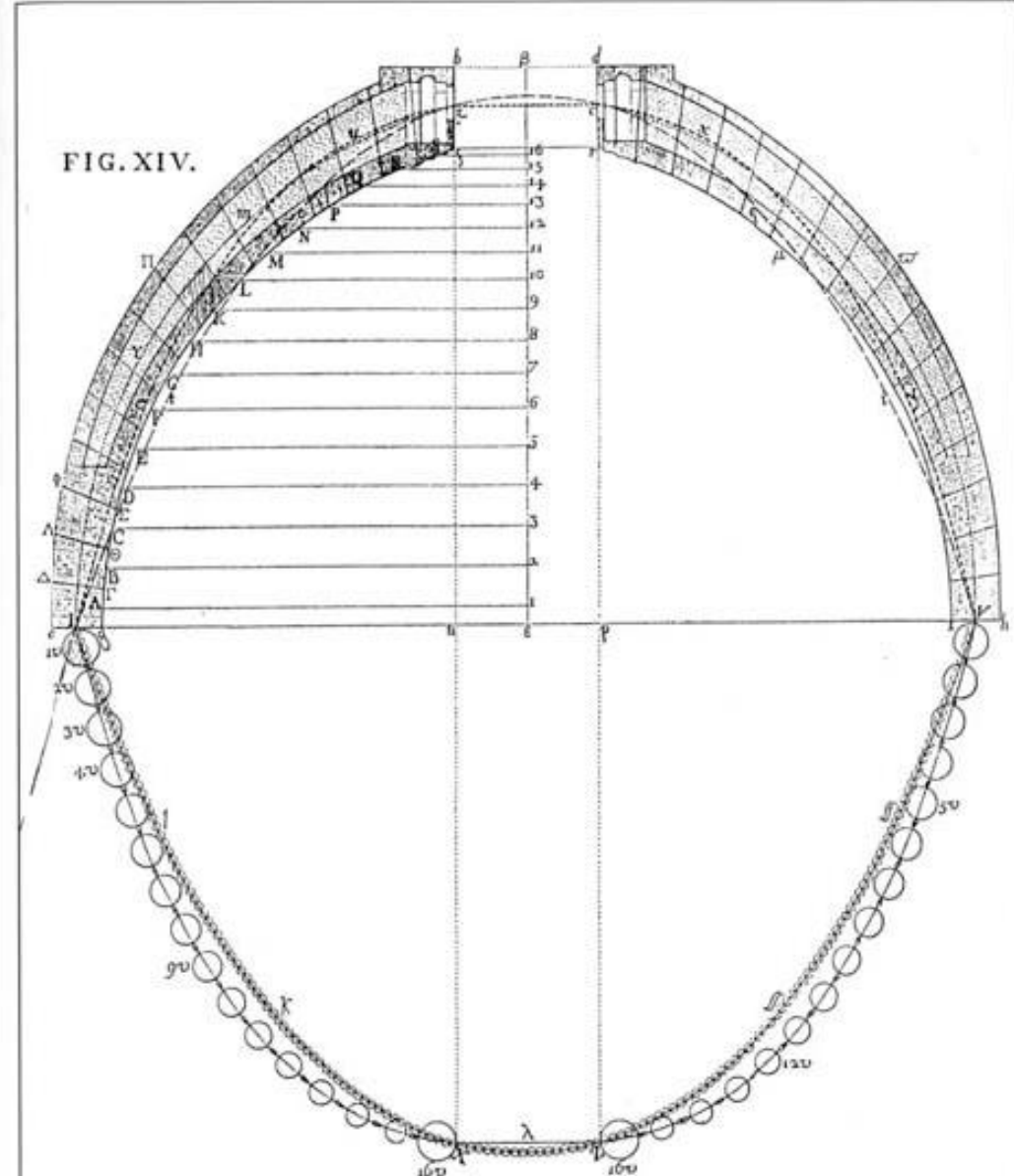
# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – ARCO

### ***Cupola di San Pietro.***

Giovanni Poleni viene chiamato (1743) dal papa Benedetto XIV a studiare lo stato di degrado della cupola ed il modo di porvi rimedio.

Poleni evidenzia che la forma dell'arco segue la funicolare dei carichi, per evitare che si generino delle eccentricità (momenti flettenti) che le strutture in muratura non possono sopportare. Determina la resistenza di barre di ferro in funzione della loro sezione, e studia il rapporto tra la resistenza di campioni di ferro rettilinei e la resistenza di barre di ferro piegate in forma di cerchi.





# SISTEMI COSTRUTTIVI

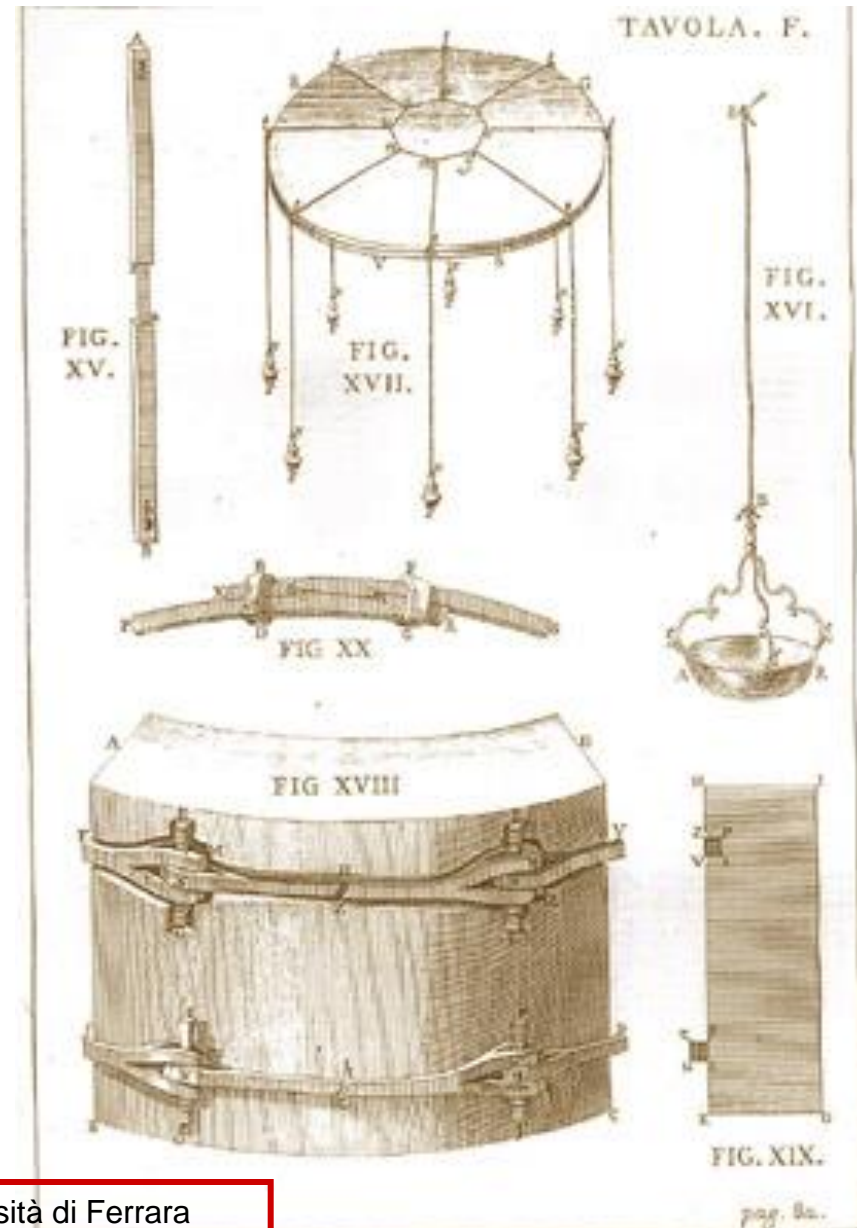
## SISTEMA SPINGENTE – ARCO

### **Cupola di San Pietro**

Il Vanvitelli (ufficialmente “l’Architetto della Reverenda Fabbrica”), sotto la guida di Poleni, rinforza la Cupola con 6 cerchi di ferro, di cui il più grande di un diametro di 60 metri.

I cerchi vengono fissati alla Cupola fra il 1743 ed il 1748, e svolgono ancora oggi la loro preziosa funzione di rinforzo.

*Alcuni esperimenti di Poleni per il restauro della cupola vaticana. In alto a sinistra, un pezzo di ferro preparato per essere studiato con la macchina divulsoria e, in alto al centro, il dispositivo per esaminare la resistenza di un cerchio in rapporto a quella di un ferro dritto. In basso, esame del modo più sicuro per fissare i cerchi alla cupola. (Giovanni Poleni, Memorie istoriche della Gran Cupola del Tempio Vaticano, Padova 1748).*

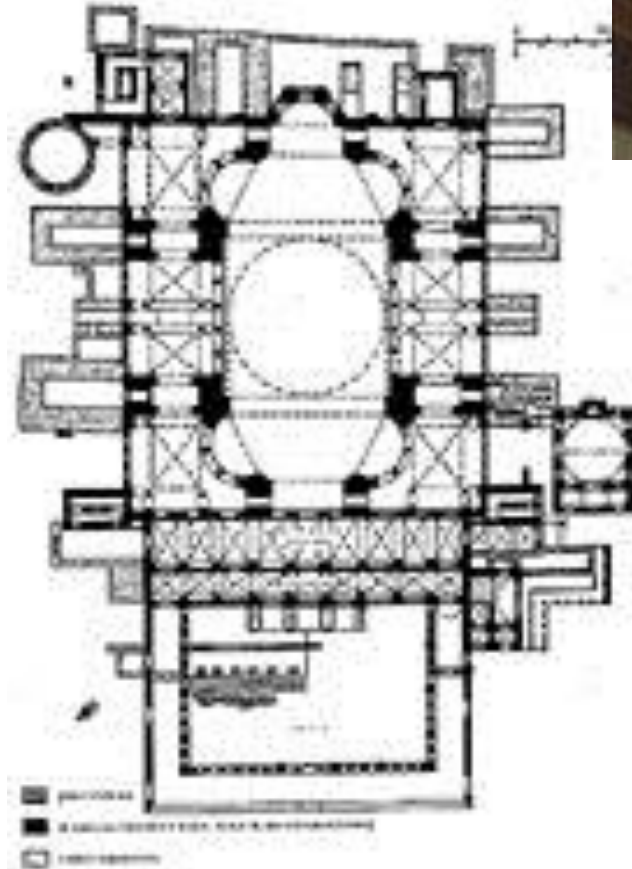


# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA SPINGENTE – ARCO

**Cupola di S. Sofia – Istanbul (360, 532, 562 d.C.)**

*cupola (31 metri di diametro) che non poggia su muri pieni, altezza m. 55,6*



# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA TRIANGOLARE – SISTEMA TRIANGOLO INDEFORMABILE

Il sistema triangolare si basa sul principio **triangolo indeformabile**.

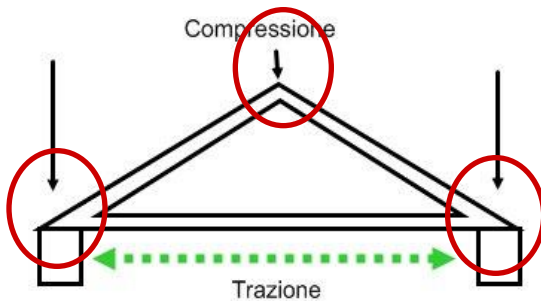
1. Due aste inclinate compresse (puntoni)
2. Una asta orizzontale tesa (tirante).

Forme più complesse si diffondono in Italia a formare **capriate**.

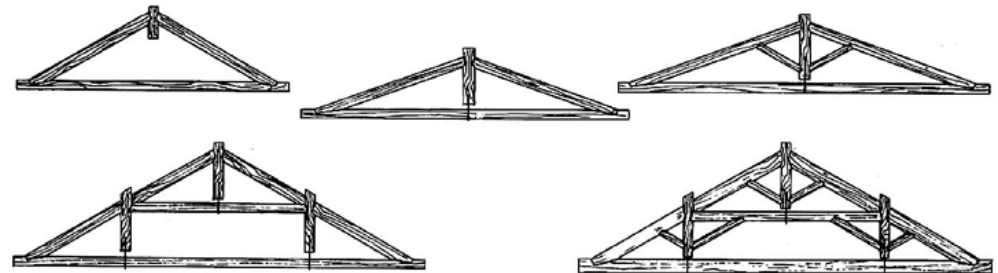
1. Due aste inclinate compresse
2. Una asta orizzontale tesa
3. Un monaco verticale per equilibrare la spinta al vertice delle due aste inclinate
4. Saeettoni inclinati (eventuali) per limitare la luce delle aste inclinate

Si possono costruire capriate

1. semplici (con un monaco) , 2. composte (con tre monaci)



**triangolo indeformabile**



**Soluzioni costruttive**

# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA TRIANGOLARE – SISTEMA TRIANGOLO INDEFORMABILE



# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA ELASTICO – SISTEMA COSTRUTTIVO DEL TELAIO



Il principio del **TELAIO** si basa sul fatto che **il piedritto e l'orizzontamento sono collegati tramite vincoli d'incastro** (più o meno perfetti) oppure **a cerniera** e sfruttano le loro proprietà elastiche.

Alla base i **piedritti** possono essere **incastrati** o **incernierati**. La ripetizione delle aste di piedritto in orizzontale o verticale dei telai genera schemi strutturali a gabbia o scheletro indipendente. Le strutture sono dunque iperstatiche.

Nelle strutture elastiche a scheletro indipendente le murature di chiusura dello spazio dell'edificio sono necessariamente di **tamponamento** e svolgono una funzione portante non principale (danno eventualmente solo un contributo alla rigidità orizzontale).

# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA ELASTICO – SISTEMA COSTRUTTIVO DEL TELAIO



Nelle strutture elastiche a scheletro indipendente le **strutture di chiusura** (muratura, ecc.) sono necessariamente di **tamponamento** e svolgono una funzione portante non principale (danno eventualmente solo un contributo alla rigidità orizzontale). La tradizione mostra soluzioni diverse in funzione dei materiali locali.

### CAVO –

Elemento tecnico non rigido che assume una configurazione geometrica curvilinea la cui geometria dipende dal sistema complessivo dei carichi agenti.

i vincoli ai supporti del cavo devono essere tali da controbilanciare le componenti verticali ed orizzontali della trazione esercitata da cavo.

Allungamento

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Deformazione del materiale

$$\epsilon = \frac{\delta L}{L}$$

Il sistema della fune è antico: dalle tende dei nomadi alle funi delle navi.

Il legame fra tensione  $\{\sigma\}$ -sigma} e deformazione  $\{\epsilon\}$ -epsilon} ottenuto sperimentalmente per il materiale impiegato:  $\sigma = E\epsilon$ , consente di esprimere l'estensione della corda in seguito allo sforzo di trazione F con l'espressione:

$$\delta L = \frac{\sigma L}{E}$$

dove:

**E** è il modulo di elasticità del materiale;

**$\epsilon$**  è la deformazione unitaria;

**L** è la lunghezza del provino, in questo caso la lunghezza della corda;

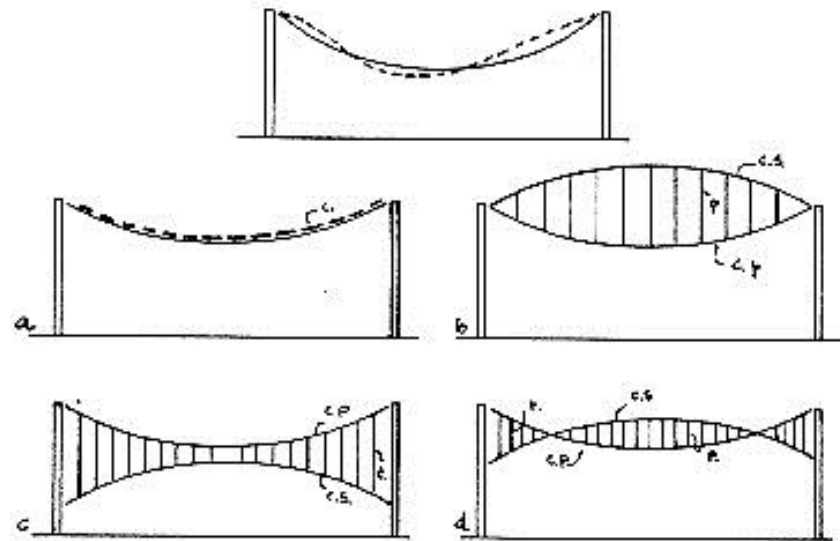
**$\delta L$**  è l'allungamento del provino a causa della trazione.

# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA ELASTICO – SISTEMA COSTRUTTIVO DEL CAVO

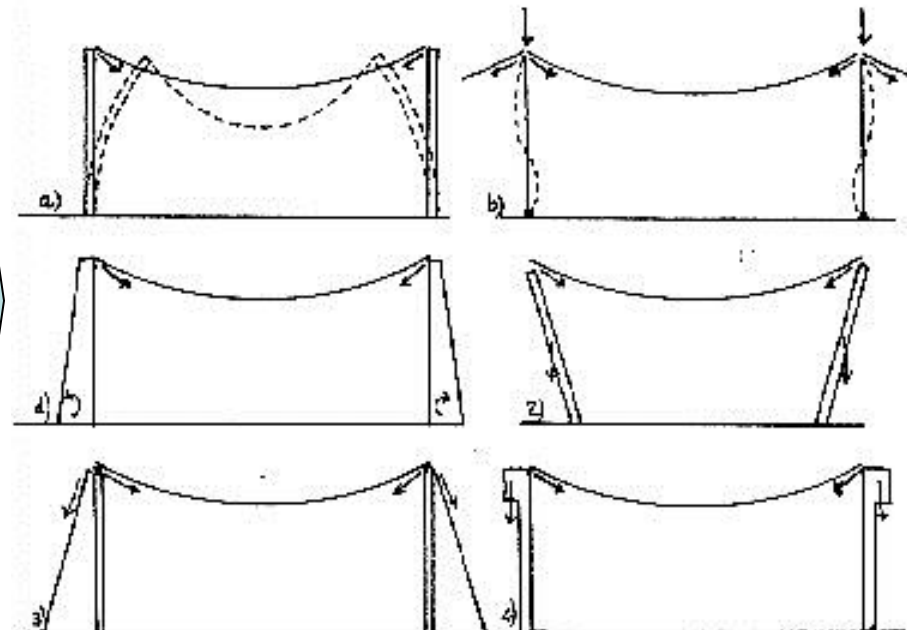
**INSTABILITA' DEL CAVO** - il cavo può essere instabile ad azioni con componenti verticali (complanari ed opposte ai carichi agenti) od orizzontali (ortogonali al piano di giacitura del cavo).

Si risolve l'instabilità: 1) aumentando l'entità dei carichi verticali (caso "a" in figura); 2) applicando cavi stabilizzanti uniti al cavo da stabilizzare tramite tiranti o puntoni (casi "b, c, d" in figura).



**INSTABILITA' DEI SUPPORTI** - il cavo sorretto da aste snelle, che possono essere soggette a deformazioni per eccessiva elasticità o per carico di punta.

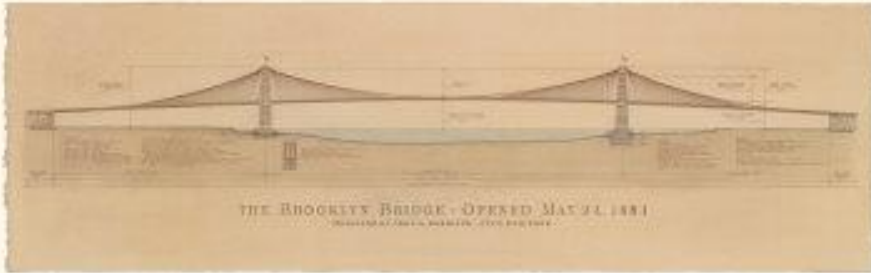
Si risolve l'instabilità controbilanciando la componente orizzontale dell'azione del cavo agendo sul supporto stesso aumentandone la resistenza a flessione (1), conformandolo opportunamente (4), imponendo adeguate giaciture (2) o introducendo cavi stabilizzanti (3)





# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA ELASTICO – SISTEMA COSTRUTTIVO DEL CAVO



**Ponte di Brooklyn** (1867-1883) – costituito da 4 cavi d'acciaio assicurati ad ancoraggi fissati ad apposite piastre (una per ogni cavo) contenute all'interno di calotte di granito alte fino a 3 metri e poste agli estremi del ponte stesso. Ogni cavo è composto da 5657 m di filo d'acciaio galvanizzato con zinco al fine di renderlo resistente al vento e alla pioggia. Due piloni, posti a circa 300 metri dalle calotte, poggiano su cassoni annegati sull'Est River.



# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA ELASTICO – SISTEMA COSTRUTTIVO DEL CAVO

### Copertura Olympiapark di Monaco di Baviera (1968-71)

– Costituita da rete di cavi pre-tesi, sospesi tra piloni in acciaio e ponti di collegamento reticolari. Durante la realizzazione i cavi sono stati prima montati ai piedi dei piloni (funzionano come bielle), e successivamente innalzati alla quota prevista. La rete venutasi a creare è poi stata ricoperta da pannelli in vetro acrilico, collegati tra loro ed ancorati con supporti-cuscinetto.

La maglia di doppi filii incrociata misura 70x70 cm. Il peso complessivo della copertura è di 20 kg/mq



# SISTEMI COSTRUTTIVI

## SISTEMA ELASTICO – *SISTEMA COSTRUTTIVO DEL CAVO*



Santiago Calatrava, ponte di Samuel Beckett, Dublino



Santiago Calatrava, ponti a Reggio Emilia