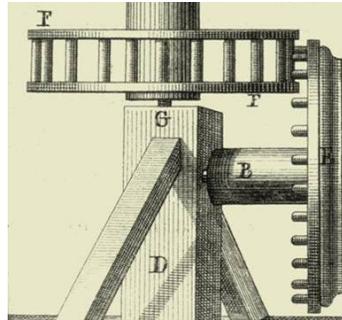
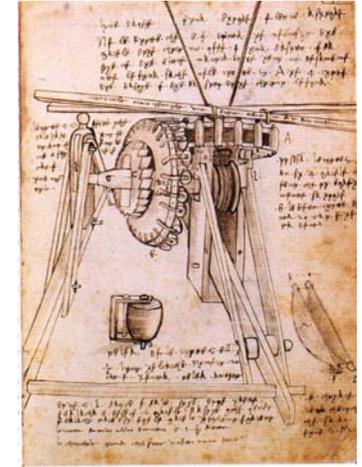
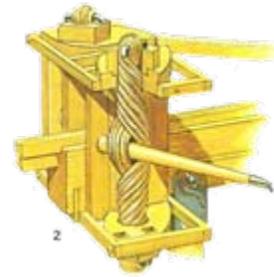
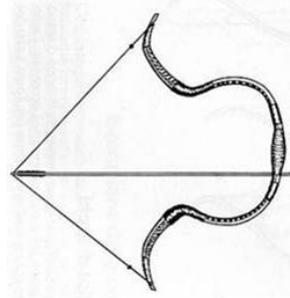
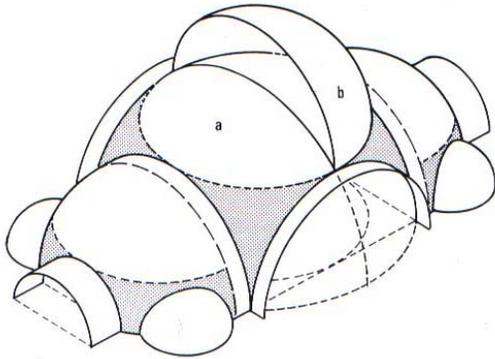




Alessandro Freddi



Il ruolo della sperimentazione nell'evoluzione delle strutture dall'Ellenismo al Rinascimento



PREMESSA

“Non fui io a proporre l’argomento di cui sto per parlare, bensì gli organizzatori di questo convegno. Fu una scelta ambiziosa, e in un primo momento ne rimasi turbato; non avrei mai avuto il coraggio di proporre un argomento simile. Ma dopo averci riflettuto per qualche tempo, fui felice che mi fosse stato assegnato un compito così palesemente superiore alle mie forze e che di mia iniziativa non avrei mai osato scegliere. ”

(K. Popper: Tre saggi sulla mente umana, Vallecchi Ed. 1992)



Prefazione

Si può parlare di invenzione e di evoluzione nello sviluppo tecnologico delle strutture? Nella accezione più semplice è struttura tutto ciò che sostiene carichi e che permette agli "cose" di non cadere. L'essere umano ha dato ad esse vari significati tutte le volte che ha costruito oggetti che non esistevano in natura e che si sono inseriti nel paesaggio fisico e culturale del suo universo, dalla terra al cielo allo spazio.

Il **primo** scopo della presentazione consiste nel mostrare come la scienza e la tecnica abbiano spesso percorsi distinti nella storia dell'umanità, essendo la prima frutto essenzialmente **del pensare** con riferimento alle categorie della razionalità come "la dimostrazione e l'evidenza" e la seconda frutto **del fare** con riferimento alle categorie della memoria, come "la similitudine e l'apprendimento". Tuttavia solo quando una felice congiunzione astrale nei periodi di maggiore libertà del pensiero, porta i due percorsi ad incontrarsi, si generano i grandi momenti di rapido sviluppo e di creazione di nuovi paradigmi.

Un **secondo** scopo è quello di mostrare come, in ogni caso, la sperimentazione, intesa come strumento di soluzioni di tentativo e di correzione degli errori, sia il motore dell'evoluzione della scienza e della tecnica. A questo riguardo, l'esposizione è limitata ad alcuni casi emblematici di oggetti/strutture che hanno colpito l'autore, con buone dosi di parzialità e di incompletezza.



Prefazione cont.

Gli esempi sono liberamente tratti dal periodo che va dalla Nascita della Scienza al Rinascimento.

Queste riflessioni non costituiscono dunque una presentazione cronologica, ma viceversa vogliono mostrare, e questo è il **terzo** scopo, l'utilità di dare agli studenti di ingegneria strumenti elementari di analisi storica, per collegare cognizioni specialistiche in unità di pensiero e di cultura.

Bologna, 3 Maggio 2005



Introduzione

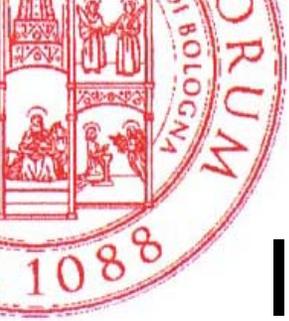
La storia è anche la storia dei manufatti e delle strutture costruite dall'uomo.

Gli oggetti, al pari delle idee, sono **prodotti culturali.**

Gli oggetti prodotti dall'uomo si sono sviluppati per evoluzione da sistemi primitivi generata dalla continua sperimentazione che l'essere umano ha condotto su di essi.

Tale evoluzione lenta e continua ha subito discontinuità quando persone dotate di spirito inventivo, rimaste anonime oppure ricordate dalla storia, attraverso invenzioni originali o sintesi di soluzioni esistenti, hanno introdotto elementi di totale novità.

Così la storia è in grado di ricostruire l'evoluzione delle teorie e degli oggetti per certi versi simile a quella naturale, a volte tesa allo sviluppo di soluzioni che si estinguono, a volte orientata a soluzioni sempre nuove che danno l'impressione di uno sviluppo senza fine ed altre infine che si stabilizzano in **estremi evolutivi** o su **casi emblematici** alcuni dei quali verranno esaminati nella lezione presente.



Il ruolo della osservazione

È ragionevole pensare che l'essere umano abbia sviluppato ogni tecnica partendo dall'osservazione della realtà e procedendo con un processo evolutivo per certi aspetti analogo a quello della natura, attraverso la sperimentazione e la successiva formulazione di teorie.

L'osservazione (**della natura e degli artefatti esistenti**) conduce, attraverso congetture, alla individuazione di regole pratiche che costituiscono il patrimonio degli addetti ai lavori. Dalla primitiva costruzione architettonica a scopo religioso e dai primi utensili si affinano regole di costruzione con crescente consapevolezza progettuale.



Struttura

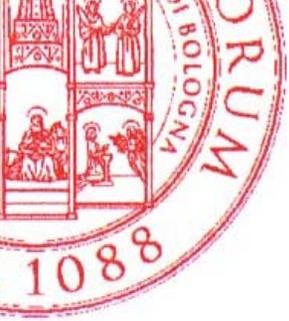
La definizione di struttura è complessa. In senso generale è equivalente a piano, costruzione, costituzione, sistema.

Forse la definizione astratta più vicina è fornita dalla filosofia del linguaggio come

“complesso di elementi sottoposti a relazioni determinate”

o come **correlazione di parti che permettono di rispondere all'uso cui il sistema è destinato.**

Nicola Abbagnano: Dizionario di filosofia, UTET 2001.



Si può forse allora parlare anche per un manufatto, al pari di un linguaggio, di un **contenuto pragmatico, di contenuto sintattico e di contenuto semantico,**

*(R. Carnap: Foundation of Logic and Mathematics, 1939.
Vedi anche: I fondamenti filosofici della fisica (1967), Il
Saggiatore, Milano, 1971.)*

La struttura esprime in particolare, il contenuto sintattico.



Sembra che esista un legame tra i tre contenuti di un linguaggio e le tre categorie che Vitruvio riferisce a una "costruzione":

Utilitas

Firmitas

Venustas

La sperimentazione sulle strutture è riconducibile alla sperimentazione sulla "firmitas".



In accezione ristretta, la struttura
è un mezzo per sostenere e/o
trasmettere forze o per
immagazzinare energia.

Già questa definizione presuppone la conoscenza del concetto di **energia** e del concetto di **elasticità**, scoperte del XVII Secolo che hanno cambiato il modo di osservare la realtà fisica e la resistenza dei materiali.



Sperimentazione

In assenza di una teoria che permetta la previsione delle sollecitazioni e di una sperimentazione che permetta la misura della resistenza, le regole del “costruire” possono solo essere dedotte dall’esperienza su strutture esistenti.

La sperimentazione può esplicarsi in due modi:

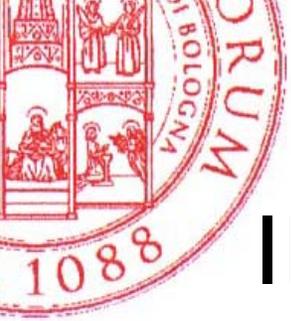
- Basandosi sulla **esperienza** precedente o su **modelli** espressamente sviluppati.
- Basandosi sulla risposta, alle forze esterne, della **struttura esistente**.



Evoluzione

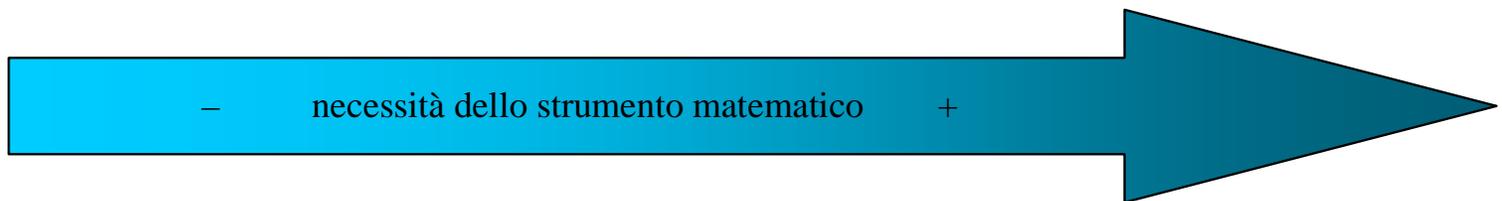
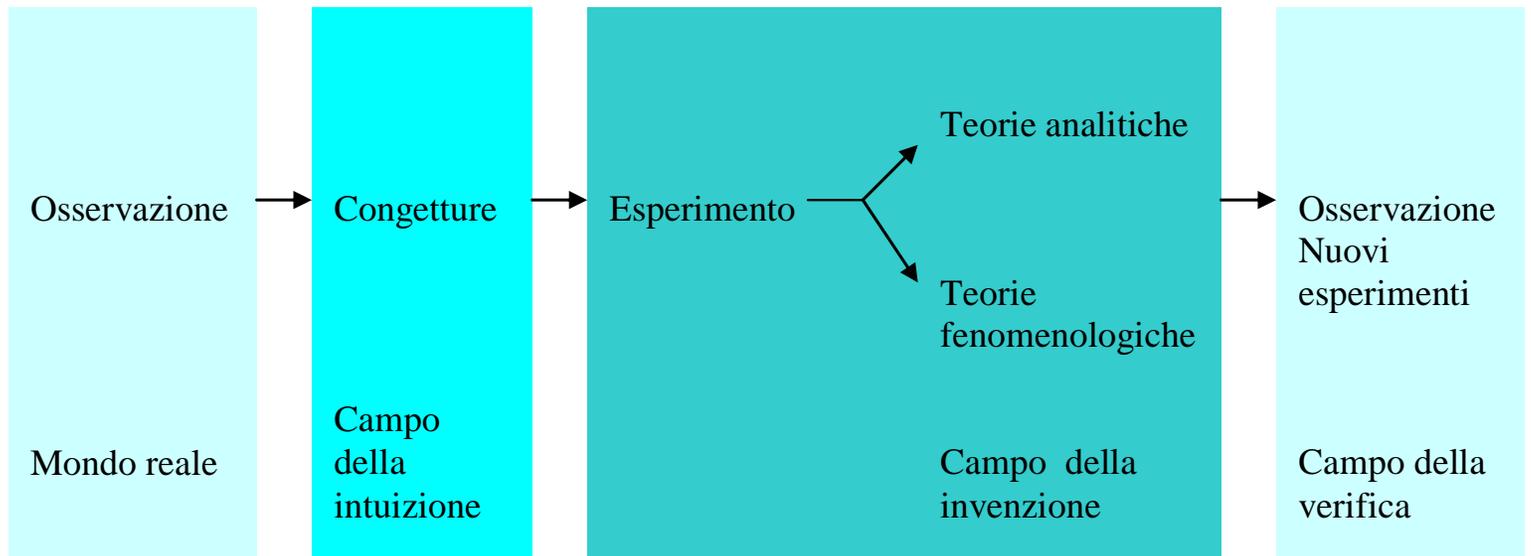
“Secondo la teoria dell’evoluzione l’adattamento è il risultato di una sequenza di piccoli miglioramenti in molti passi, allo stesso modo in cui la **struttura** delle biciclette, automobili, macchine da scrivere ed orologi di oggi è il risultato di molti passi di miglioramenti relativamente piccoli. L’analogia con il miglioramento delle nostre macchine può essere spinta un po’ oltre. Per perfezionare le nostre macchine noi facciamo largamente ricorso alla pratica del tentativo e della eliminazione dell’errore. Cerchiamo i pezzi che non lavorano in modo ottimale e studiamo il modo di cambiarli. Questi sono i nostri tentativi. Dopo di che scartiamo anche le modifiche che non funzionano: in ciò consiste l’eliminazione degli **errori**.....”

(K. E. Popper, Op. cit.)



Il percorso della scienza

1. invenzione (come frutto della creatività dell'uomo)
2. sperimentazione (come strumento di ricerca dell'accordo tra invenzione-congettura e comportamento reale)
3. evoluzione (come frutto dell'invenzione e della sperimentazione continua)
4. teorie (come strumento di generalizzazione di risultati particolari ed estensione a casi nuovi)





Il Rinascimento ellenistico

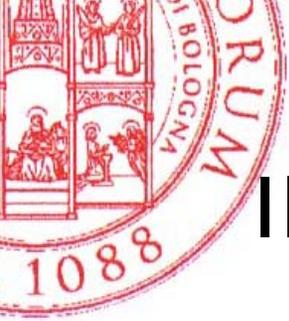
Si intende il periodo della civiltà greca compreso tra la morte di Alessandro (323 a.C.) e la battaglia di Azio (31 a.C.), inizio della età imperiale, anno in cui l'influenza di Roma si estende definitivamente sui paesi ellenizzati (annessione dell'Egitto).

“La sensibilità dei Greci arcaici non riconosceva valore diverso ad abilità tecniche che noi definiremmo ‘artistiche’, rispetto alle competenze artigianali. Nei primi poeti epici è *techne* tanto la lavorazione dei metalli quanto l’arte con cui l’aedo intesse il suo canto.

Parlare delle **competenze scientifiche di una società antica** richiede numerose cautele. Siamo di fronte a civiltà il cui corso storico durò per secoli, a volte millenni, il che ci suggerisce che i saperi e il modo in cui erano recepiti dal corpo sociale non siano rimasti immutati nel tempo.

C’è tanta differenza fra il sapere tecnico arcaico (VIII-VI sec. a.C.) e quello ellenistico (IV-I sec. a.C.) quanto ce ne può essere fra l’inizio del XVIII sec. e l’età contemporanea.”

(Claudio Cadei, Scienze antropologiche)



Il contesto di un pensiero così raffinato

- Migrazioni greche verso i nuovi regni d'Asia, d'Egitto e d'Italia
- Ricupero di antiche culture **tecnologiche** nelle nuove sedi dei regni greci
- Imponente produzione di papiro che permette la creazione di grandi archivi e biblioteche pubbliche e private
- I conseguenti progressi della fisica e della matematica con innovazioni nel campo dell'ingegneria militare e della costruzione di macchine.



Una revisione storica

Una recente analisi sulla **scienza in periodo ellenistico,**

L. Russo: op. cit.

Il periodo ellenistico, in contrapposizione alla valutazione degli storici classici che lo considerano periodo di decadenza, è viceversa il periodo della nascita della scienza e di grandi scienziati come **Euclide e Archimede** che non furono tuttavia isolati precursori ma esponenti di una vasta compagine di scienziati fondatori della scienza duemila anni prima di Galileo e Newton.

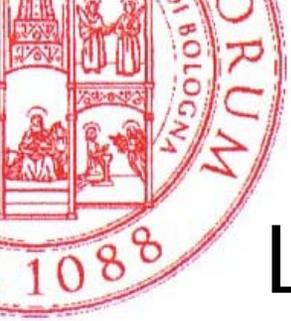
(Vedi anche :Marcello Cini, prefazione all'op. citata).



Anche per la **scienza medievale** si tende a recuperare il valore delle controversie scientifiche sulle teorie di Aristotele nelle Università europee di fresca istituzione.

*E. Grant : La scienza nel Medioevo, II
Mulino 1997*

Presso queste nuove università fiorirono senza tregua analisi della Scienza aristotelica con dibattiti che segnarono la storia della diffusione e della assimilazione dell'antica scienza greca nel suo passaggio dall'impero bizantino all'Islam e successivamente all'Europa occidentale.



La meccanica delle strutture

Sembra che
il trattato più antico sulle
strutture sia dovuto ad
Aristotele (384-322 a.C.) o ad un
aristotelico:
“Principi di Meccanica”:

Nella *Vita di Marcello* (14),
Plutarco descrive le
invenzioni meccaniche che
Archimede fece disporre in
occasione dell’assedio
romano di Siracusa.
Plutarco non sottolinea
l’interesse di Archimede
nell’ingegneria bellica:

fu ancora un **potente**,
Ierone II, re di Siracusa, a
convincere uno
scienziato, Archimede, a
“rivolgere un poco della sua
tecnica dalle cognizioni
teoretiche alle cose
concrete”.



I grandi scienziati del periodo ellenistico:

- **Euclide** di Alessandria (300 a.C.)
- **Archita** di Taranto (IV sec. a.C.) il primo a interpretare la meccanica con principi matematici (*secondo Diogene Laerzio, trattato non pervenuto*).
- **Ctesibio** di Alessandria (III sec. a.C.) fondatore della pneumatica e iniziatore della scuola dei meccanici alessandrini, costruttore meccanico e idraulico, (*opere perdute*)
- **Aristarco** di Samo (310-250 a.C.) fondatore della teoria eliocentrica.

Cont.



- **Eratostene** (Bibliotecario ad Alessandria e primo calcolatore delle dimensioni della terra, 240 a.C.)
- **Filone** di Bisanzio (III, II sec. a. C. continuatore di Ctesibio, Costruzione di macchine belliche, esperienze di pneumatica)
- **Archimede** di Siracusa (287- 212 a.C.) attivo ad Alessandria e a Siracusa (opera sistematica sulla statica, lavoro sul metodo (scoperto nel 1906),
- **Apollonio** di Perge (Sulle coniche, III sec. a.C.)
Le opere, sono andate in molti casi perdute o ritrovate in parte fortunosamente molti secoli dopo.



La decadenza del livello scientifico della successiva scienza romana

- Cultura enciclopedica
contro cultura
scientifica
- Sviluppo della tecnica
indipendente
dalla scienza

Il periodo di decadenza della Scienza in Europa, è dovuto alla incapacità del mondo romano di acquisire i contenuti scientifici elaborati nel periodo ellenistico per la mancanza di interesse per le scienze teoriche ed astratte e viceversa per la unica attenzione a una cultura enciclopedica basata su manuali latini che interpretavano in modo impreciso la scienza greca e per la generale decadenza del mondo latino dal **500 d.C. al 1000 d.C.** dovuto a note vicende storiche (Invasioni barbariche e guerre gotico-bizantine).



Le cause

3. **Si perpetua una conoscenza tecnica** che è basata più su una trasmissione di conoscenze per apprendistato e per similitudine, meno suscettibile di innovazione.
4. **Si ha una lacunosa interpretazione** dei testi scientifici per la formazione umanistica dei lettori, specialmente dei **traduttori dal greco e dall'arabo in latino**, incapaci di comprendere il contenuto.

(vedi G. Pugliese Carratelli a cura di: I Bizantini in Italia, Garzanti Scheiwiller 1982),



Uno dei primi strumenti in Egitto e in Grecia



V Dinastia, 2500 aC

La soluzione tecnica della bilancia: (aumento della sezione nel punto a momento massimo) prima della scienza.

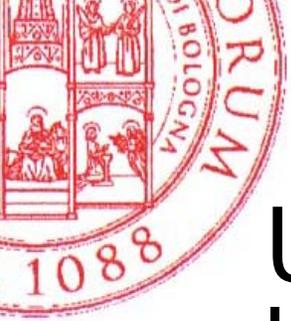


Pesatura e imbarco del siffo, sotto il vigilante sguardo di re Arcesilao II di Cirene
Interno di un vaso da Vulci, Etruria, ca. 565 a. C.
Parigi, Bibliothèque Nationale



La scienza “rinasce”
quando è possibile la
traduzione e la
comprensione dei testi
dei manoscritti greci
arabi e bizantini.

gli intellettuali
rinascimentali **non**
erano in grado di
capire le teorie
scientifiche ma erano
attratti dalle macchine
descritte e in parte
tramandate e dalle
architetture del passato.



Una delle scoperte ellenistiche: l'amplificatore di forza

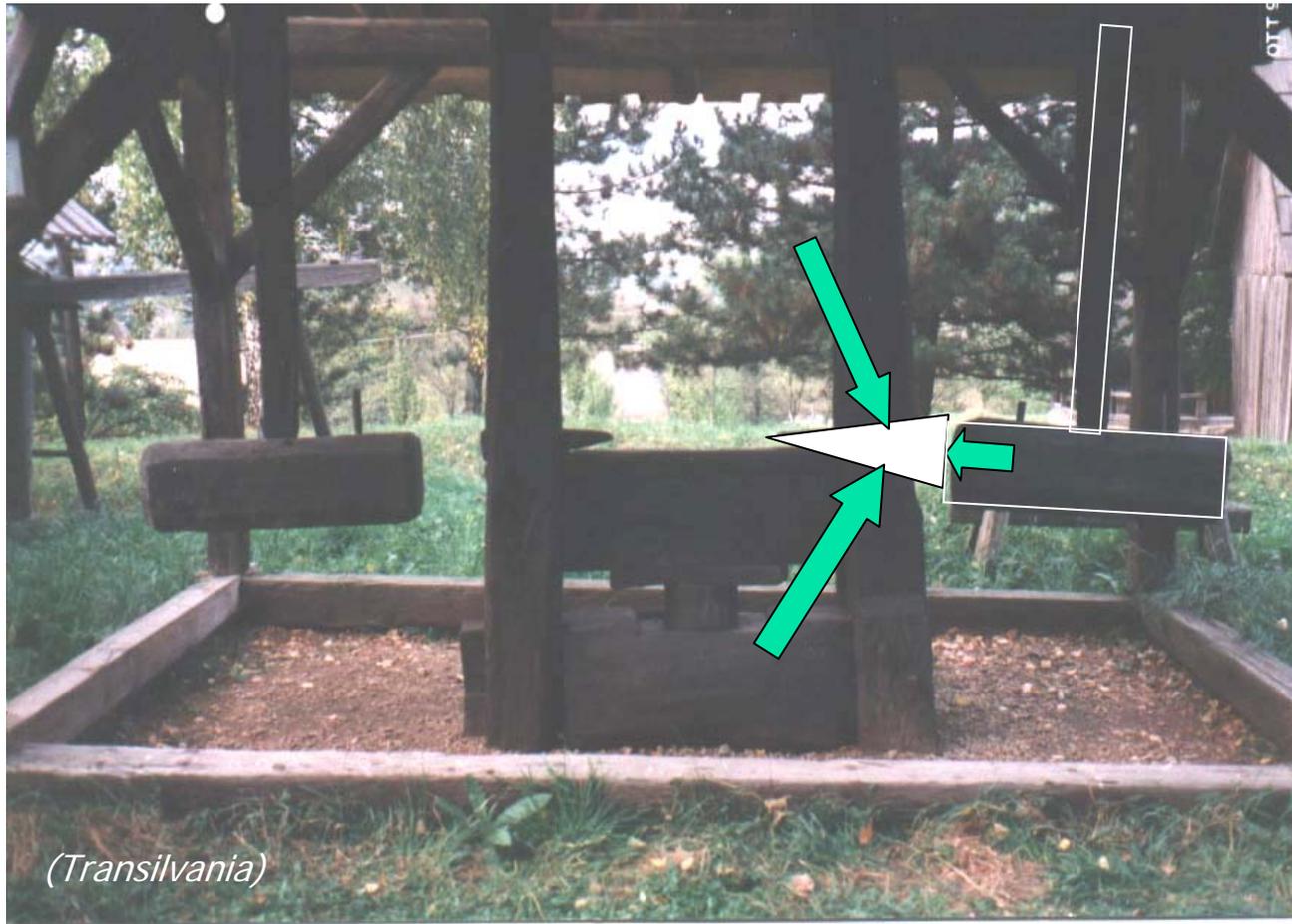
Amplificatori di forza nati in periodo ellenistico (e rimasti inalterati per migliaia d'anni)

- La macina (amplificatore di pressione)
- La taglia
- Il cuneo
- La coppia vite/madrevite
- La mazza e il pendolo
- L'ingranaggio
- Il cilindro ad aria compressa

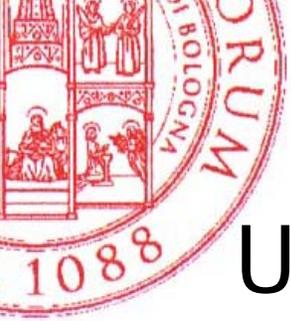




Esempio di applicazione combinata di principi di amplificazione delle forze: due masse accelerate (pendoli) colpiscono due cunei che serrano una traversa mobile contro una fissa.



(Transilvania)



Un accumulatore d'energia elastica

L'arco è stato uno dei primi strumenti tecnici sviluppati dall'uomo (vedi graffiti rupestri).

Da una prima struttura di legno ricurvo l'arco si è evoluto verso una forma molto più sofisticata tipica dell'arco asiatico o turco che ha caratteristiche molto superiori a quello classico.

Prima del 1910 il record di distanza con tiro dell'arco era di 340 m, ottenuto con un lungo arco che aveva richiesto una forza di 700 N.

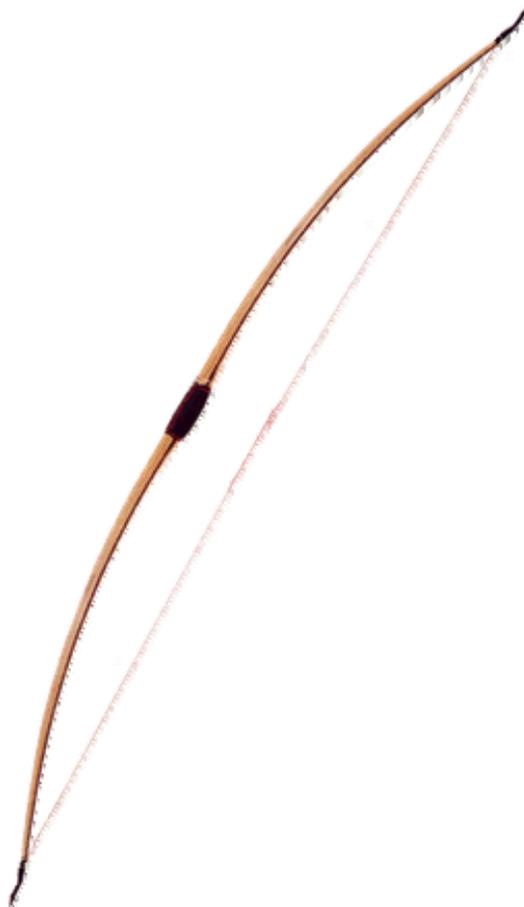
In una gara d'arco a Le Touquet nel 1910, un arciere di nome Ingo Simon usando un vecchio arco turco che richiese uno sforzo di soli 440 N, lanciò una freccia a 434 m.



Greci e persiani nella battaglia sul Granico (fine IV sec. A.C.)



Il "long bow" inglese

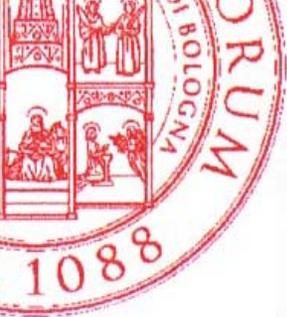


L'ARCO LUNGO

da: STORIA DEI POPOLI DI LINGUA INGLESE
vol. 1, Nascita dell'Inghilterra, di Winston S.
Churchill - A. Mondadori Editore - 1956 trovato
da: Francesco Tatullo, studente Collegio.

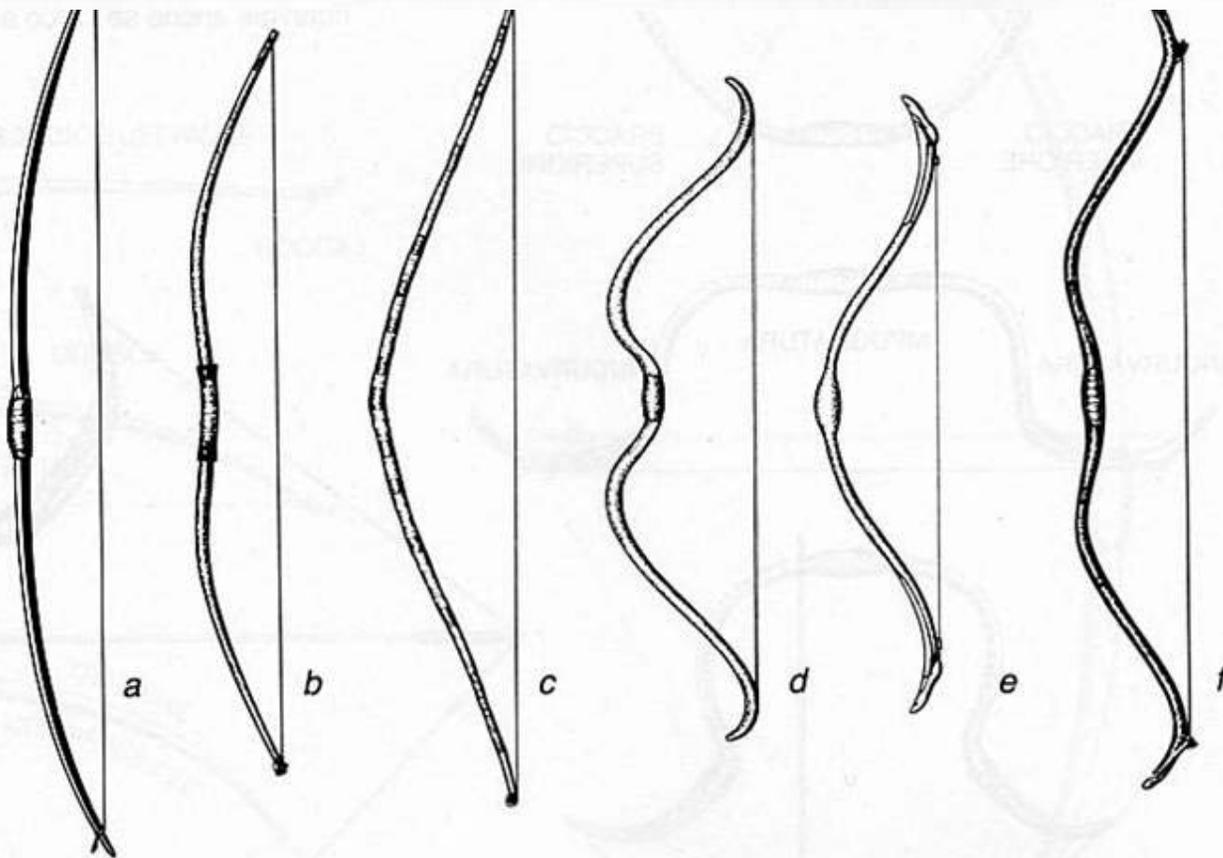
Il popolo inglese era venuto in possesso di un'arma poderosa, i cui vantaggi erano rimasti del tutto ignoti all'estero. L'arco lungo, maneggiato dalla esperta classe degli arcieri, portò in campo un tipo di soldato-yeoman, con cui non v'era nulla in Europa che potesse competere. L'esercito inglese poggiava ora in parti eguali sulla cavalleria corazzata e sugli arcieri.

Il potere dell'arco lungo e l'abilità degli arcieri erano arrivati ad un punto in cui nemmeno la migliore corazza rappresentava più una sicura protezione. L'arciere esperto era un soldato professionale, che riceveva e meritava un'alta paga, e andava in guerra spesso su un pony, ma sempre con un notevole trasporto per sua comodità ed una ricca dotazione di frecce. Una compagnia di arcieri in ordine aperto poteva lanciare una scarica di frecce così rapida, continua e penetrante, da render vano l'attacco della cavalleria, senza contare che, nelle schermaglie e nelle azioni di pattuglia, l'arciere esperto colpiva il bersaglio a distanze che fino allora, nella storia della guerra, non erano mai state ritenute pericolose. Di tutto ciò l'Europa continentale, e specialmente la Francia, cioè la nostra vicina più diretta, era all'oscuro. E' perciò con un senso di superiorità assoluta che, verso la metà del secolo XIV, gli inglesi guardavano all'Europa.



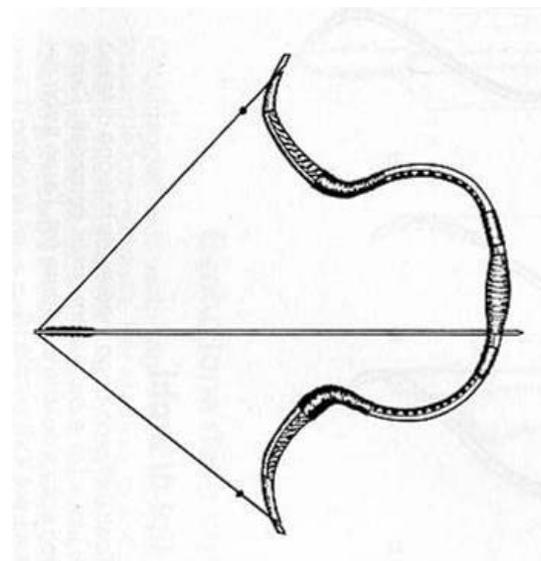
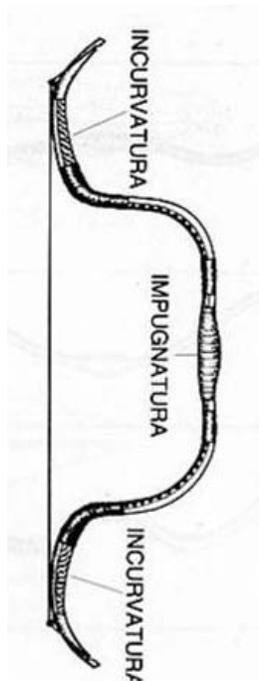
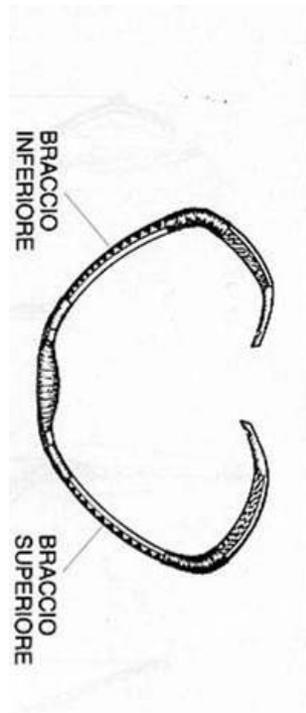
Alcuni tipi di archi

I tipi fondamentali di archi sono esemplificati dall'arco lungo medievale in legno di tasso (a), dall'arco rinforzato con tendine dei sioux (b) e da quattro archi composti: l'arco triangolare dell'Asia occidentale (c), l'arco scita a quattro curvatures (d), l'arco turco del XVII secolo (e) e l'arco dei tatarsi di Crimea del XVII secolo (f).





L'arco a quattro curvature

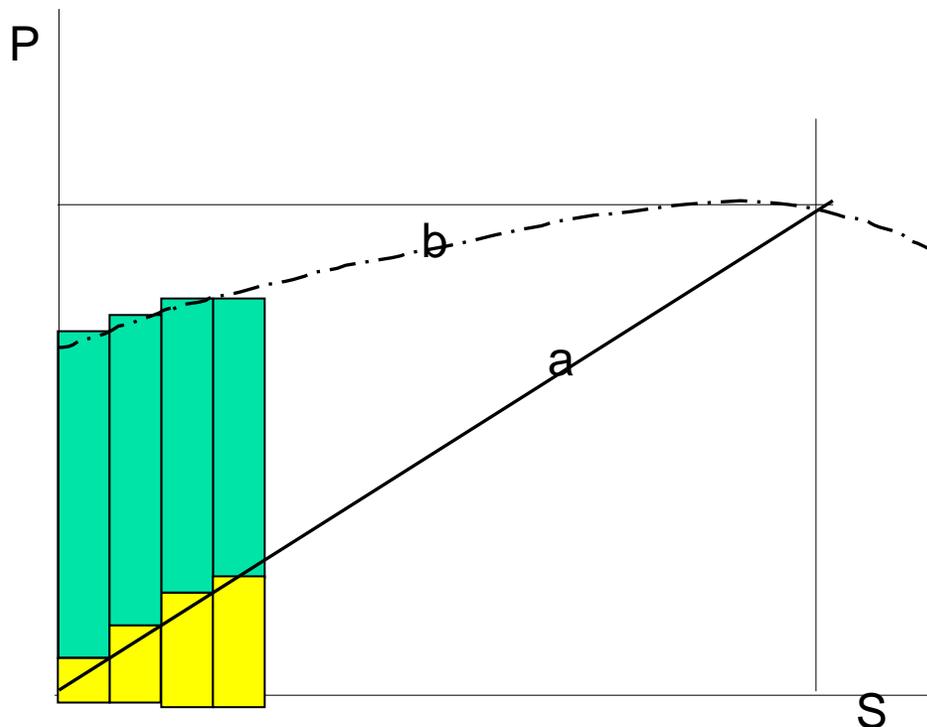


L'arma più importante degli eserciti di quel tempo era la cavalleria e l'arco. (*G. Ravegnani: I Bizantini e la guerra, Jouvence 2004*).

Procopio di Cesarea cita gli arcieri a cavallo come l'arma più sofisticata capaci di volteggiare con il cavallo scagliando frecce in ogni direzione.



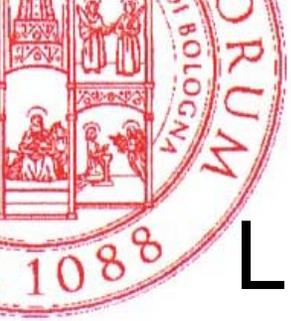
Accumulare energia flettendo un'asta



Il lavoro che fa una forza applicata ad una struttura in piccole deformazioni NON è:

$$P_{max} \times S_{max} \quad \text{ma} \\ 1/2 \times P_{max} \times S_{max}$$

Anche per grandi deformazioni l'area sottesa dalla curva rappresenta allora il lavoro compiuto dalla forza e l'energia immagazzinata. Nell'arco precaricato l'energia accumulata è rappresentata dall'area sotto la curva b.



L'arco in materiale composito

Apparso nell'Asia occidentale nel III millennio a.C., l'arco composto rispondeva alla necessità di essere utilizzato anche a cavallo.

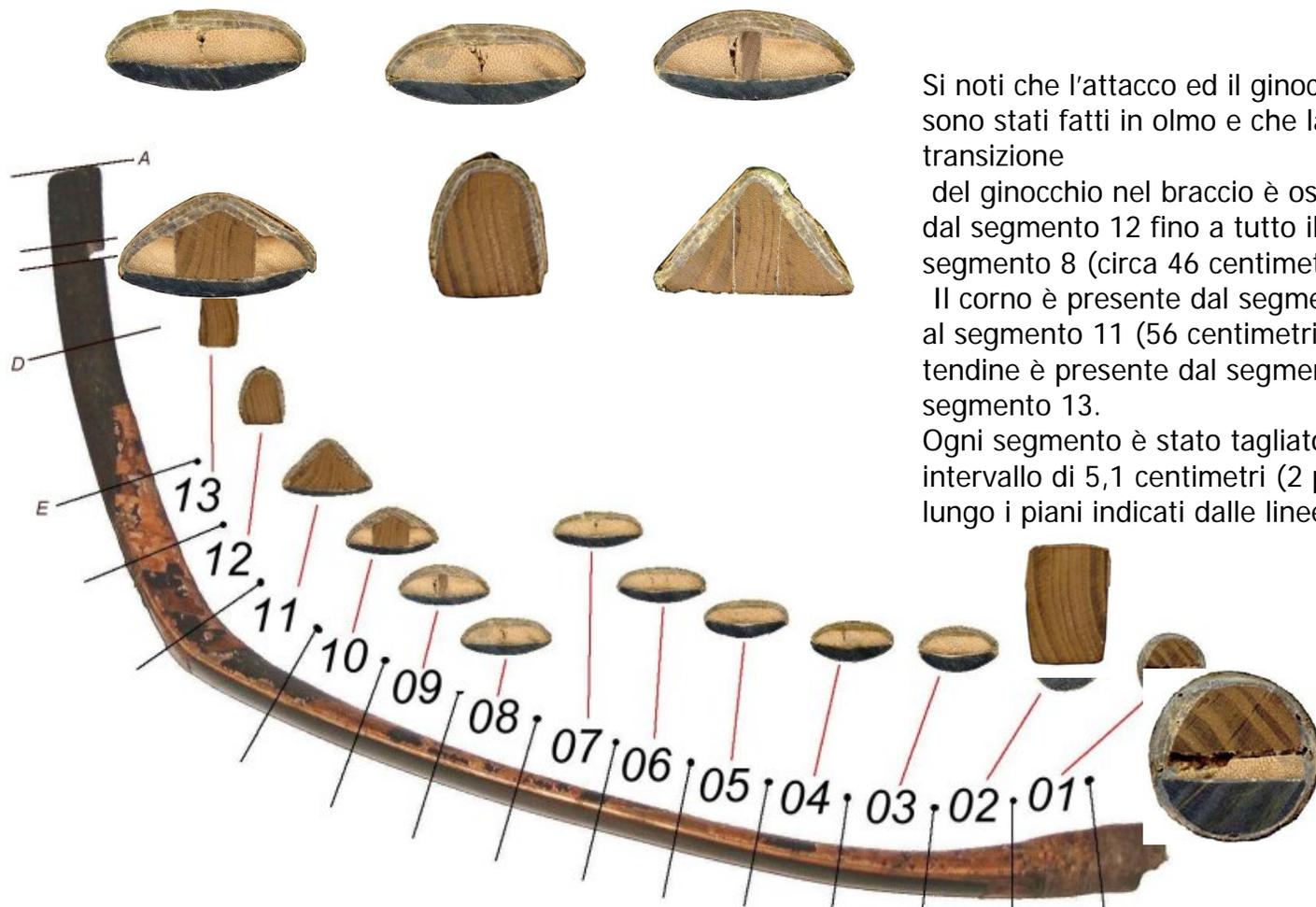
Era quindi necessario un arco corto.

La potenza di un arco semplice è però vincolata dalla lunghezza della corda.

Si rese così necessaria una nuova rivoluzionaria tecnologia: una struttura di forma complessa e a profilo variabile, realizzata con la combinazione di legno, corno e tendine utilizzati per sfruttarne al massimo le caratteristiche naturali.



A sezione (e momento di inerzia) variabile



Si noti che l'attacco ed il ginocchio sono stati fatti in olmo e che la transizione del ginocchio nel braccio è osservabile dal segmento 12 fino a tutto il segmento 8 (circa 46 centimetri). Il corno è presente dal segmento 01 al segmento 11 (56 centimetri). Il tendine è presente dal segmento 01 al segmento 13. Ogni segmento è stato tagliato ad un intervallo di 5,1 centimetri (2 pollici) lungo i piani indicati dalle linee nere.



Per incollare il tendine sul dorso dell'arco, in Asia si utilizzarono adesivi ricavati da pelli e dalla vescica natatoria dei pesci.

Uno dei principali vantaggi degli archi rinforzati con tendine consiste nella forma ripiegata in avanti ad arco scarico.

Arco pre-caricato. Questa proprietà fa sì che quando l'arco è incordato i bracci siano sottoposti a una tensione maggiore e immagazzinino più energia rispetto agli archi semplici.

Il tendine ha un'elevata resistenza alla trazione, valutabile in circa 70 MPa, contro i 120 del legno e i 7 della gomma ma una grande capacità di assorbire energia (2,8 J/mm³ contro 1 per l'acciaio da molle e 0,5 per il legno e 10,0 per la gomma). L'uso del tendine consente di costruire un arco più corto senza sacrificare l'estensione della corda.

I bracci corti comportano anche un trasferimento di energia più efficiente: i bracci lunghi e pesanti degli archi semplici di grande potenza consumavano molta energia per muoversi in avanti quando la corda veniva rilasciata e quindi il trasferimento di energia alla freccia era meno efficiente.



La fatica dei materiali

"L'arco dei forti si è spezzato" (*I Libro di Samuele 2,4*)

Certamente fu sperimentata anche nell'antichità la frattura del materiale dovuta a carichi ripetuti ma saranno necessari molti secoli per la concettualizzazione del fenomeno.

"un processo di modificazione della struttura del materiale, progressiva, localizzata e permanente che si sviluppa nel materiale soggetto a condizioni che producono tensioni e deformazioni **variabili** nel tempo, in zone localizzate di un componente e che può culminare in fessurazioni o nella completa frattura di esso, dopo un numero sufficiente di cicli".
(*normative ASTM*)



La fatica verrà scoperta 2000 anni dopo

(Nota: una controversia scientifica della fine del secolo XIX)

Le prime prove di resistenza dei metalli, e più modernamente le prime prove di fatica, furono tese a garantire la sicurezza di apparecchi sollevatori, Albert (1825) o di assali di carrozze ferroviarie, A. Wöhler (1819 - 1914), quest'ultime prove essendo state realizzate in Germania negli anni 1850 -1860. Come Direttore dal 1847, delle ferrovie a Francoforte sull'Oder, preoccupato delle rotture improvvise degli assali dei vagoni, egli progettò un sistema di misura per determinare il numero di volte, per unità di lunghezza del percorso, in corrispondenza al quale si raggiungeva il massimo sforzo di flessione, per effetto delle irregolarità del percorso.

Successivamente egli costruì una attrezzatura per riprodurre in laboratorio le condizioni che aveva osservato, (Macchina di Wöhler).

Egli è considerato giustamente il padre della "fatica dei materiali", termine introdotto una decina di anni prima delle sue esperienze,

Wöhler ricavò leggi empiriche che ancora oggi vengono impiegate, per descrivere la riduzione della resistenza dovuta all'applicazione di carichi con ampiezza variabile nel tempo, e con diversi valori della tensione media.

Vale la pena ricordare, a questo punto, l'analisi critica che fece di queste esperienze, Alberto Castigliano (1847-1884), insigne studioso di Teoria delle strutture, il quale, nel manuale pratico per gli ingegneri stampato in Italia, da lui diretto, ebbe a dire:



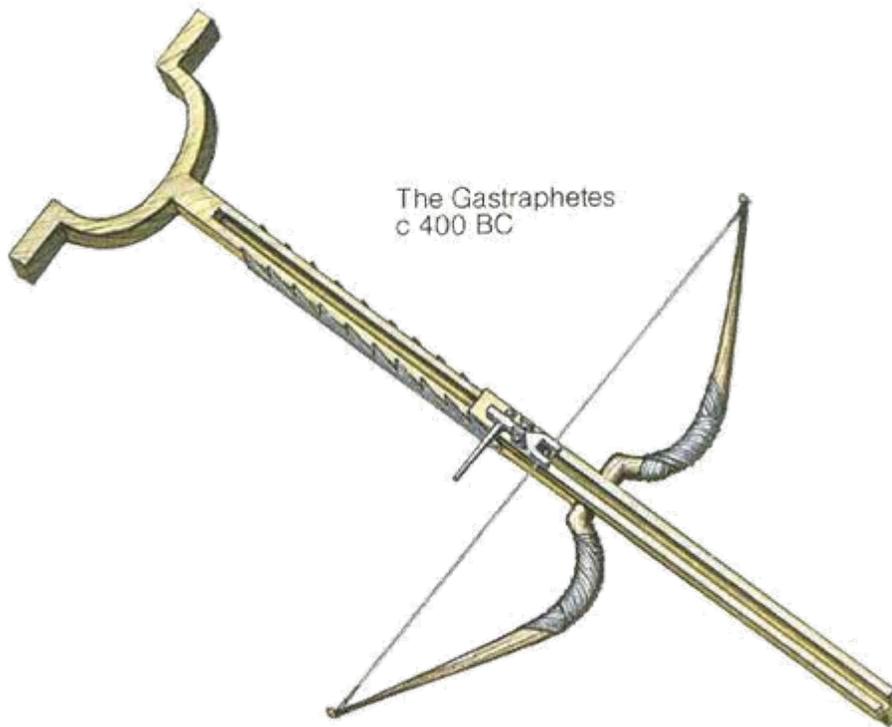
“Dalle esperienze di Wöhler, eseguite per molti anni consecutivi a Berlino, a partire da 1858, è risultato che se una sbarra di ferro viene sottoposta un numero grandissimo di volte ad un dato sforzo, essa si rompe sotto la sua azione, anche se esso sia notevolmente inferiore al carico di rottura, ossia a quel carico che crescendo a poco a poco sarebbe capace di rompere la sbarra.

Sui risultati delle esperienze di Wöhler alcuni autori tedeschi [...], ritenendo che si trattasse di una nuova legge fisica, hanno composto delle formole empiriche per rappresentarla [.....]. Non è ben certo però che i risultati delle esperienze di Wöhler e di Spangenberg abbiano il significato che si è voluto attribuir loro. Difatti il Prof. Clericetti in un suo recente studio [...], ritiene che gli sforzi, i quali venivano prodotti mediante una macchina a vapore, non crescessero lentamente in modo continuo da zero fino al valore finale, ma venissero applicati d'un tratto col valore che restava costante per tutta la durata della sua azione. Se cos'ì fosse la massima tensione [...] era notevolmente maggiore della forza effettivamente applicata [...] e sorpassava di molto il limite di elasticità.

Ora è noto, che quando questo limite viene oltrepassato si produce un notevole allungamento permanente, e si comprende in tal caso come la ripetizione dello sforzo, per un grandissimo numero di volte, possa produrre rottura. Ma siccome nella pratica le forze che si applicano ai corpi, non solo si tengono molto al di sotto del limite di elasticità, ma si applicano per gradi, [...] ne segue non essere esatta l'interpretazione data alle esperienze di Wöhler.” Tale concetto, che fa risalire la fatica ad un fenomeno di scorrimento plastico del materiale, anche se solo a livello microscopico, verrà messo in luce molti anni più tardi con l'impiego del microscopio elettronico e di molte esperienze condotte con speciali macchine di prova.



Il rischio dell'aumento della scala geometrica (dall'arco alla balestra)



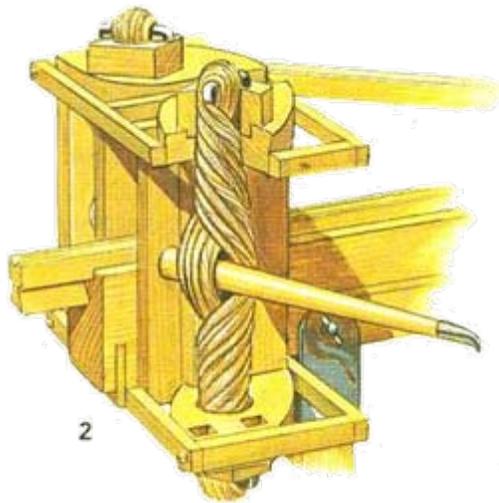
“La **ricerca tecnologica** divenne un preciso indirizzo della politica dei **diadochi**, cioè dei successori di Alessandro.

Come abbiamo visto le ricerche ingegneristiche finalizzate a migliorare il funzionamento dell'artiglieria, **si spinsero fino al calcolo delle giuste proporzioni del diametro del foro di scorrimento del proiettile.**”



Altre forme di accumulo di energia

Nelle grandi macchine è più efficiente accumulare energia per torsione elastica che per flessione



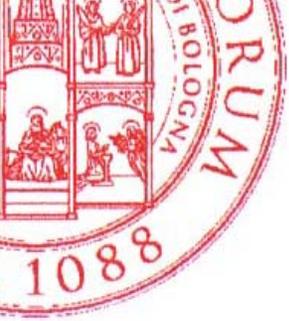
Nota: confronto con soluzioni moderne

Da Claudio Cadei Scienze antropologiche a.a. 2004/05

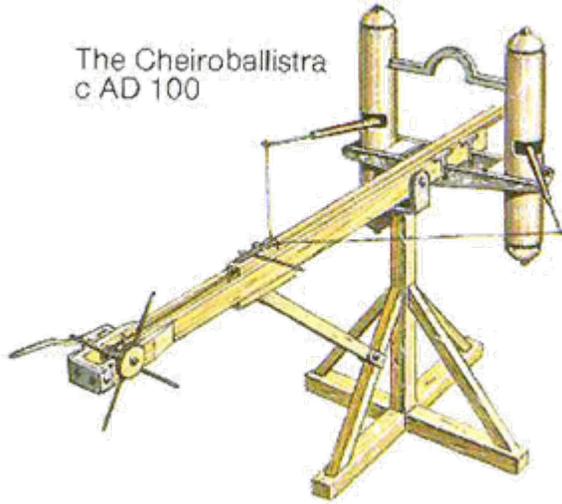
“A partire dall’innovazione del semplice arco, furono inventate macchine sempre più complesse ed efficaci, capaci di sfruttare forze non banali come quelle derivanti dalla torsione di un fascio di corde.

Geoffrey E. R. Lloyd, in La scienza dei Greci pag. 248, sostanzialmente simili ai modelli di ricostruzione riportati.” Di fatto, furono soprattutto **i grandi condottieri del IV e III sec. a.,C.**, intenzionati a mettere in atto grandi piani di conquista, ad utilizzare i ritrovati della meccanica per gli scopi bellici.

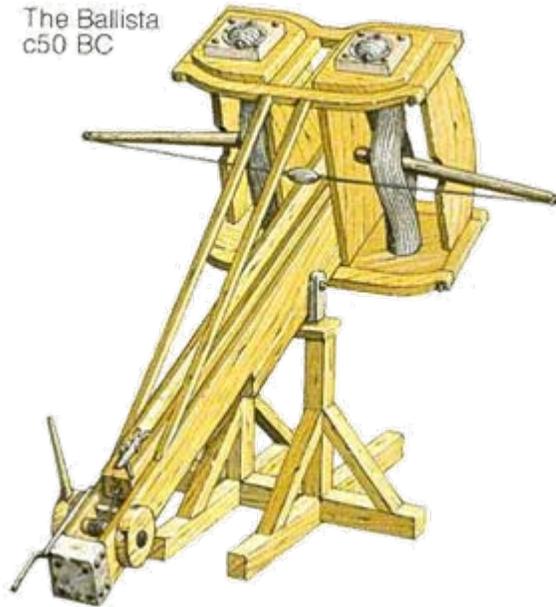
Sappiamo, ad esempio, che Alessandro Magno fece grande affidamento al suo architetto Dinocrate durante la sua spedizione in Asia, ricorrendo spesso al suo genio per l’invenzione di macchine da assedio, ponti, catapulte. “



The Cheiromballistra
c AD 100



The Ballista
c50 BC



Probabilmente sotto Filippo II di Macedonia (382-336 a.C.), gli archi lasciarono il posto alle vere e proprie *balliste*, cioè dispositivi in cui vengono caricati fasci di corda o di tendini per **torsione**. Possono essere lanciati proiettili più grandi, con effetti assai distruttivi.



Un'altra forma: accumulare energia potenziale

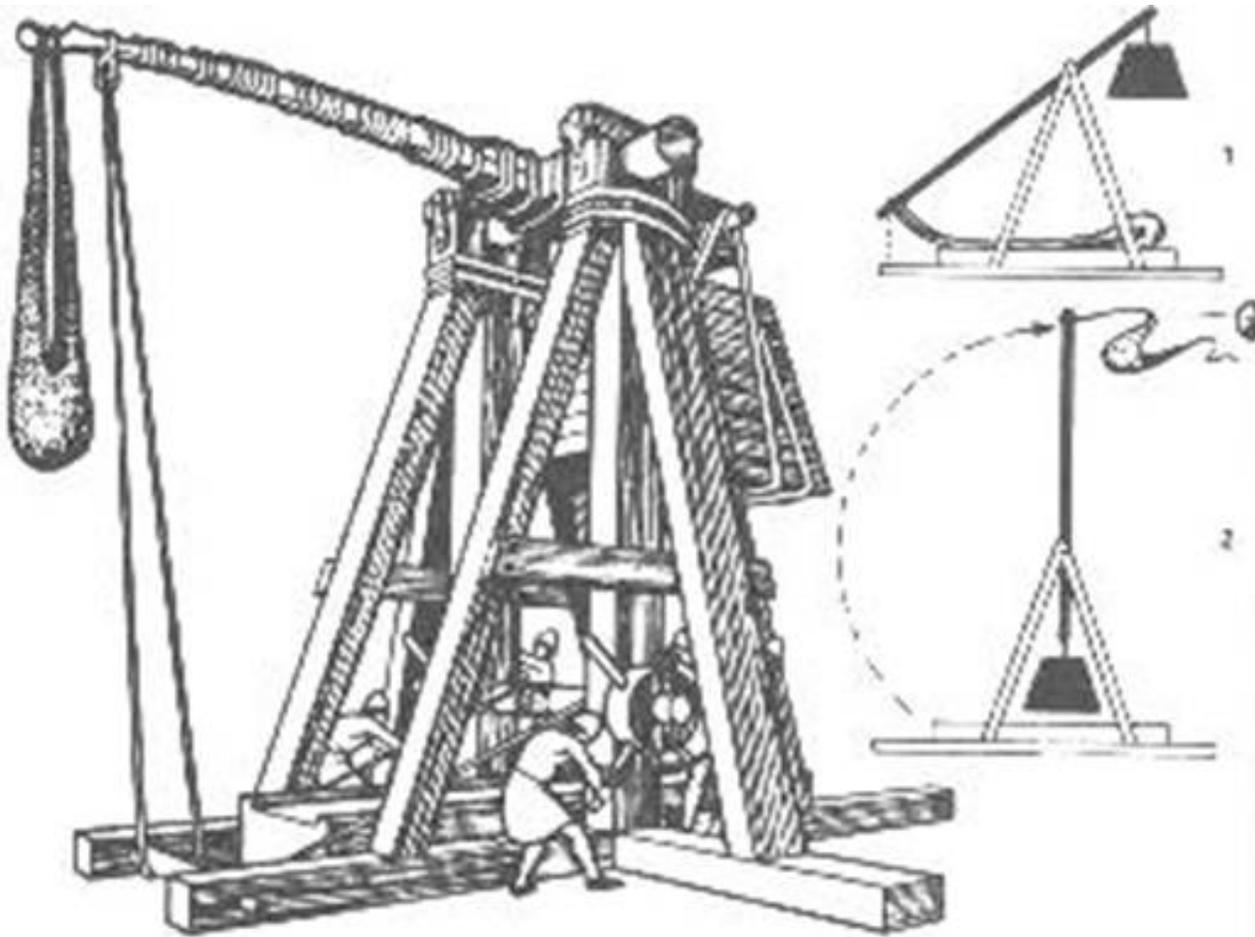


“La **fabbricazione di catapulte**, detta *belopoiétique techné*, necessita di un ingegnosa combinazione di geometria, fisica e tecnologia. Prima delle armi da fuoco, erano il terrore di ogni città, per la loro versatile potenza negli assedi; tuttavia furono utilizzate anche in battaglie campali.

L'origine delle catapulte è ignota, ma compaiono già in un rilievo del IX sec. a.C. a Nimrud, nel Vicino Oriente. In Grecia fanno la loro comparsa sottoforma di archi rinforzati, con cui i proiettili, frecce o pietre sagomate in foggia aerodinamica, sono lanciati a grande distanza.”

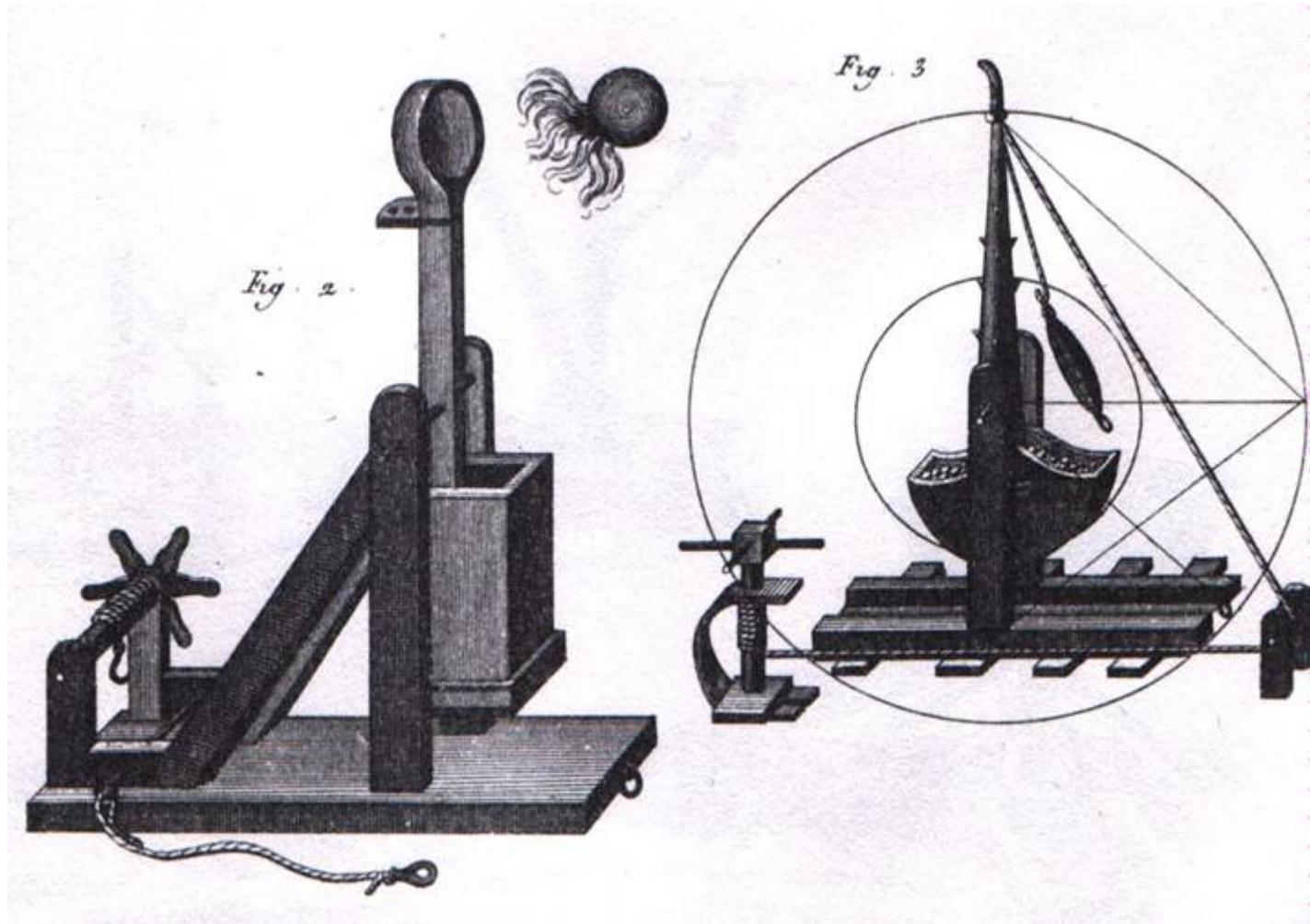
La catapulta fu perfezionata da Archimede e utilizzata per secoli fino all'impiego della polvere da sparo. La forza della catapulta era fornita dalle corde ritorte e dalla gravità. Prima si rilasciavano un po' per porre il "braccio" della catapulta in posizione orizzontale. Una volta caricato il cucchiaio, si tendevano le corde e si sparava.

Il "braccio" scattava in posizione verticale e il proiettile veniva lanciato.





Come è descritta nell'Encyclopédie





Altre fonti di energia utilizzate in periodo ellenistico (e anche prima)

(Alessandro Piazza, Ingegneria Energetica a. a. 2004-05):

Malgrado gli enormi progressi raggiunti dall'uomo in altri campi, il lavoro manuale fino alla fine dell'Evo Antico veniva svolto quasi interamente dalla forza lavoro o da animali. Questo perché non erano ancora state inventate macchine che fossero in grado di sfruttare le fonti naturali di energia per produrre lavoro. Ad esempio, la macinazione dei cereali nei mulini avveniva con l'ausilio di buoi.



Esempio di aratro dell'età del ferro.



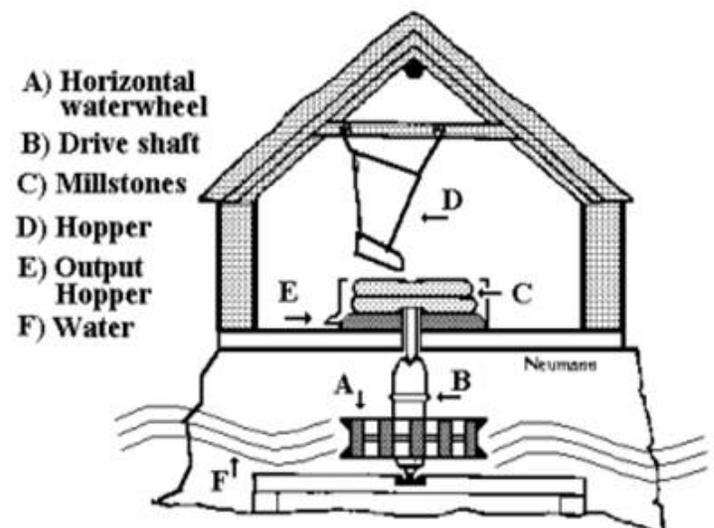
Antica pietra da macina rinvenuta in Scozia.



I primi modelli di macine con ruote ad acqua appaiono però in Egitto già attorno al 200 a.C. Erano tuttavia macchine con un rendimento piuttosto basso. La struttura di queste primitive macchine è visibile in figura.

Non si trattava di meccanismi particolarmente raffinati, poiché trasferivano pochissima potenza dalla pala alla macina. Inoltre, poiché la pala funzionava solo se immersa in acqua, erano praticamente impossibili da utilizzare in condizioni di secca del fiume.

Figure 3



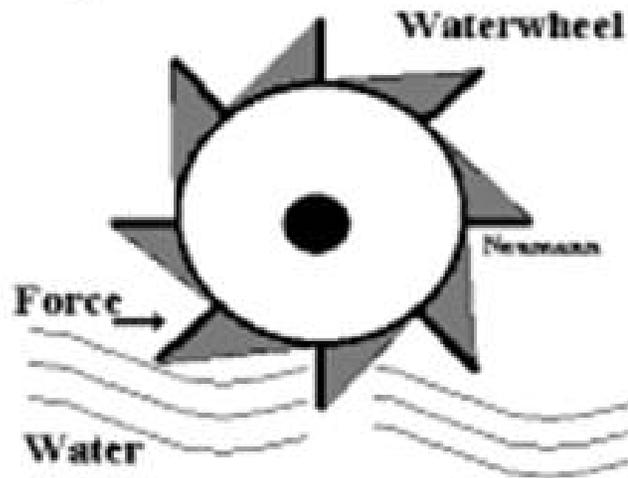
Horizontal Water-powered Gristmill

Macchina per la macinazione con ruota ad acqua orizzontale.



Nel primo secolo d.C., (ma forse anche prima) ormai tutti i meccanismi a ruote orizzontali erano stati sostituiti da meccanismi a ruote verticali, decisamente più efficienti. I modelli in circolazione erano principalmente due.

Figure 4



Undershot Waterwheel

Schema di funzionamento della undershot waterwheel.

Nella *undershot waterwheel*, la potenza veniva assorbita attraverso pale poste a diretto contatto con il corso d'acqua, e poi trasmessa alle macine attraverso ingranaggi. Ancora una volta, questo modello presenta degli svantaggi in periodi di secca o comunque dove non sia possibile assicurare un rifornimento costante d'acqua. Vediamo anche uno schema degli ingranaggi di funzionamento.

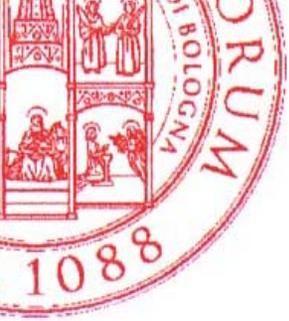
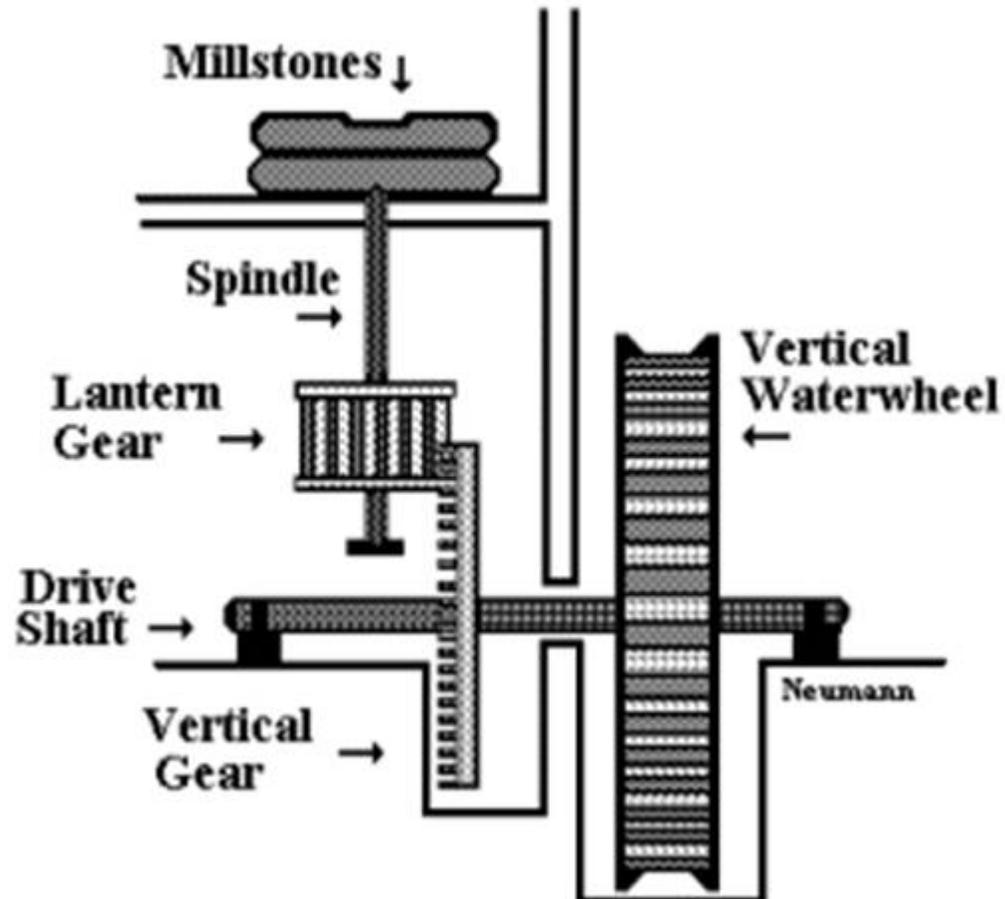


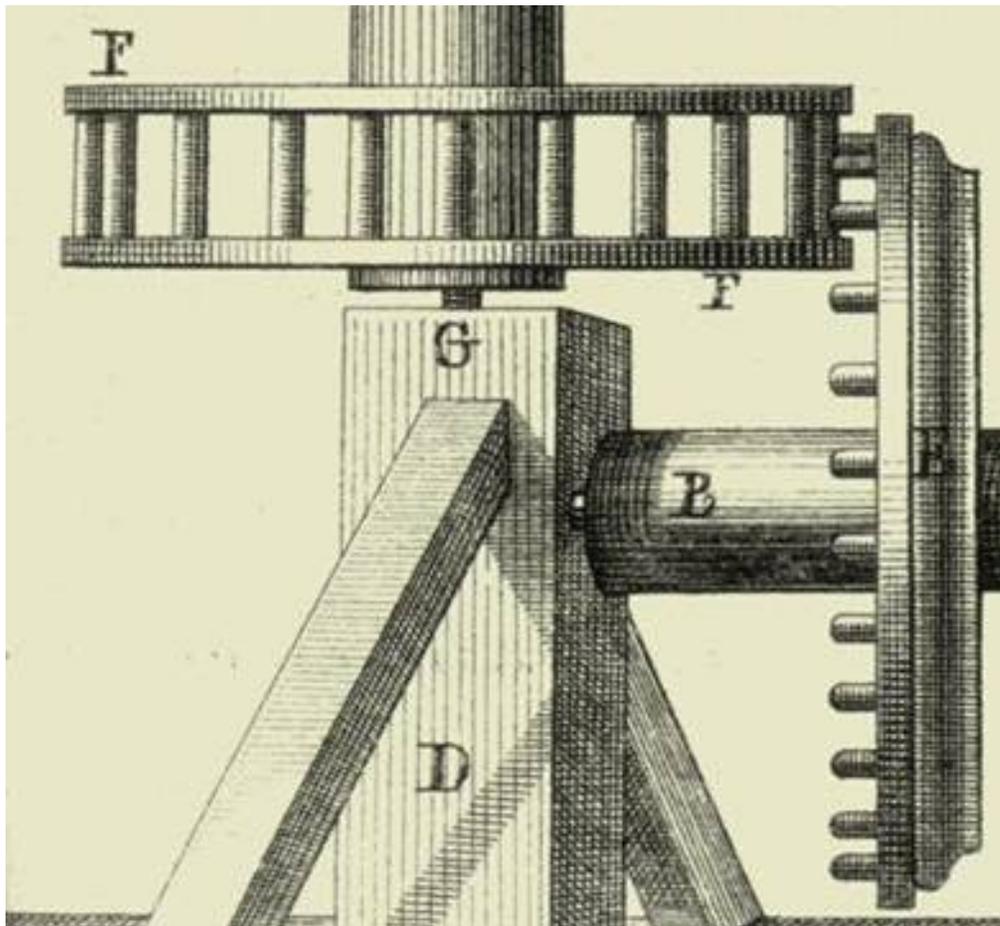
Figure 6

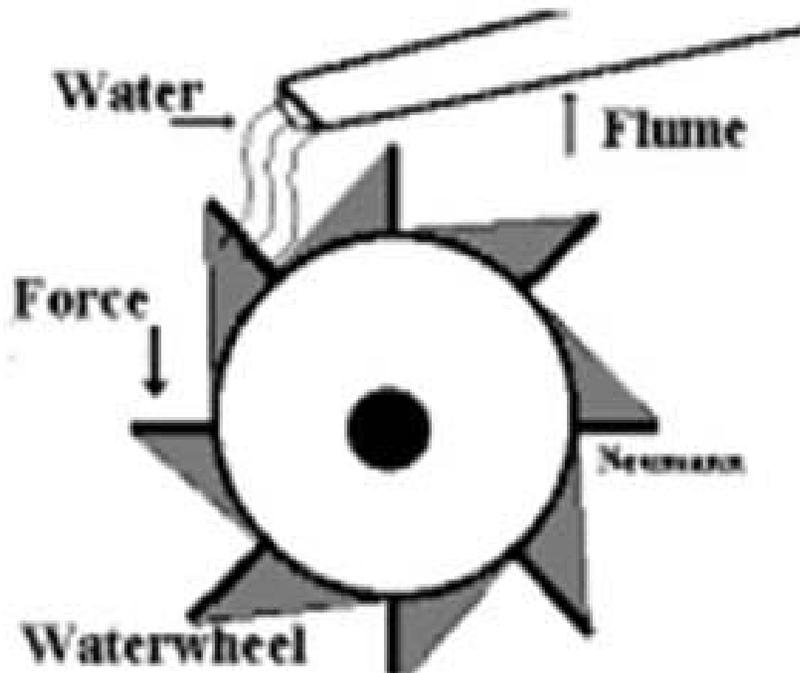


WATER-POWERED GRISTMILL



Un esempio di costruzione





Overshot Waterwheel

*Schema di funzionamento
della overshot waterwheel.*

Il modello di ruota a disposizione verticale nota come *overshot waterwheel* era invece caratterizzato dalla caduta dall'alto dell'acqua corrente che si distribuiva poi sulle pale. Il peso dell'acqua, che si scaricava poi nel punto più basso della ruota, metteva in moto la ruota stessa. Questo tipo di meccanismo aveva indubbiamente un rendimento più elevato del precedente, ed era meno influenzabile da fattori quali la portata d'acqua.



Vitruvio : *(I secolo d.C)* :

“Artista è per i Greci colui
che applica appieno le
leggi stabilite e
concordate;
all’artista è lasciato il
modo di applicazione
delle leggi, il maggiore o
minore possesso della
technè.”

Egiziani e Babilonesi
conoscevano la geometria
e l’astronomia ma non
strutturarono le
conoscenze in una teoria
e in una filosofia.

Non basta
l’osservazione: i Greci
ricavano Regole



Il tardo ellenismo (periodo imperiale)

“La selezione naturale” sui testi operata durante i secoli dai latini e successivamente dai Bizantini e dagli Arabi, ha privilegiato le opere greche di autori di questa era tardo ellenistica, metodologicamente inferiori e più elementari.

Si ricordano gli scienziati:

- **Erone di Alessandria (I sec. d.C.):**
viti, cremagliere ingranaggi, catene di trasmissione, eliche, cilindri e pistoni, valvole, impiego di fonti energetiche, ottica.
- **Tolomeo (II sec d.C.),** ottica, astronomia
- **Pappo d’Alessandria (IV Secolo d. C.)** Collezione matematica e redazione degli Elementi di Euclide.



Il ruolo sociale dei meccanici

Pappo di Alessandria distingue cinque classi di attività nel campo della meccanica, i cui conoscitori ricevevano **la comune denominazione di *mekanikòì***.

(Pappo, *Collezione Matematica*, VIII, 1-2):

1. I **costruttori di pulegge**, grazie alla cui opera venivano sollevati pesi ingenti con minimo sforzo.
2. I **costruttori di macchine belliche**, dei cui ritrovati ci siamo già occupati.
3. I **costruttori di macchine di utilità pubblica**, soprattutto riguardanti la gestione dell'acqua. I Greci conoscevano l'uso delle pompe per l'aspirazione dell'acqua (il congegno divenuto famoso come vite d'Archimede), oltre ad importanti elementi teorici per la sua diffusione (basti ricordare i vasi *comunicanti*).



4. I **costruttori di macchine inutili, ma sorprendenti**, che riproducevano i movimenti degli esseri umani o di elementi naturali. Ctesibio, Filone di Bisanzio, Erone sono ingegneri ricordati per le loro creazioni, teatrini meccanici, orologi, organi idraulici, congegni pneumatici mossi dal vapore o dalla pressione dell'acqua, clessidre, pompe, ruote a vento che non migliorarono sensibilmente la vita quotidiana quanto piuttosto furono destinati al divertimento. Esse erano tutte applicazioni delle cinque macchine semplici allora conosciute (argano, leva, cuneo, vite, carrucola) o sfruttavano principi di pneumatica e di galleggiamento dei corpi.
5. I **costruttori di sfere**, come modelli per lo studio degli astri, secondo l'antica concezione del cosmo aristotelica. L'astronomia a lungo si servì di raffinati congegni che dovevano riprodurre il cosmo, oggetti in bilico fra l'utilità ed il puro prestigio."

**Da Claudio Cadei Scienze antropologiche a.a. 2004/05*



A Roma la scienza non gode di grande stima *(Alessandro Mercè a.a. 2004-2005)*

- Il sistema economico-sociale, basato sullo sfruttamento della **schiavitù**, non sente l'innovazione tecnologica come una necessità, ma come una minaccia
- Le concezioni cicliche del tempo, basate sull'idea di periodiche conflagrazioni e palingenesi contraddicono **l'idea di progresso** (Seneca, *Naturales Quaestiones*, ma già in Lucrezio e Cicerone)
- Il "civis romanus" deve dedicarsi innanzitutto alla **politica** (Cicerone) e, se impossibilitato a farlo, può dedicarsi tutt'al più allo studio della filosofia o alla storiografia (Sallustio, *De Coniuratione Catilinae*, 1-4 e lo stesso Cicerone)



Nonostante il pregiudizio antiscientifico, le opere tecniche romane sono notevoli

(Alessandro Mercè a.a. 2004-2005)

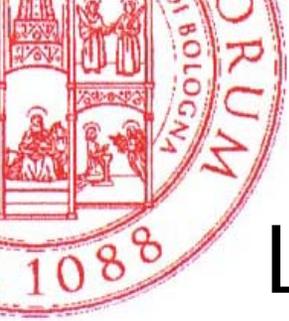
Sesto Giulio Frontino:
"De aquis urbis Romae"
(98 d.C.)

Testi di carattere tecnico-scientifico sono anche le "Naturales Quaestiones" di Seneca e la "Naturalis Historia" di Plinio il Vecchio, ma le opere rientrano più nel campo della filosofia naturale, che in quello dell'ingegneria.

Funzionario imperiale, inizia la sua carriera sotto i Flavi come pretore (70), console e legato in Britannia (76-78), per concluderla sotto il principato di Traiano. È anch'egli scrittore esclusivamente tecnico: compone anche un trattato De re militari, perduto, e quattro libri di Strategemata, sempre di argomento militare.

Il libro è una miniera di informazioni sugli acquedotti di Roma e sulle tecnologie usate per costruirli, sulle strutture e perfino sulla legislazione vigente in materia.

Nonostante il tono basso e l'argomento tecnico, l'autore rivendica il ruolo svolto dagli acquedotti nella civiltà romana, contrapponendoli all'oziosa inutilità delle tanto celebrate piramidi, mostrando così di avere chiara coscienza del ruolo che l'ingegneria riveste nella costituzione di una civiltà.



Le macchine per il sollevamento

Secondo testimonianze del mondo romano, pulegge e argani venivano anche utilizzati nelle ritualità religiose.

Osserviamo la stele funeraria degli *Haterii*, una famiglia che a Roma svolgeva la professione di organizzare celebrazioni.

(Esempio di arte romana).

(F. Wickhoff: *Arte romana Le Tre Venezie*, 1985, 1912, 1947)

Da Claudio Cadei Scienze antropologiche a.a. 2004/05

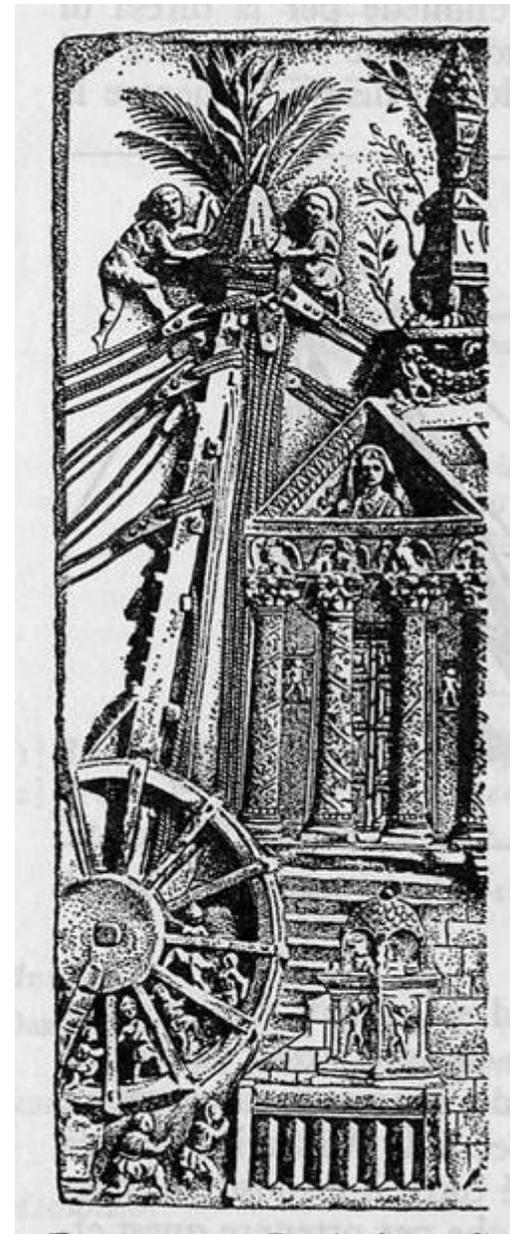
Gli ambiti a cui i Greci destinarono l'uso delle loro competenze tecniche sono innanzitutto tre:

- Cerimonie civili e religiose
- Macchine da guerra
- Architettura



Gru calcatoria

FIGURA 603—Particolare di un bassorilievo da un monumento sepolcrale romano del 100 d.C. circa. Cinque “uomini volanti” sono visibili all’interno di un’enorme ruota adibita alla costruzione del monumento. Sono chiaramente visibili la puleggia composta e i tiranti per spostare l’albero.



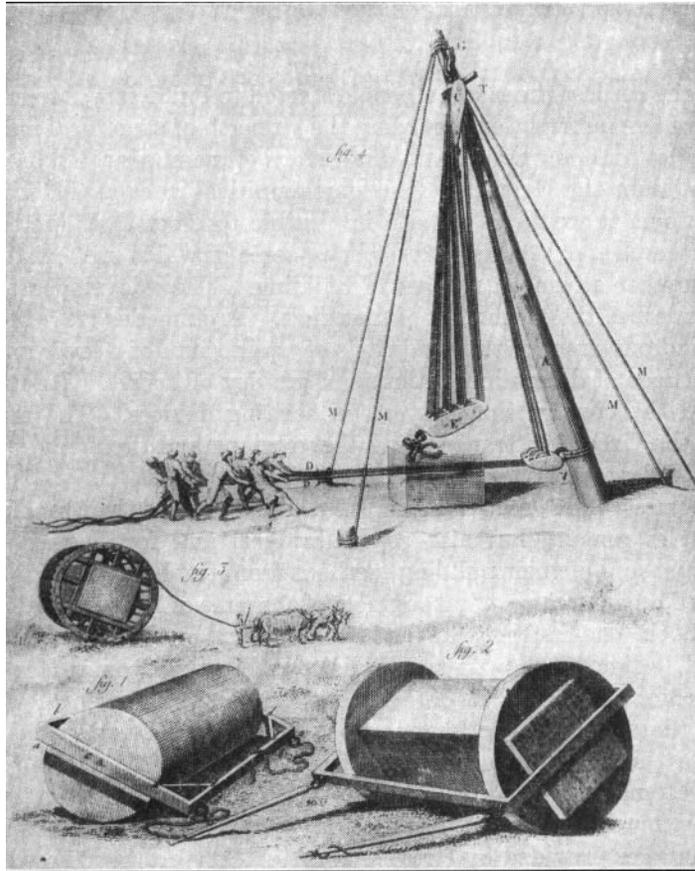


Una ricostruzione di gru calcatoria





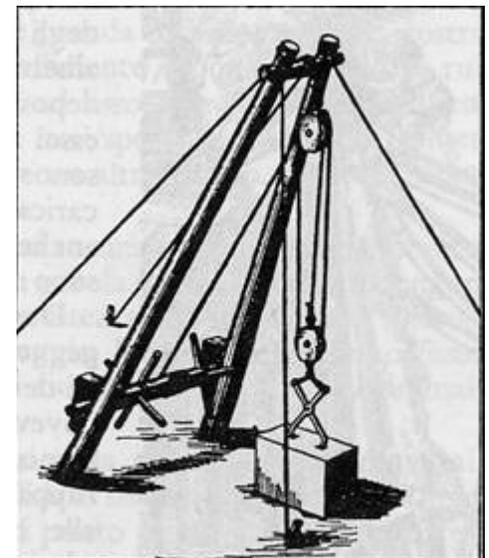
Soluzioni suggerite in Vitruvio

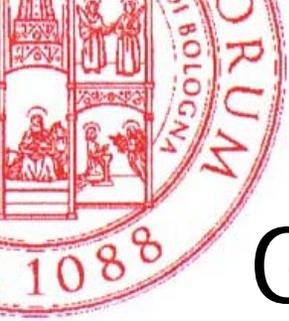


Dobbiamo a Vitruvio le prime testimonianze scritte dei metodi costruttivi.
Per l'errore di Paconio, vedi figura mediana sul trasporto delle travature senza perni laterali.



Aureliano 275 d.C. come costruttore delle mura di Roma (Museo Nazionale Romano)





Golfari

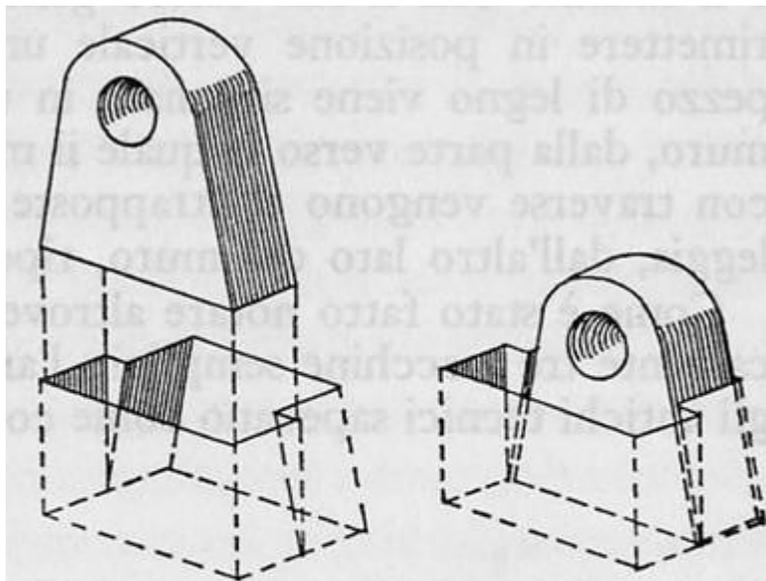


FIGURA 604—Anello di Erone per sollevare un blocco di pietra. Collocato l'anello nella propria sede, veniva fissato in essa mediante un blocco di legno sistemato nella "sede di servizio".

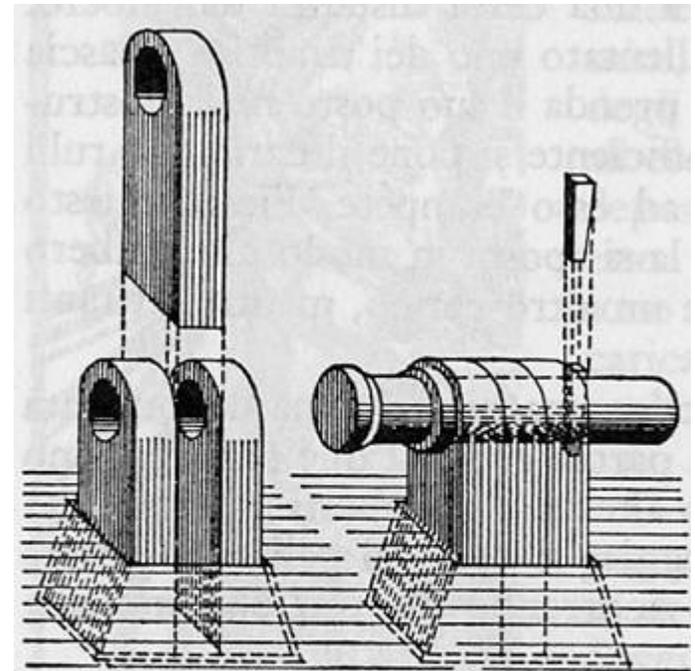
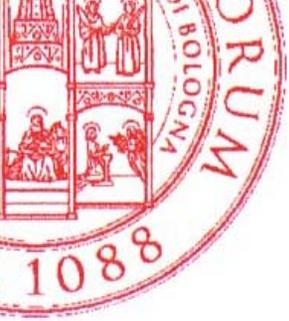


FIGURA 605—Anello di Erone a tre piastre. Quando la piastra centrale è forzata fra le due laterali, il tutto è un insieme solidale nella propria sede. La sbarra cilindrica trasversale serve per il sollevamento.



Esempi di soluzioni tecniche: fori di centramento e di riferimento dei perni e piani di accoppiamento nei tronchi di colonna.

(Efeso, foto dell'autore).





Nonostante la scarsità di fonti letterarie, a testimoniare la grande fioritura dell'ingegneria romana restano tuttavia numerose testimonianze concrete:

- Ponti
 - Acquedotti
 - Terme
 - Templi
 - Strade
 - Armi e macchine belliche
- *(Alessandro Mercè a.a. 2004-2005)*



All' interno ...



le pareti della cella sono ripartite in due ordini corinzi: uno inferiore ed uno superiore, il cosiddetto **attico**, coronato dall'intradosso della cupola.

alla base del muro interno, troviamo l'andito d'ingresso ed un'abside emisferica (*asse nord – sud*); due nicchie (*asse est – ovest*); altre quattro nicchie angolari sugli assi diagonali.

la cupola è decorata a cassettoni e culmina in un **oculus** di m 8,92 di diametro



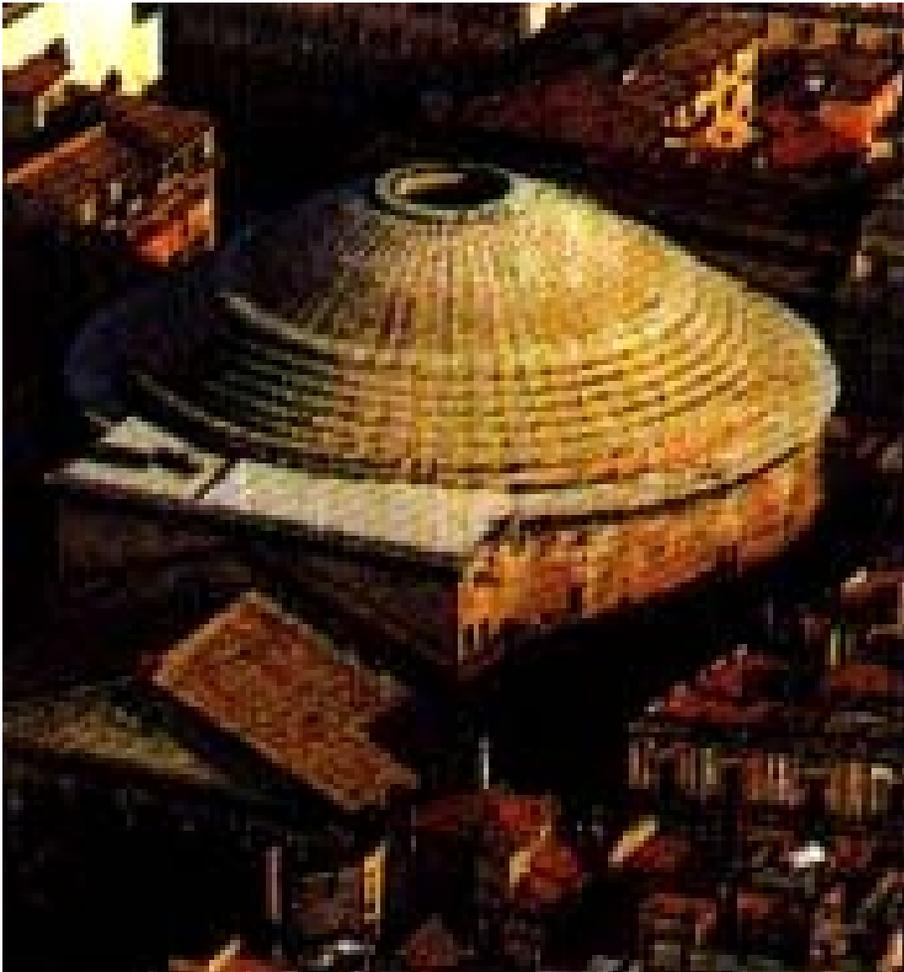
La cupola in calcestruzzo: (d=43,20 m)



La cupola è insieme un muro sporgente
e una calotta poggiata su un piano d'imposta



La vista esterna



La spinta sull'imposta è contenuta da una parete circolare di 7 m di spessore (in mattoni, rigorosamente standardizzati nelle tre misure), che si va rastremando fino a 60 cm nella parte più alta.

Tuttavia la spinta delle cupole ha generato nei secoli diverse fessure nei piani meridionali al di sotto del parallelo neutro.



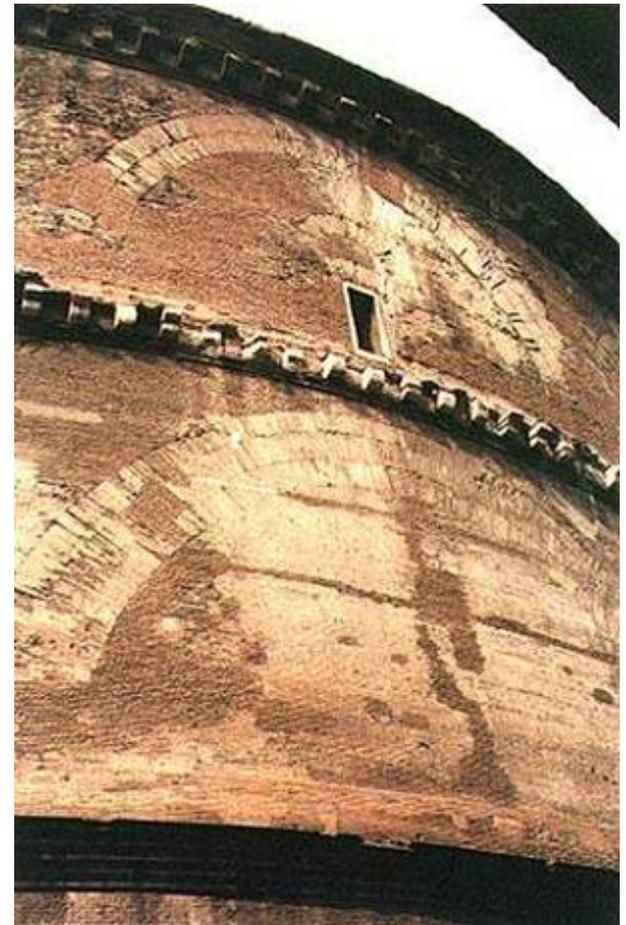
... ed all' esterno:

Il muro della rotonda si compone di tre **anelli**, evidenziati da altrettante **cornici**.

anello



cornice





Un'altra applicazione del calcestruzzo: cupola ottagonale della Domus Aurea (diametro di 10 m)





L'impero bizantino

E' semplicistico pensare che nell'alto Medioevo sia stato reciso ogni ramo del sapere ellenistico.

L'Impero bizantino ha traghettato all'occidente contenuti del sapere antico come di quello ellenistico, con alcune innovazioni derivate dal contatto con altre culture.



Le opere storiche del periodo bizantino riferiscono sulle tecniche e sulle strutture di periodo ellenistico o contemporanee:

- *Filone di Bisanzio: " Sulla costruzione dell'artiglieria"*
- *Procopio di Cesarea: De Aedificiis*
- *Pappo di Alessandria, Collezione Matematica, VIII, 1-2.*
- *Antemio di Tralle (VI sec.)*

L'opera di Archimede (e quella di Euclide) era nota alle scuole matematiche dell'Impero di Oriente.
(vedi contributo di Antemio)

Sembra che gli scritti di Archimede, tra i quali quelli relativi alla quadratura della parabola, siano giunti a noi **in una sola copia** attraverso un Codice preparato a Bisanzio nel IX secolo per iniziativa di Leone il matematico (Leone VI il saggio?)



I costruttori

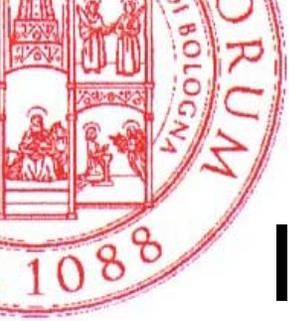
I costruttori del periodo bizantino appartenevano a due tipologie: il *mechanikos* (*mechanicus*) che era il più importante, e l'*architekton*.

(Cyril Mango: *Architettura bizantina*, pag. 14)

Il termine *mechanikos* è spesso tradotto come ingegnere ma non è esatto: si dovrebbe parlare di architetto con una solida conoscenza della matematica. La posizione sociale del *mechanikos* era elevata: I costruttori di Santa Sofia, Antemio di Tralle e Isidoro di Mileto, erano entrambi *mechanikoi* e Antemio un matematico ragguardevole.”)

Si ricorda anche il *mechanikos* Crise di Alessandria, Giovanni di Costantinopoli e il giovane Isidoro, nipote del primo.

I *mechanikoi* erano rari mentre gli *architektones* avevano una posizione sociale molto inferiore, equivalente a insegnanti di matematica elementare e di stenografia, con compensi pari alla metà degli insegnanti di letteratura. Col tempo gli *architektones* scendono al livello dei capomastri.



I “Mekanikoi” di Giustiniano

La costruzione di grandi strutture ha certamente richiesto lo sviluppo di disegni e di sperimentazione su modelli.
Si hanno indizi.

Probabilmente i primi studi metodici sulle strutture e i primi esempi di modelli vanno fatti risalire al periodo della istituzione della Biblioteca di Alessandria (323 a.C.), forse il primo esempio di Università, dopo l'esempio dell'Accademia di Platone in Atene (387 a.C.) e al Liceo di Aristotele, dedicati alla “sophia” ma probabilmente non alle arti pratiche del costruire.



Santa Sofia

Questa struttura è l'estremo evolutivo più interessante di un nuovo paradigma costruttivo che sintetizza la scienza greca, la tecnica romana e l'esperienza edificatoria e decorativa orientale.

Non abbiamo tracce di disegni tecnici antichi, ma si conoscono i nomi dei **mekanikoi** che hanno edificato manufatti straordinari.

Nel VI secolo d. C. si conoscono i progettisti di Santa Sofia a Costantinopoli **Isidoro di Mileto - mechanikos**, e **Antemio di Tralle - matematico**, probabilmente accademici, il primo **professore di geometria e meccanica**, che scrisse un commentario su un'opera perduta sulle volte di Erone alessandrino e il secondo un **matematico e meccanico**.

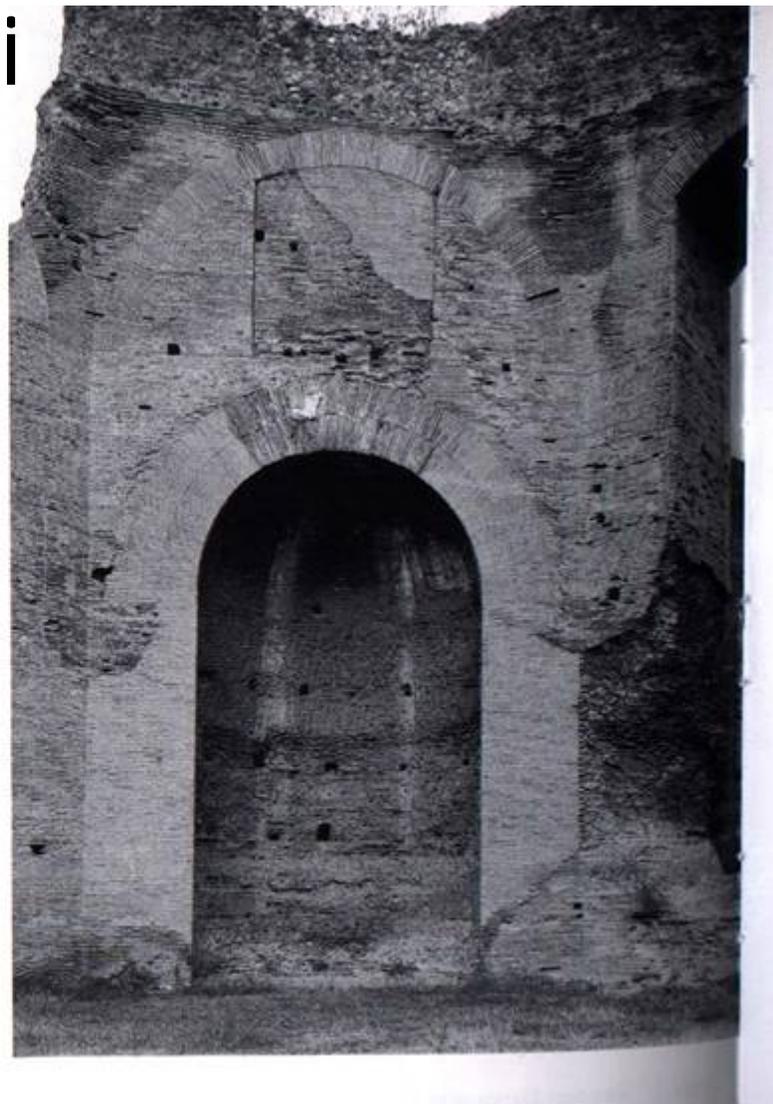


I precedenti storici



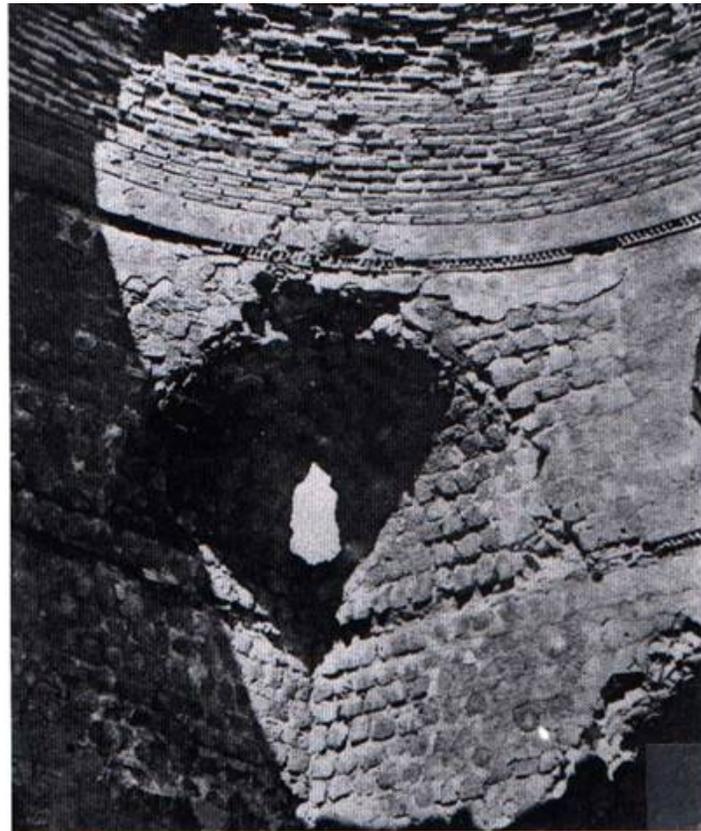
185 Small domes set over square rooms, Haran

186 Approximation to a pendentive, Baths of Caracalla, Rome

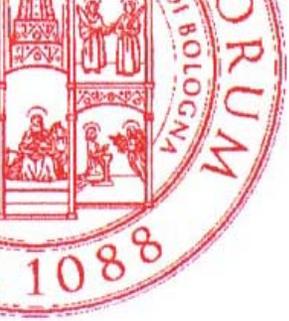




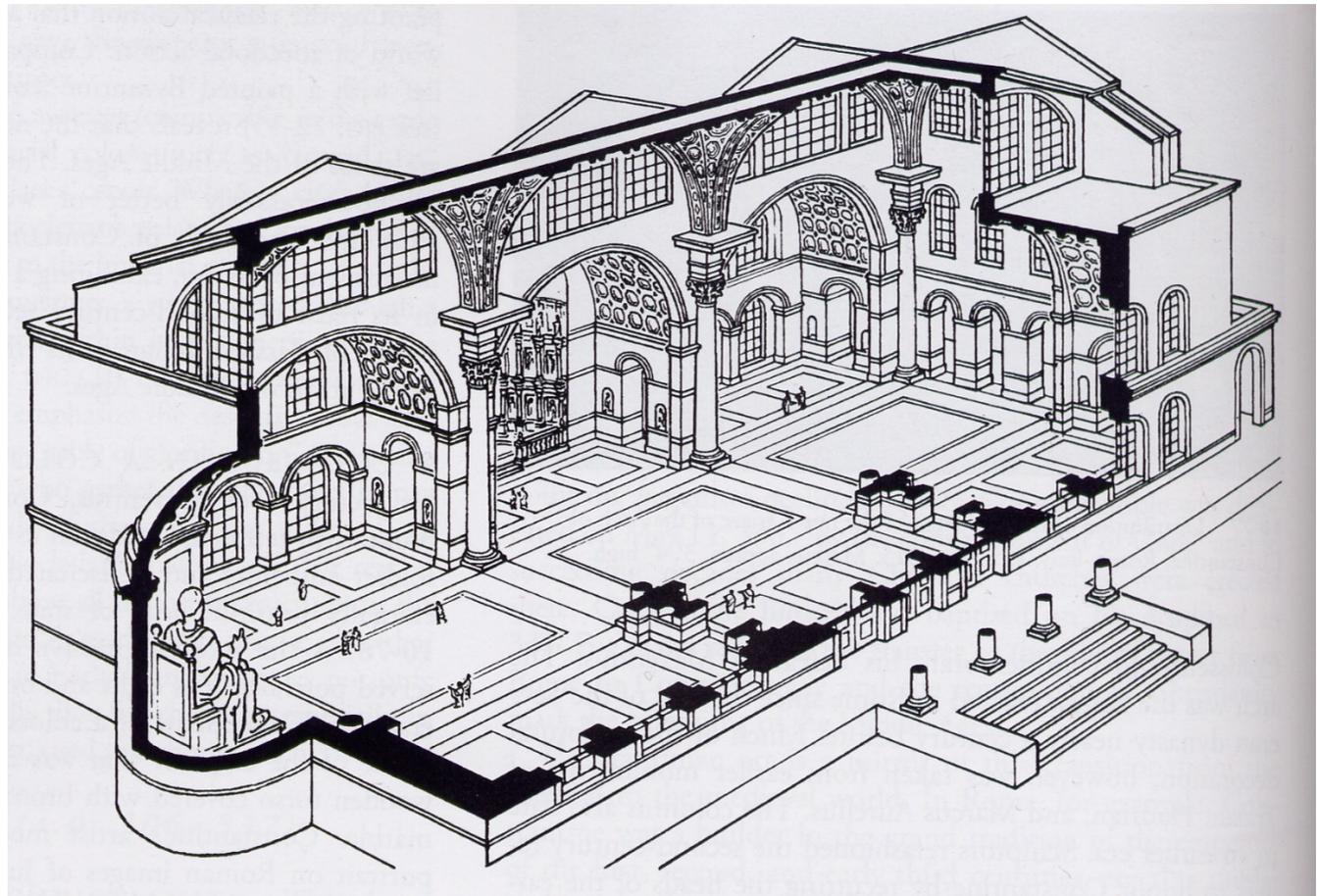
In Persia

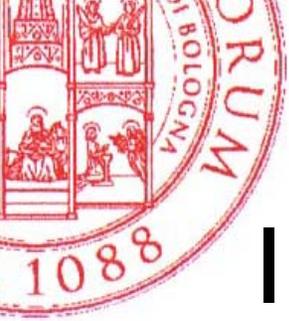


187 Squinch, Firuzabad. (From Dieulafoy, *L'art antique de la Perse*)

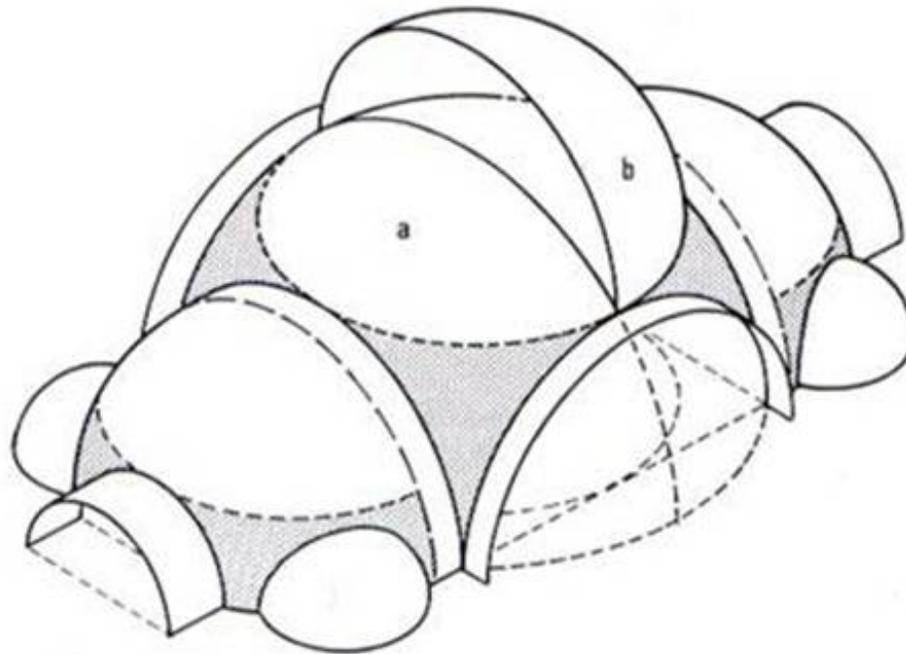


La Basilica costantiniana





Il nuovo paradigma

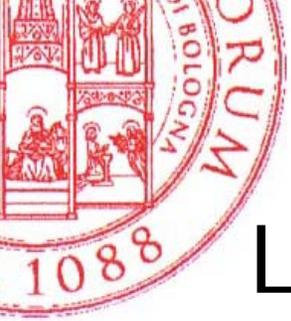


189 The probable development of the final idea for vaulting the central square: **a** with a dome on merging pendentives (shown stippled like the corresponding portions of the semidomes); **b** with a steeper dome rising above the pendentives



Forse il “modello” per la sperimentazione
San Sergio e Bacco (527?)





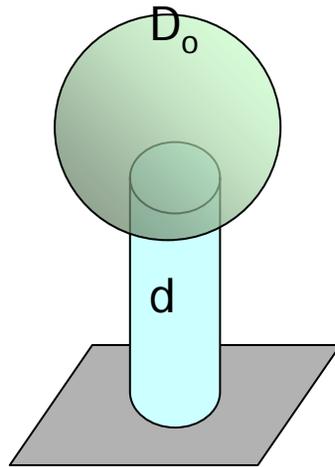
L'effetto della spinta della cupola



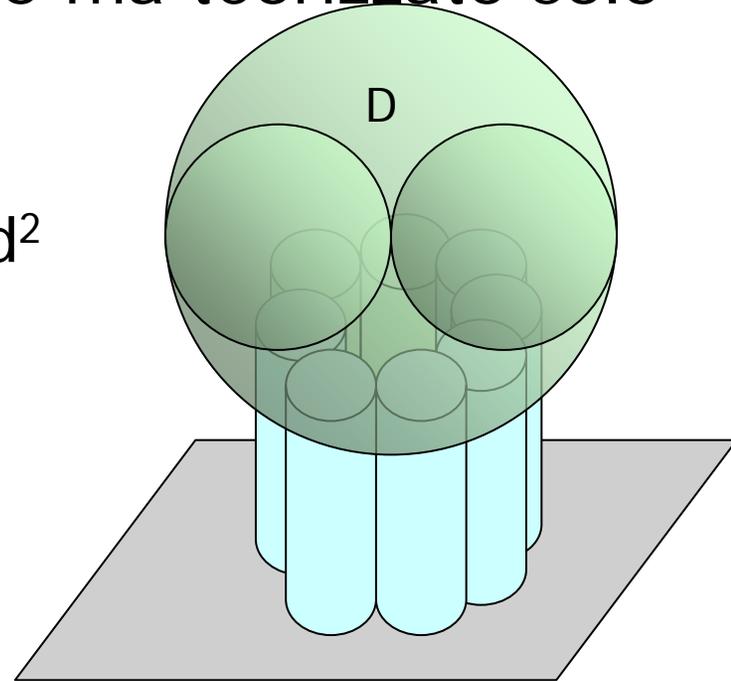
La colonna non è a piombo



Il problema dell'effetto scala:
sperimentalmente noto ma teorizzato solo
da Galileo



$$\sigma \sim D_0^3 / d^2$$



Se le dimensioni raddoppiano occorrono 8 colonne per mantenere in esse costante la sollecitazione: la similitudine fisica non è la similitudine geometrica.



Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze: Una teoria ricavata da una tecnica

GIORNATA PRIMA

Interlocutori

Salviati, Sagredo e Simplicio

Il dialogo di Galileo inizia con queste parole:

*SALVIATI. "Largo campo di filosofare a gl'intelletti specolativi parmi che porga la **frequente pratica del famoso arsenale di voi, Signori Veneziani**, ed in particolare in quella parte che meccanica si domanda; atteso che quivi ogni sorte di strumento e di machina vien continuamente posta in opera da numero grande di artefici, tra i quali, e per l'osservazione fatte da i loro antecessori, e per quelle che di propria avvertenza vanno continuamente per sè stessi facendo, è forza che ve ne siano de i peritissimi e di finissimo discorso....."*

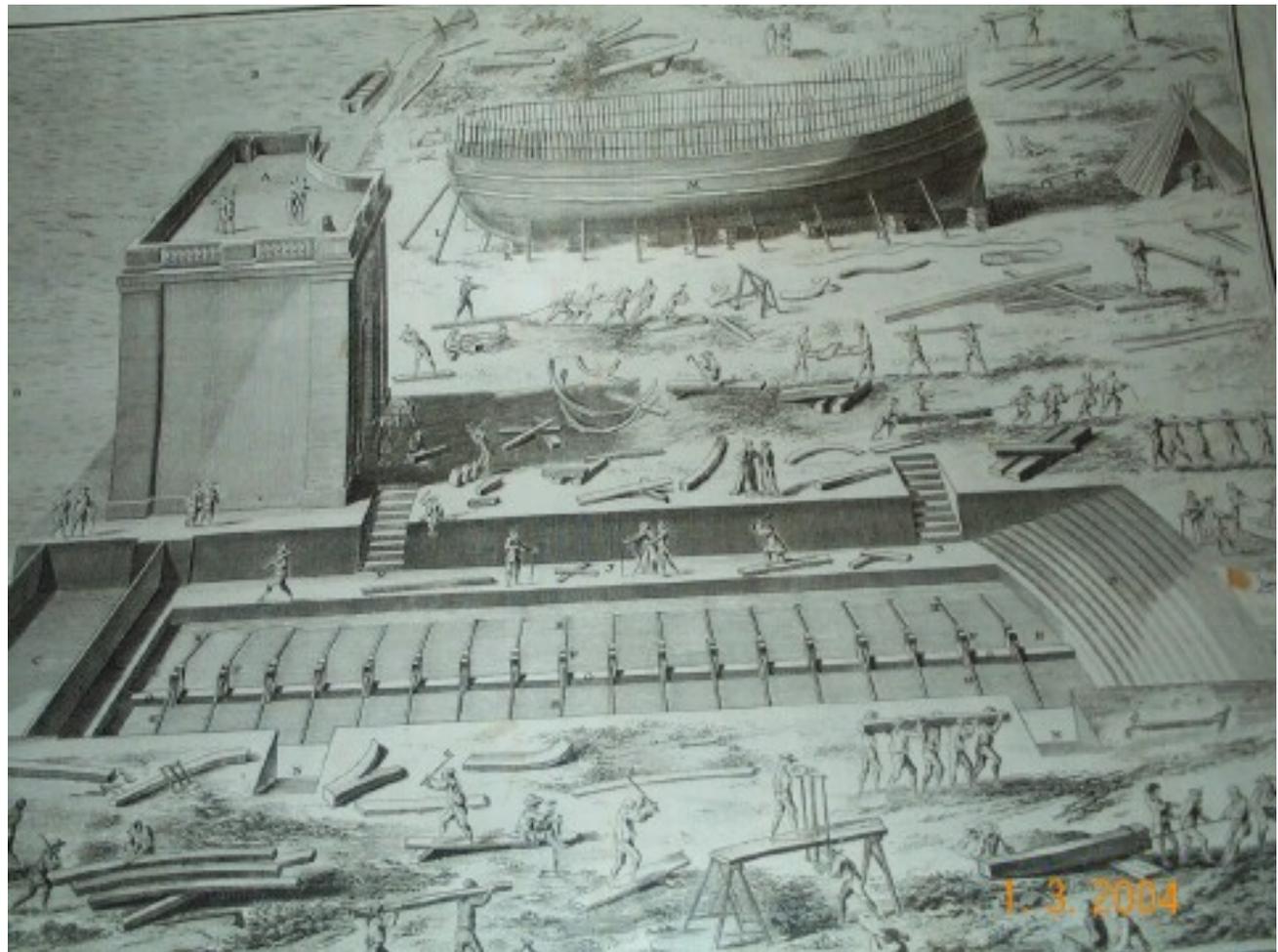
1 ÷ 11 pag.11

*SALVIATI :V.S..vuol forse dire di quell'ultimo pronunziato ch'ei profferì mentre **ricercavamo d'intendere per qual ragione facevano tanto maggior apparecchio di sostegni, armamenti ed altri ripari e fortificazioni, intorno a quella gran galeazza che si doveva varare, che non si fa intorno a vasselli minori;***

1 ÷ 5 pag.12



La struttura delle galeazze





SALV. .io .. il dirò, affermando che.....la macchina maggiore, fabbricata dell'istessa materia e con l'istesse proporzioni che la minore,.... quanto più sarà grande, tanto a proporzione sarà più debole..... perché si può geometricamente dimostrare, sempre le maggiori essere a proporzione men resistenti che le minori...."

5 ÷ 25pag.13.

"Chi non vede come un cavallo cadendo da un'altezza di tre braccia si romperà l'ossa, ma un cane da una tale,...non si farà mal nissuno, come né un grillo da una torre, nè una formica precipitandosi dall'orbe lunare?... E come gli animali pi`u piccoli sono, a proporzione, pi`u robusti e forti dei maggiori, così le piante minori meglio si sostentano: e già credo cheuna quercia dugento braccia alta, non potrebbe sostenere i suoi rami sparsi alla similitudine di una di mediocre grandezza, e che la natura non potrebbe fare un cavallo grande per venti cavalli, nè un gigante dieci volte più grande di un uomo, se non con l'alterare assai le proporzioni delle membra ed in particolare delle ossa, ingrossandole molto e molto sopra la simmetria dell'ossa comuni...."

32 pag.14, 13 pag.15



Galileo continua con affermazioni come queste:

"...Or veggino come dalle cose sin qui dimostrate apertamente si raccoglie l'impossibilità del potere non solamente l'arte, ma la natura stessa, crescere le sue macchine a vastità immensa: sì che impossibil sarebbe fabbricar navilii, palazzi o templi vastissimi, li cui remi, antenne, travamenti, catene di ferro... consistessero; come anco non potrebbe la natura far alberi di smisurata grandezza, poich'è i rami loro, gravati dal proprio peso, finalmente si fiaccherebbero; e parimenti sarebbe impossibile far strutture di ossa per uomini, cavalli o altri animali, che potessero sussistere...mentre tali animali si dovessero agumentare ad altezze immense, se già... non si deformassero tali ossi, sproporzionatamente ingrossandogli, onde poi la figura ed aspetto dell'animale ne riuscisse mostruosamente grosso: il che forse fu avvertito dal mio accortissimo Poeta, mentre descrivendo un grandissimo gigante disse:

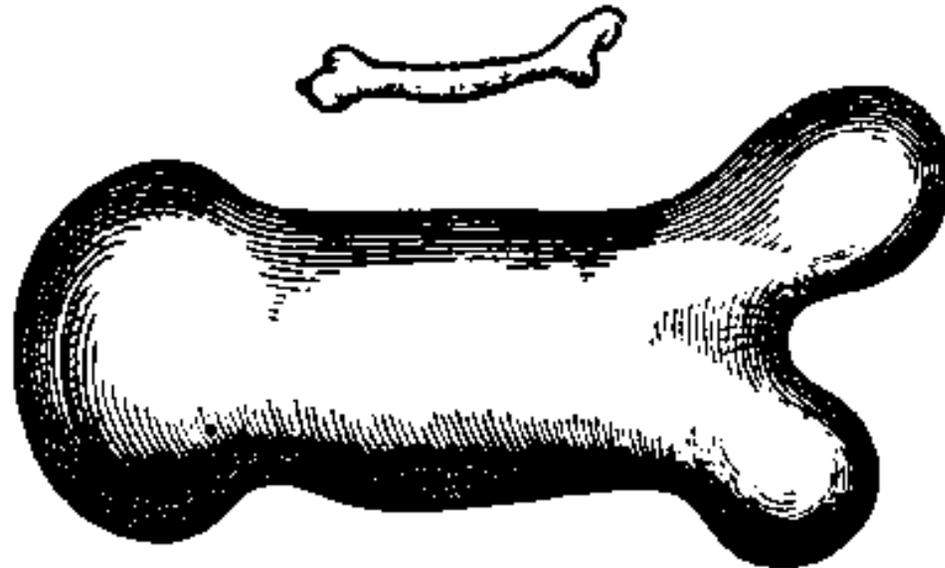
***Non si può compartir quanto sia lungo,
sì smisuratamente è tutto grosso"***

L. Ariosto - Orlando Furioso XVII 30



E per un breve esempio di questo che dico, disegnai già la figura di un osso allungato solamente tre volte, ed ingrossato con tal proporzione, che potesse nel suo animale grande far l'uffizio proporzionato a quel dell'osso minore nell'animal più piccolo, e le figure sono queste..., fig.1 :

26 pag. 140 ÷ 14 pag 141



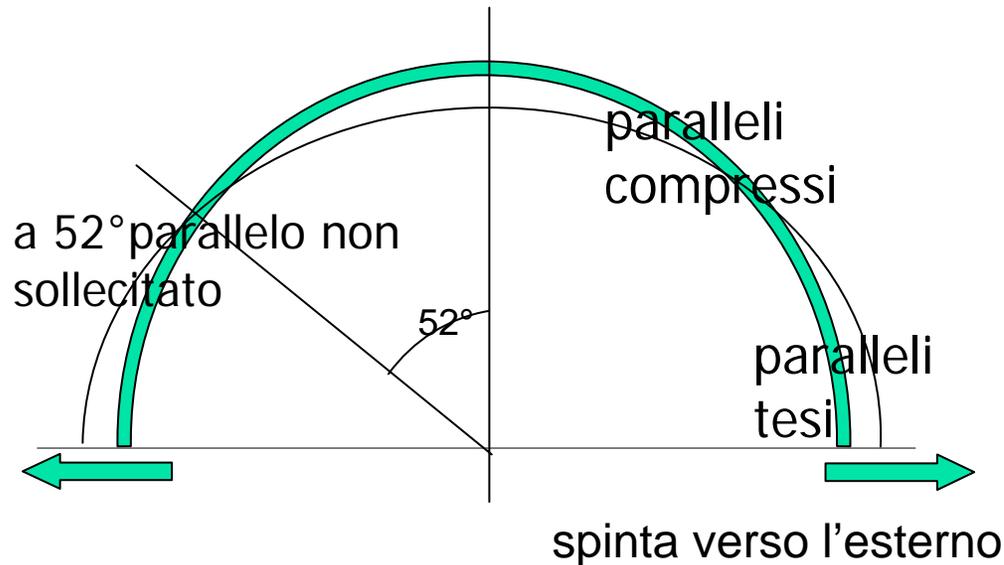


Dal che è manifesto, che chi volesse mantenere in un vastissimo gigante le proporzioni che hanno le membra in un uomo ordinario, bisognerebbe o trovare materia molto più dura e resistente, per formare l'ossa, o vero ammettere che la robustezza sua fusse a proporzione assai più fiacca che negli uomini di statura mediocre... dove che, all'incontro, si vede, nel diminuire i corpi non si diminuir con la medesima proporzione le forze...: onde io credo che un piccolo cane porterebbe addosso due o tre cani uguali a sè, ma non penso già che un cavallo portasse neanche un solo cavallo, a sè stesso uguale.

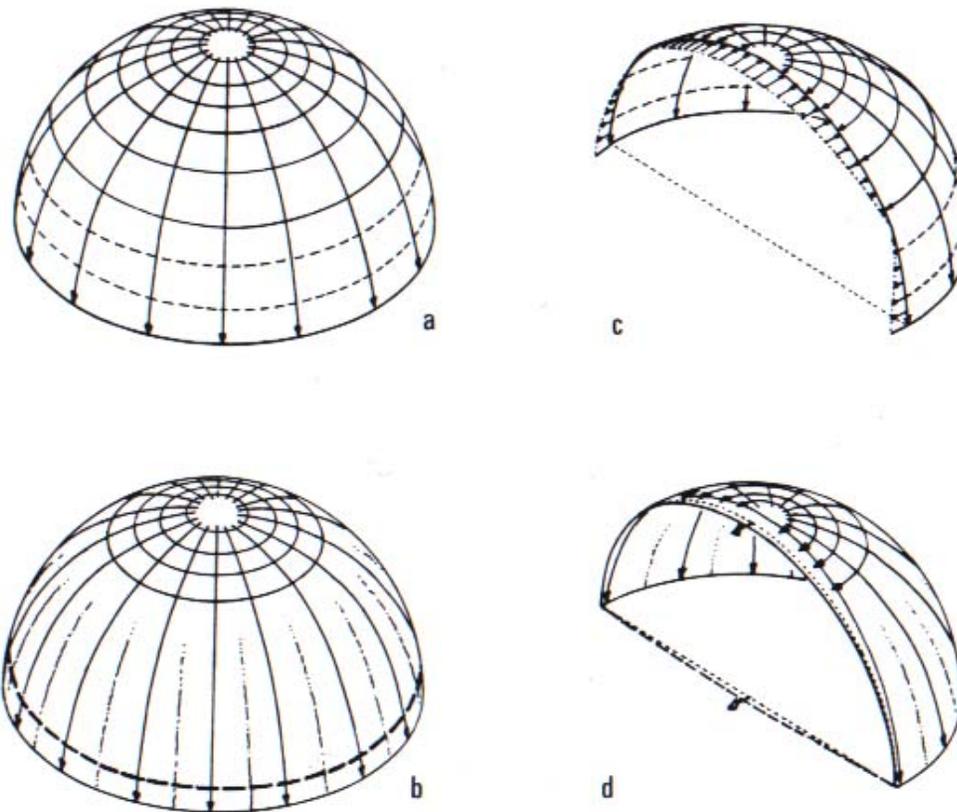
pag.140 (26) ÷ pag.141 (26)



La statica delle cupole



Rispetto agli archi la statica di una cupola è molto più complessa e i costruttori romani non avevano nessuna teoria scientifica. Conoscevano solo un insieme di regole empiriche. Forse i bizantini avevano conoscenze scientifiche superiori. Si è osservato che l'unica copia dell'opera di **Archimede** è stata commentata da **Antemio di Tralle**.



191 Domes and semidomes: **a** and **c** Thrust-lines (here shown in full line) and circumferential tensions (shown in broken line) in the ideal forms with ideal edge support for the semidome. **b** Radial cracking of a dome restrained by a circumferential tie at the foot. **d** Thrust-lines in an actual masonry semidome with a free edge



Santa Sofia 532-537 d.C. (i minareti aggiunti alla conquista ottomana)



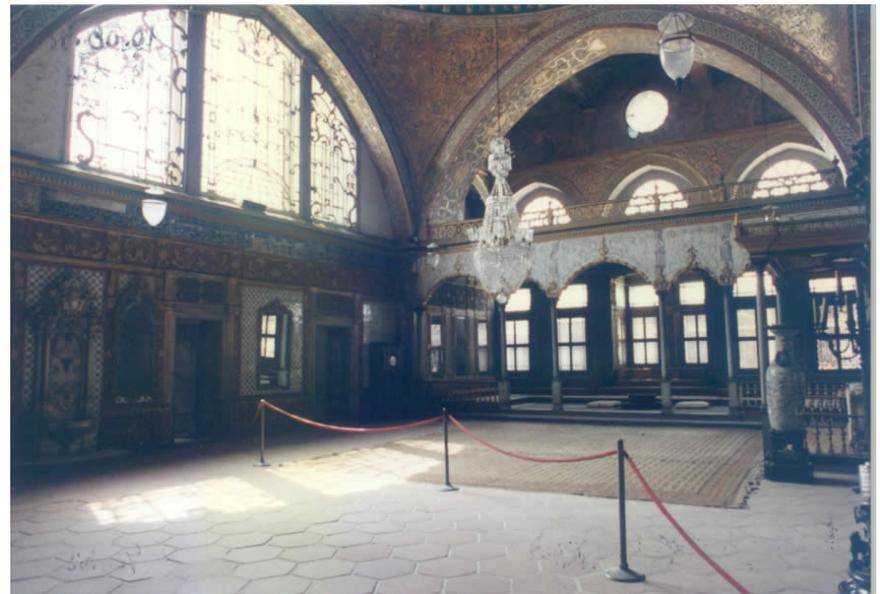


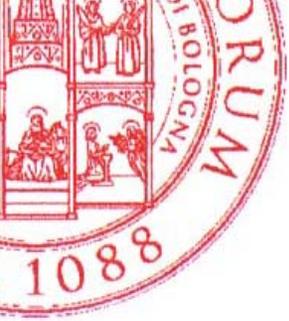
(foto dell'autore)



l'evidente influenza dell'arte bizantina
sull'architettura turca, (1000 anni dopo!)

foto dell'A.



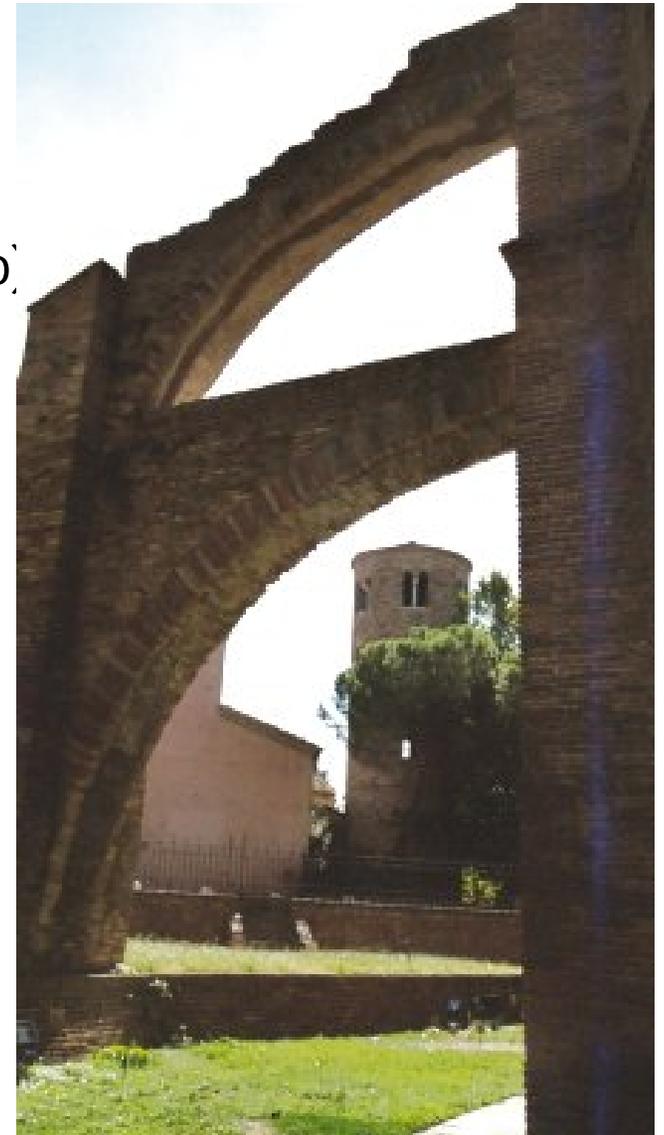


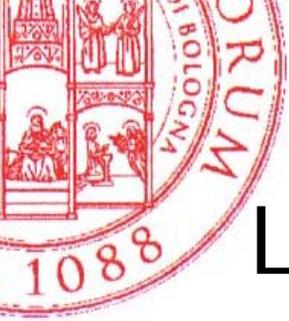
San Vitale a Ravenna

Nasce negli stessi anni con forma ottagonale, come San Sergio e Bacco,

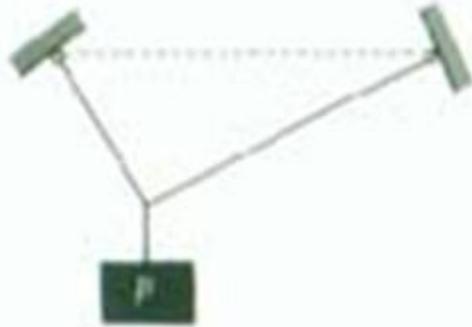
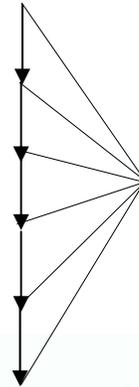
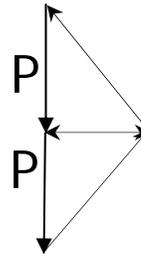
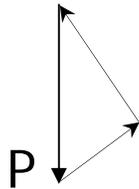


Altri primi esempi di **archi rampanti**

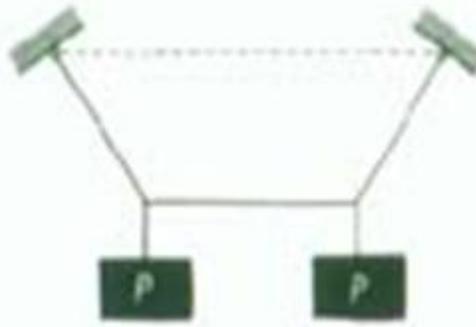




La catenaria e



(a)



(b)



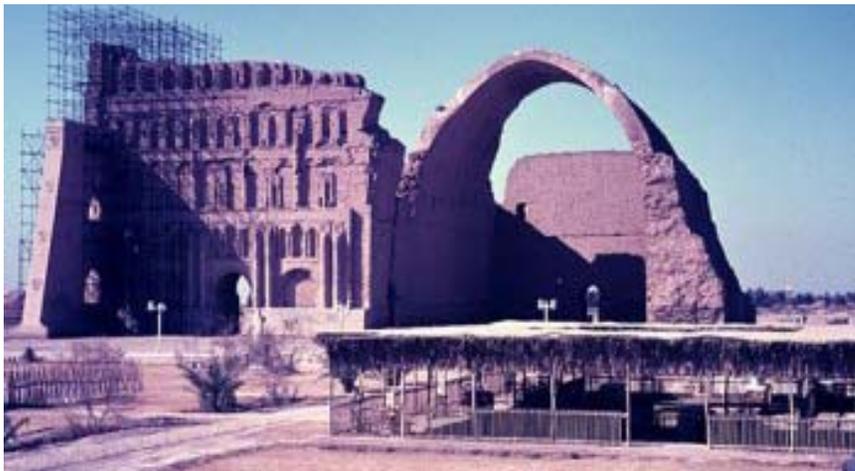
(c)

La fune si dispone secondo la direzione della risultante delle forze che stanno alla sinistra del punto in esame.



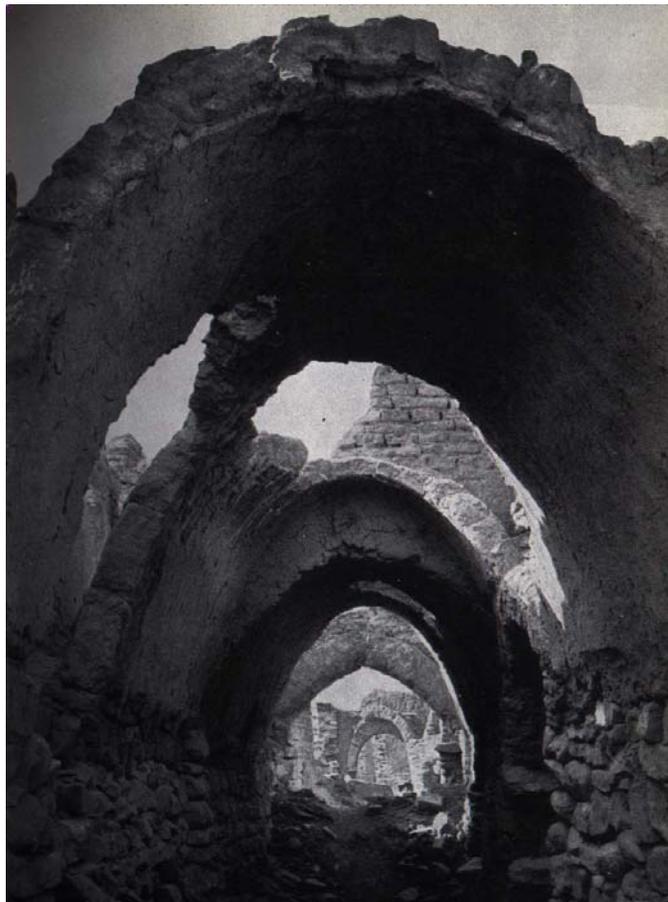
....un'altra soluzione ellenistica

Forse il primo esempio di arco parabolico: Ctesifonte, antica città di Babilonia, sul fiume Tigri, fu la capitale dell'impero persiano dal 129 a.C. al 637 d.C., quando fu conquistata dagli Arabi.





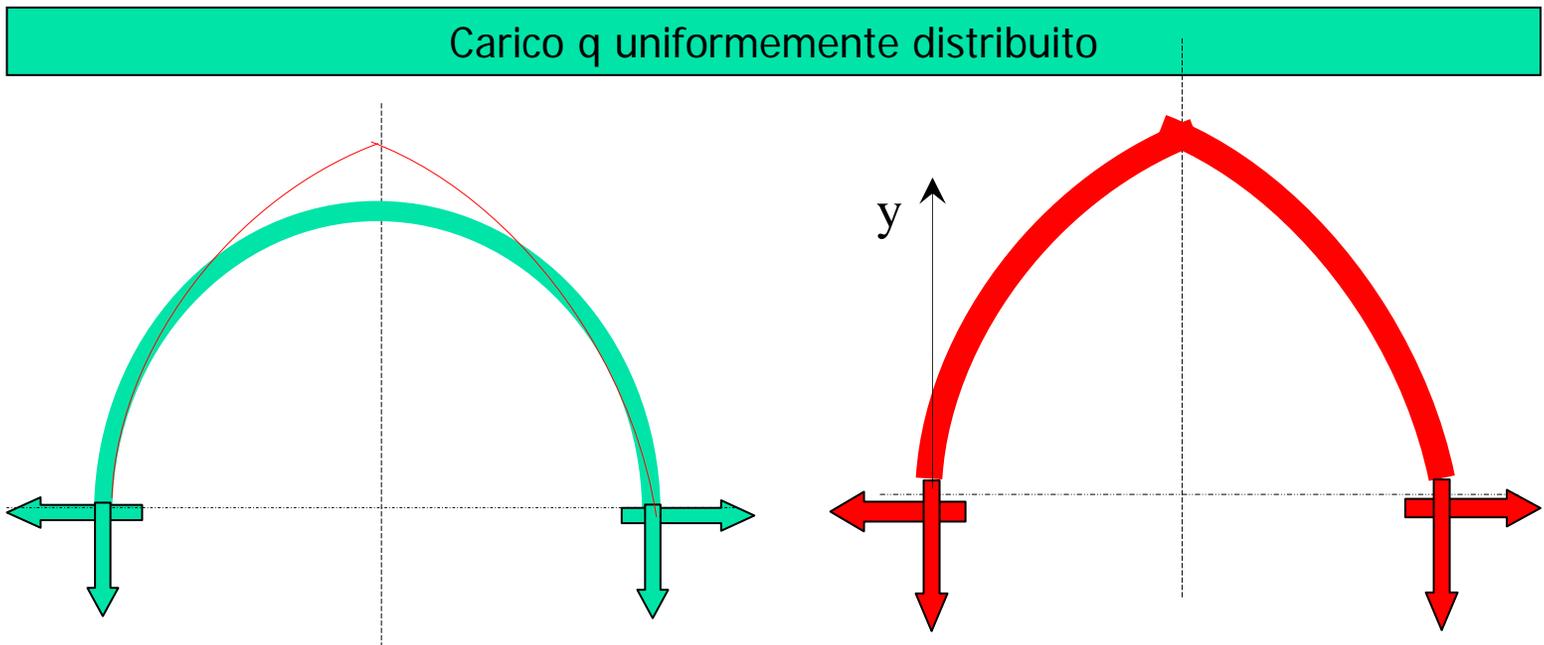
Archi parabolici del periodo giustiniano





Archi a tutto sesto e archi a sesto acuto

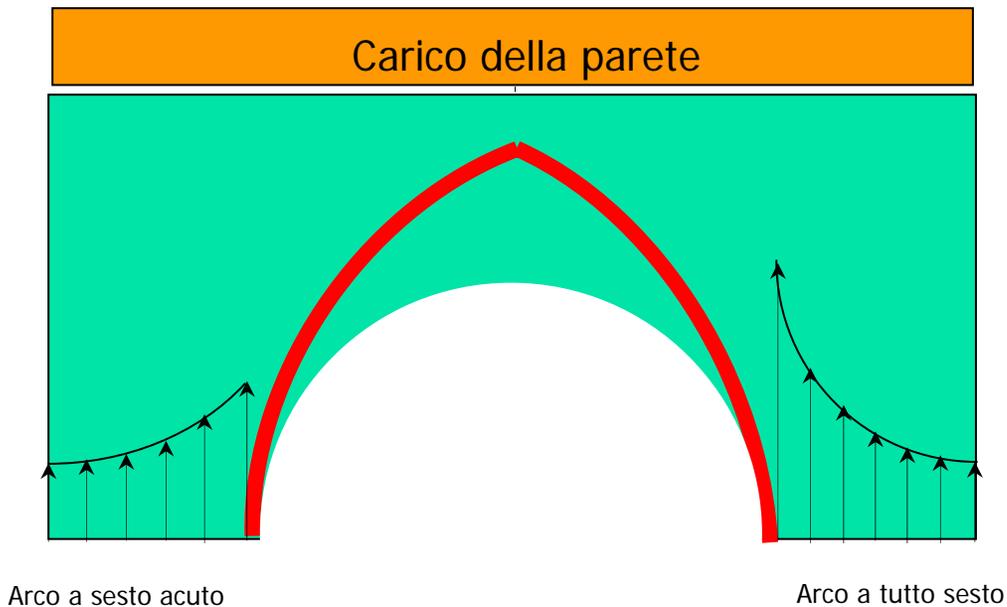
Il comportamento di un arco è tanto più soddisfacente quanto più la curva delle pressioni si avvicina all'asse geometrico



L'arco a sesto acuto rispetto a quello circolare, ha forma più vicina a quella parabolica, (catenaria per la fune flessibile quando è gravata da peso uniforme q). In altre parole la curva delle pressioni è più vicina all'asse geometrico rispetto all'arco a tutto sesto e la struttura è sollecitata da un momento flettente minore.



Aperture semicircolari e a sesto acuto



Una volta gotica riduce la concentrazione degli sforzi nei fianchi, (dovuti al peso della parete), rispetto a quella semicircolare.



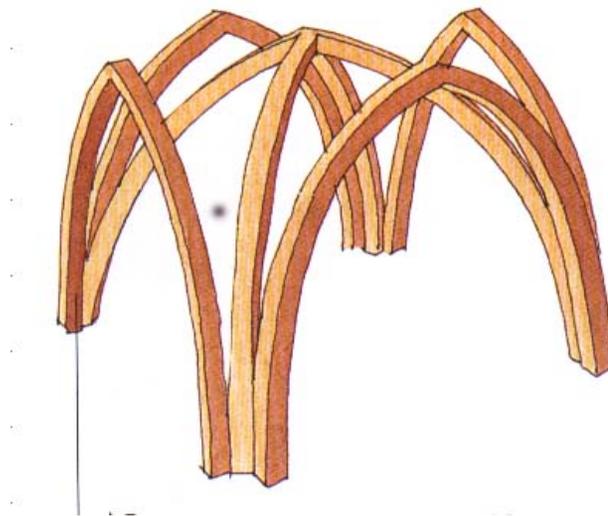
L'edificazione della Cattedrale

I costruttori gotici
**utilizzavano come
modello le cattedrali
stesse**, modificando il
progetto quando si
manifestavano problemi
strutturali:
le informazioni si
propagavano poi da un
cantiere all'altro.

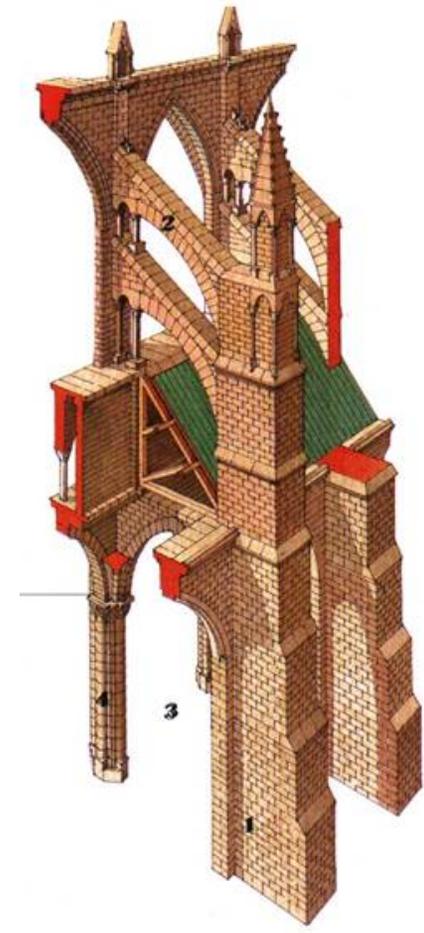




La sperimentazione su: nervature, archi rampanti e contrafforti



Le nervature concentrano il flusso dei carichi e liberano le pareti dalle sollecitazioni.





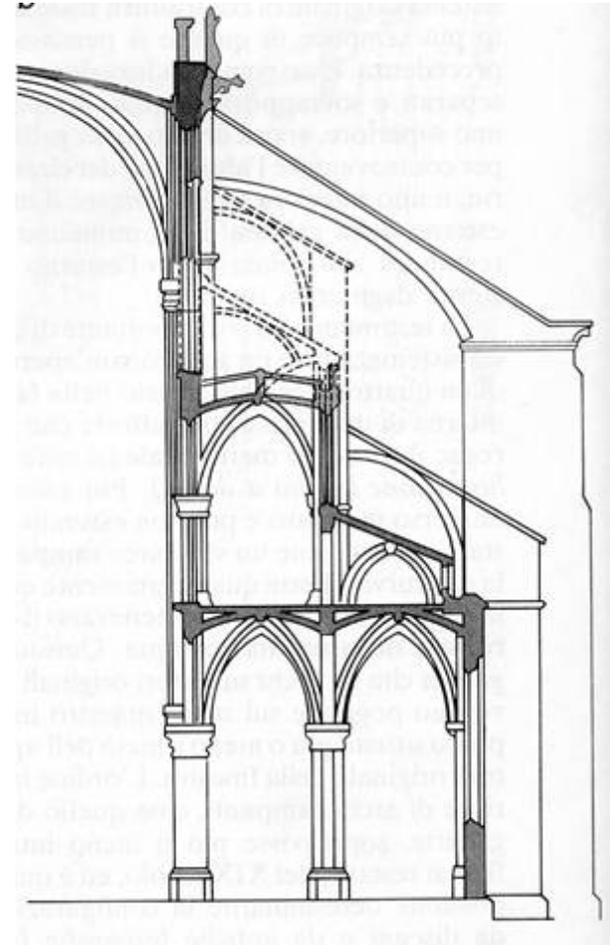
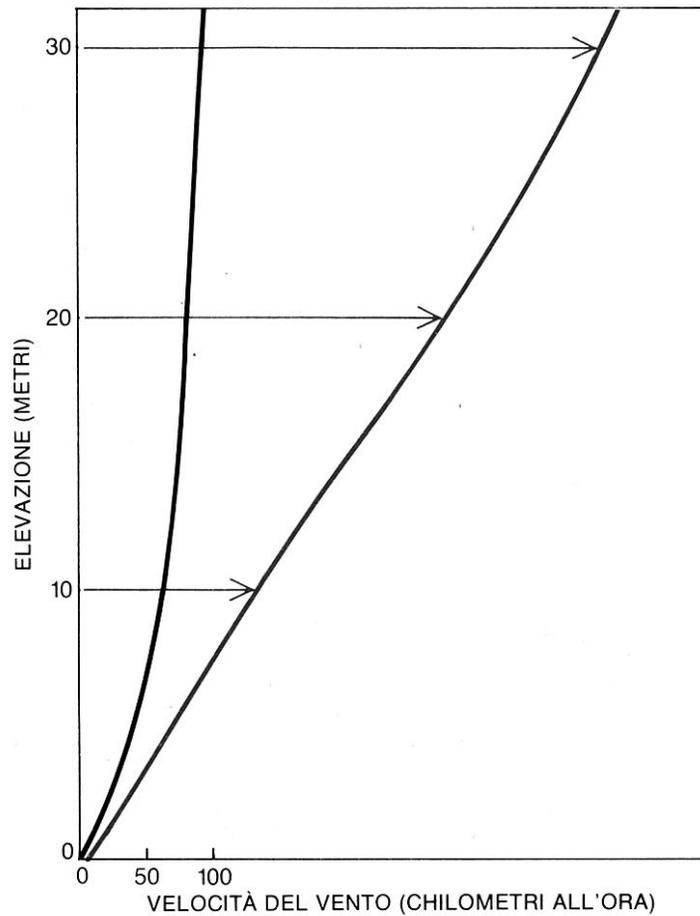
Nella costruzione della cattedrale di Notre-Dame di Parigi, per la prima volta i soffitti si innalzavano per circa 33 metri, **un terzo in più dei precedenti edifici gotici**. Nonostante ciò la configurazione strutturale del coro era fondamentalmente analoga a quella delle chiese precedenti. Alla spinta verso l'esterno si opponevano soltanto gli archi in pietra, con apertura di un quarto di cerchio, nascosti sotto il tetto obliquo della galleria contigua. Nel progettare la navata centrale, un po' più larga, con struttura più aperta e più leggera, i costruttori parigini decisero che gli archi di sostegno celati dal tetto delle navate laterali, non erano sufficienti a sostenere l'alto **cleristorio**. Una maggiore larghezza significava una maggiore spinta laterale (superiore a quella del coro). Inoltre gli artigiani dovevano aver compreso che la spinta del vento è molto maggiore ad altezze più elevate. Oggi sappiamo che la pressione del vento è proporzionale al quadrato della velocità del vento. Molto probabilmente furono questi i motivi che portarono a introdurre, poco prima del 1180, l'arco rampante.



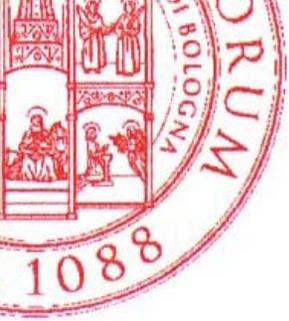
Sperimentare su strutture esistenti



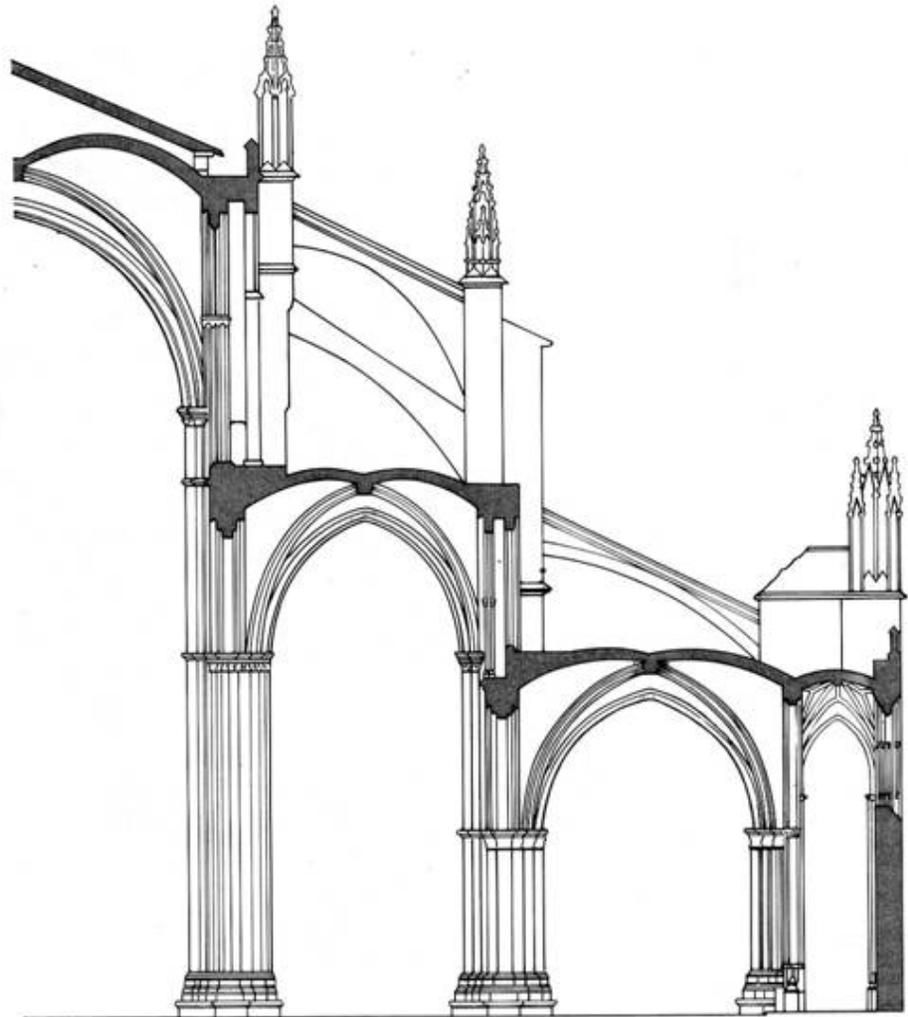
Simile strutturalmente **all'arco a un quarto di cerchio**, l'arco rampante era posto all'esterno e sosteneva il muro ad un livello più alto. In meno di due decenni divenne l'elemento caratteristico degli edifici gotici. Gli archi rampanti originali (di cui rimane una memoria in un arco murato nel contrafforte del transetto meridionale) dovevano aver subito lesioni tali da rendere necessaria nel XIII sec. la nuova configurazione che vediamo oggi.



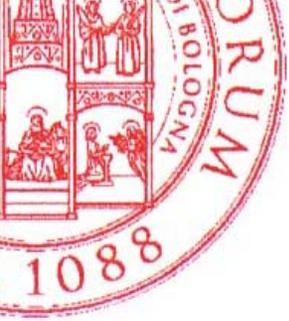
È qui possibile confrontare, alla stessa scala, un diagramma della pressione del vento e della sezione di Notre-Dame. È inoltre possibile confrontare la configurazione originale con le modifiche attuate nel XIII sec.



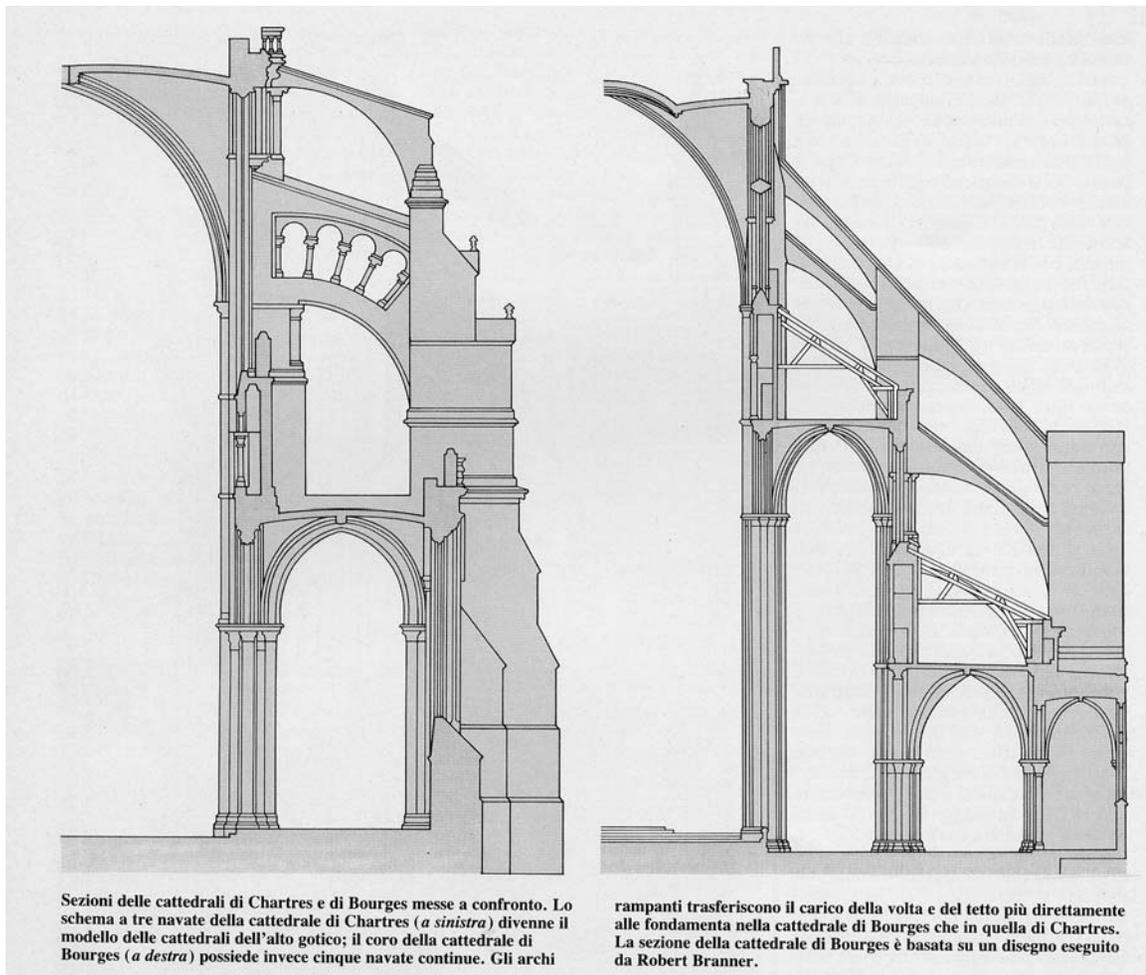
Altri interventi

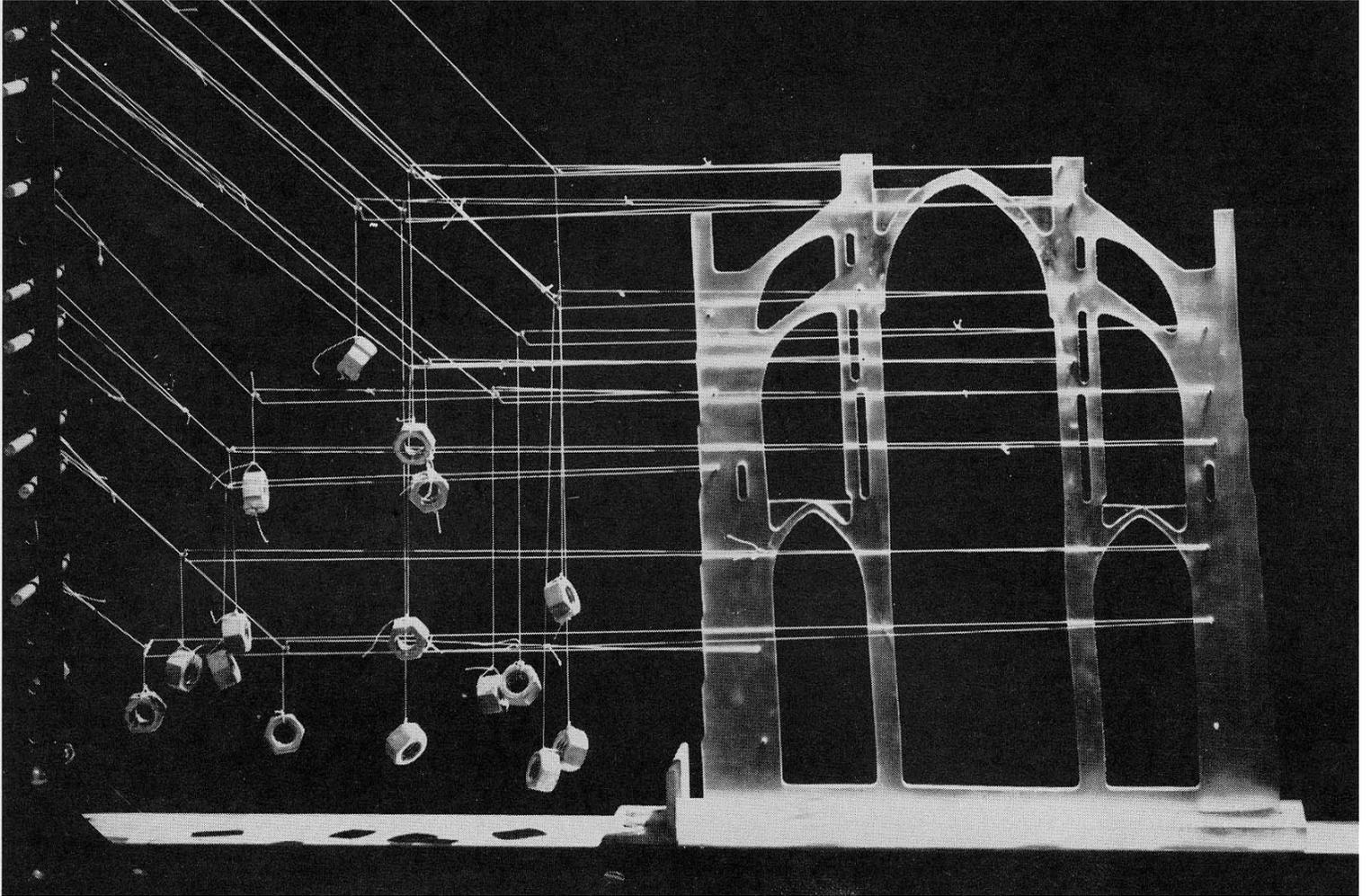
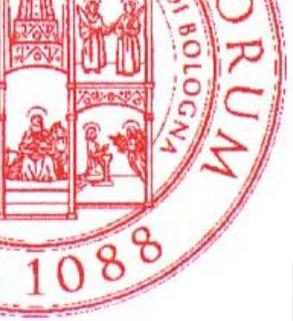


La sezione della cattedrale di Toledo presenta massicci archi rampanti superiori che non sembrano necessari per la sua struttura. Probabilmente vi si fece ricorso perché a Notre-Dame erano state rilevate inclinature da trazione indotte dal vento, prima che a Toledo incominciarono i lavori verso il 1227.



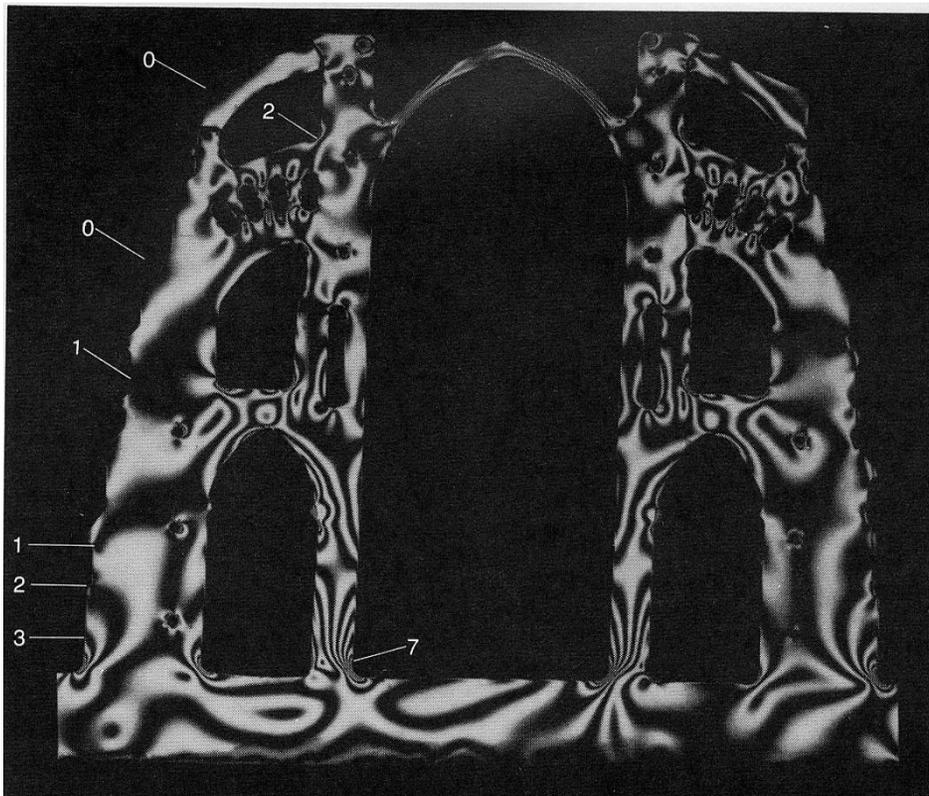
Un modo di sperimentare su modelli



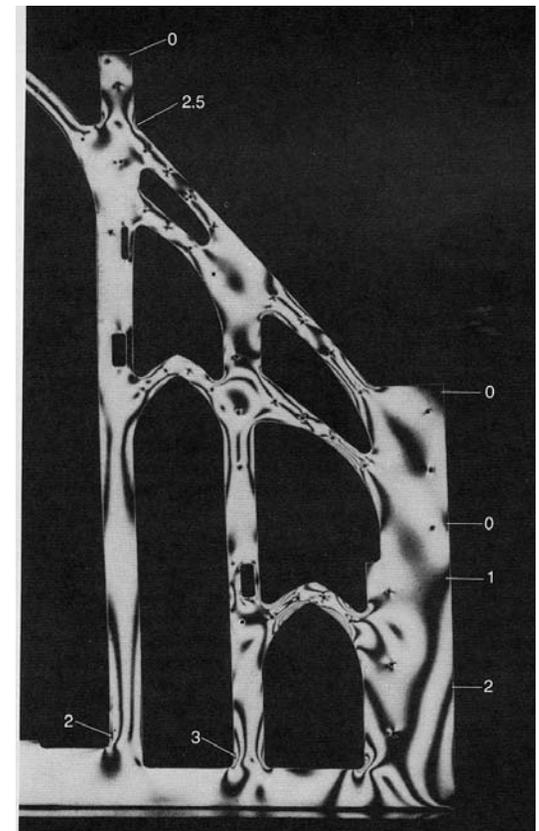




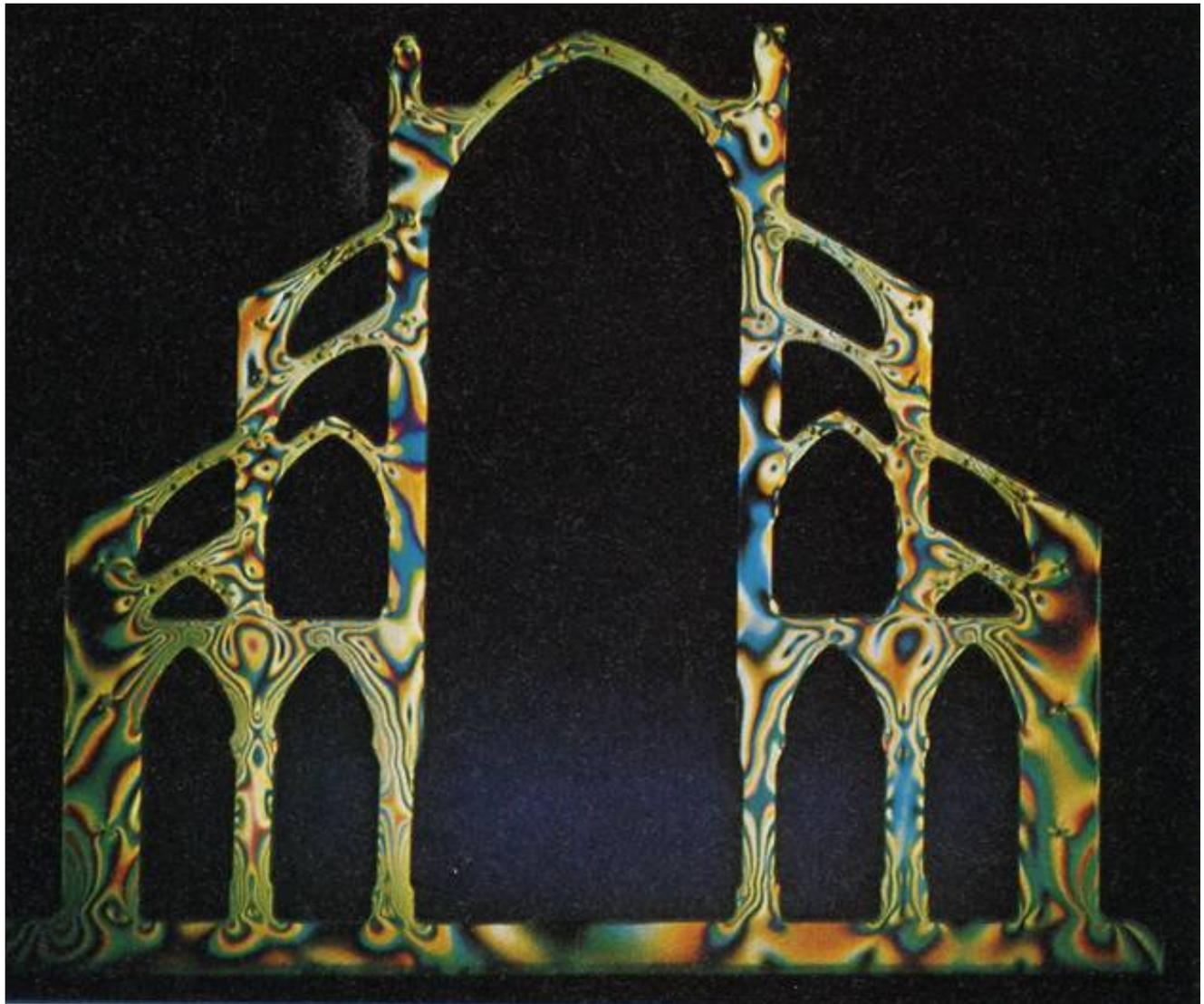
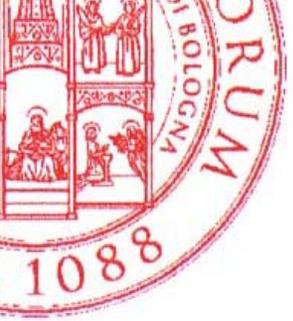
Quadri interferometrici danno la distribuzione degli sforzi

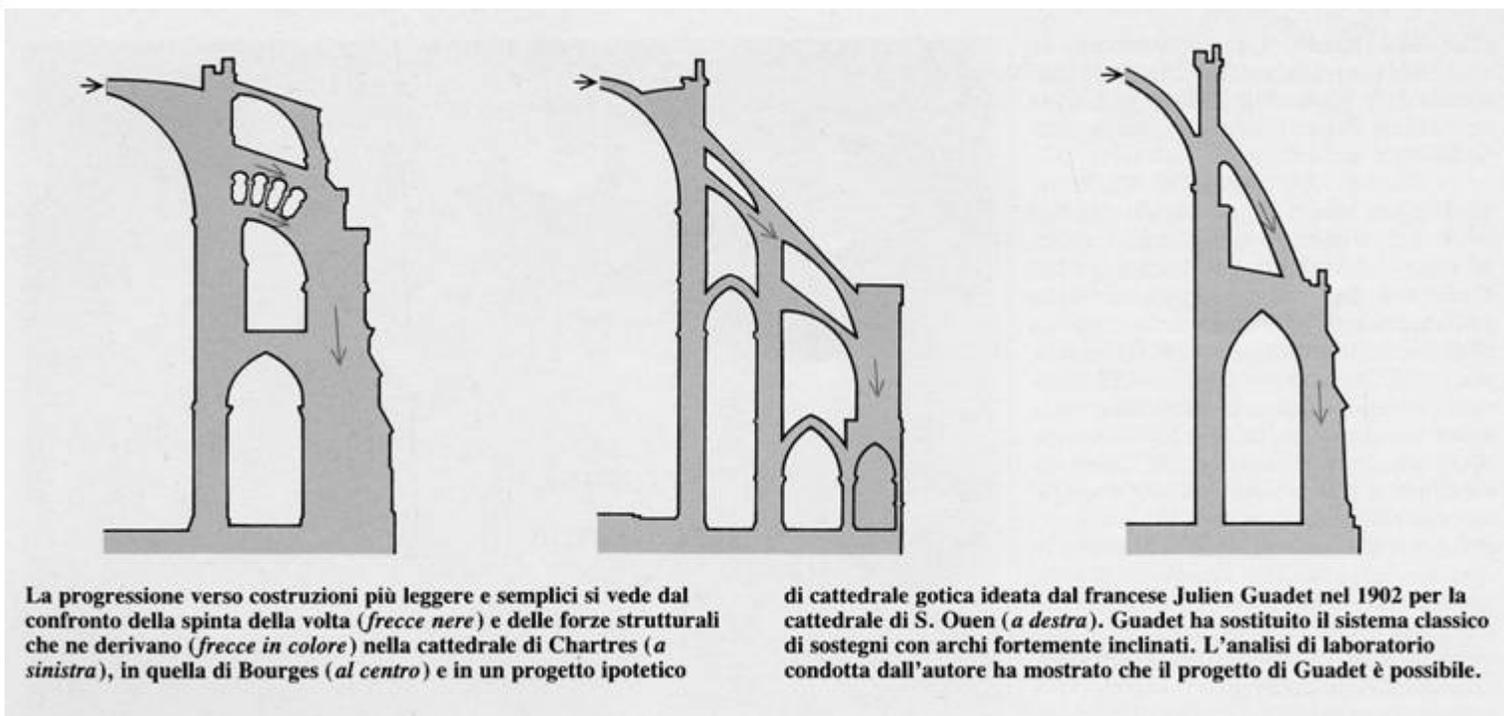


Chartres



Bourges





La progressione verso costruzioni più leggere e semplici si vede dal confronto della spinta della volta (*frecce nere*) e delle forze strutturali che ne derivano (*frecce in colore*) nella cattedrale di Chartres (*a sinistra*), in quella di Bourges (*al centro*) e in un progetto ipotetico

di cattedrale gotica ideata dal francese Julien Guadet nel 1902 per la cattedrale di S. Ouen (*a destra*). Guadet ha sostituito il sistema classico di sostegni con archi fortemente inclinati. L'analisi di laboratorio condotta dall'autore ha mostrato che il progetto di Guadet è possibile.

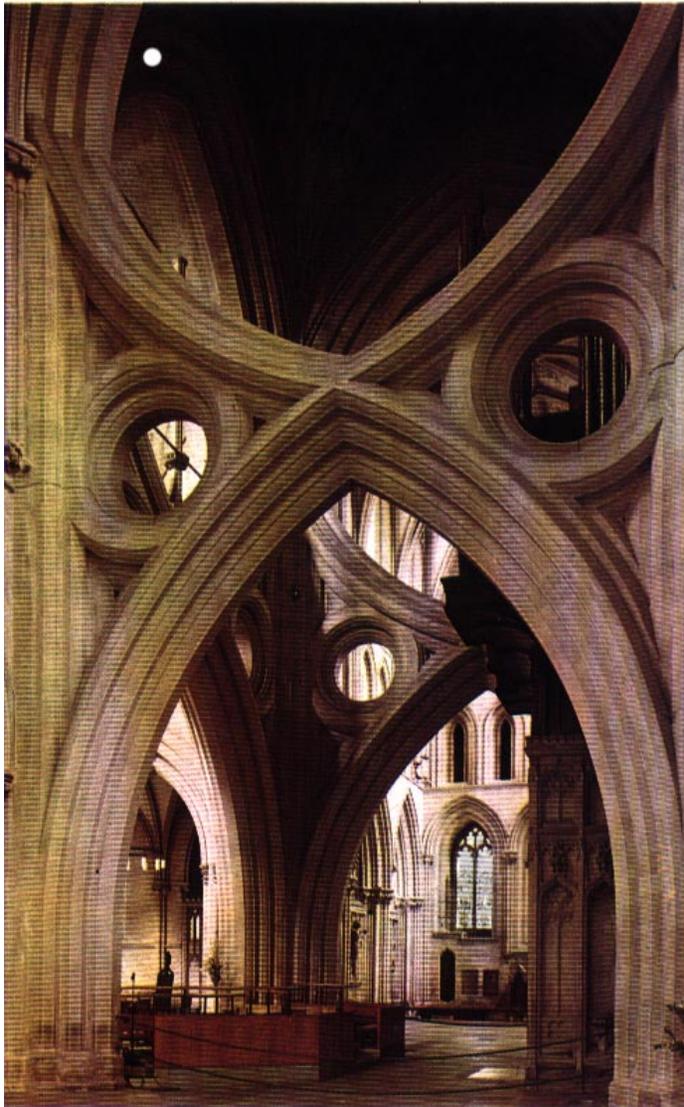
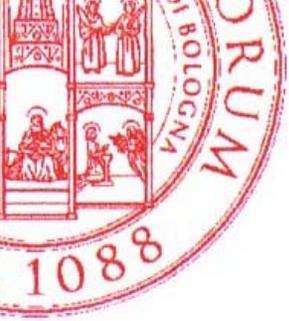
ti. È un fatto che gli archi rampanti non possono essere facilmente visti a meno che chi guarda non sia molto vicino alla parete della navata centrale.

Evidentemente, l'architettura può essere interpretata male se i suoi aspetti tecnici non sono ben compresi. Il problema è più grave quando la scala del progetto è vasta e la tecnologia che ne sta alla base assume nella realizzazione una fun-

zione vitale. Il contributo più importante della cattedrale di Chartres fu di natura estetica; servì di modello per le grandi costruzioni gotiche che seguirono. Eppure tecnicamente la cattedrale di Chartres fu molto meno rivoluzionaria di quanto sia stato sostenuto. D'altra parte, la soluzione strutturale adottata nella cattedrale di Bourges era veramente unica; forse era troppo alla avanguardia per il suo tempo.

(Da «Le Scienze» n. 54, febbraio 1973.)

ROBERT MARK è professore associato di ingegneria civile e di architettura alla Princeton University e condirettore del programma di studi umanistici sull'architettura. Mark si è diplomato in ingegneria a New York e, prima di trasferirsi a Princeton, ha lavorato parecchi anni come ingegnere libero professionista.

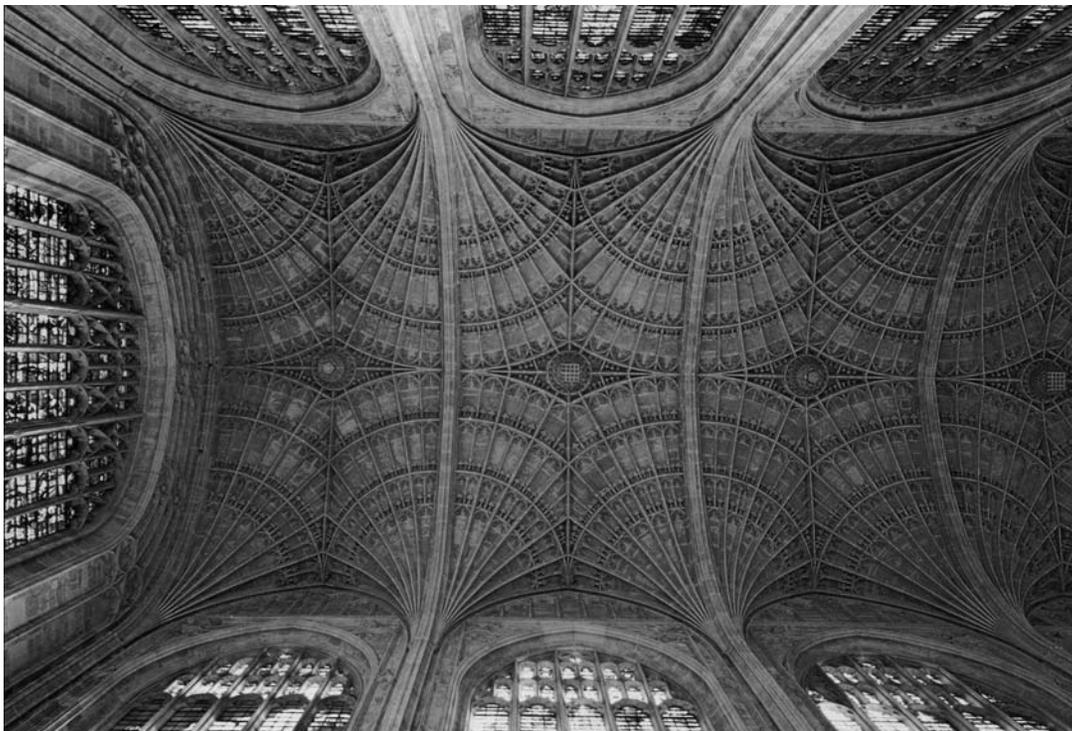


Cattedrale di Wells

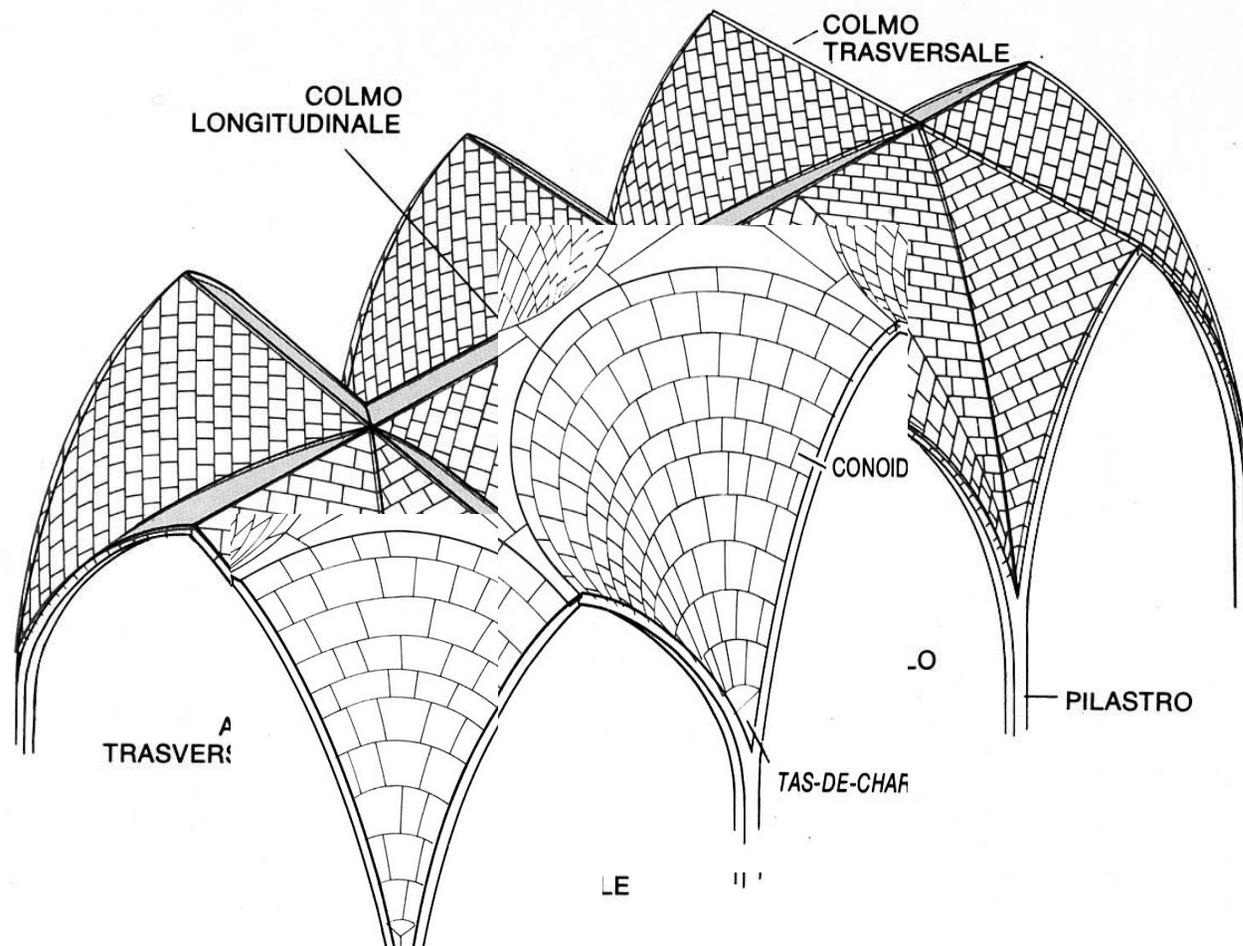
Esempio di soluzione di rinforzo adottata in epoca successiva (1338) alla edificazione della Cattedrale.



Una soluzione tardo-gotica



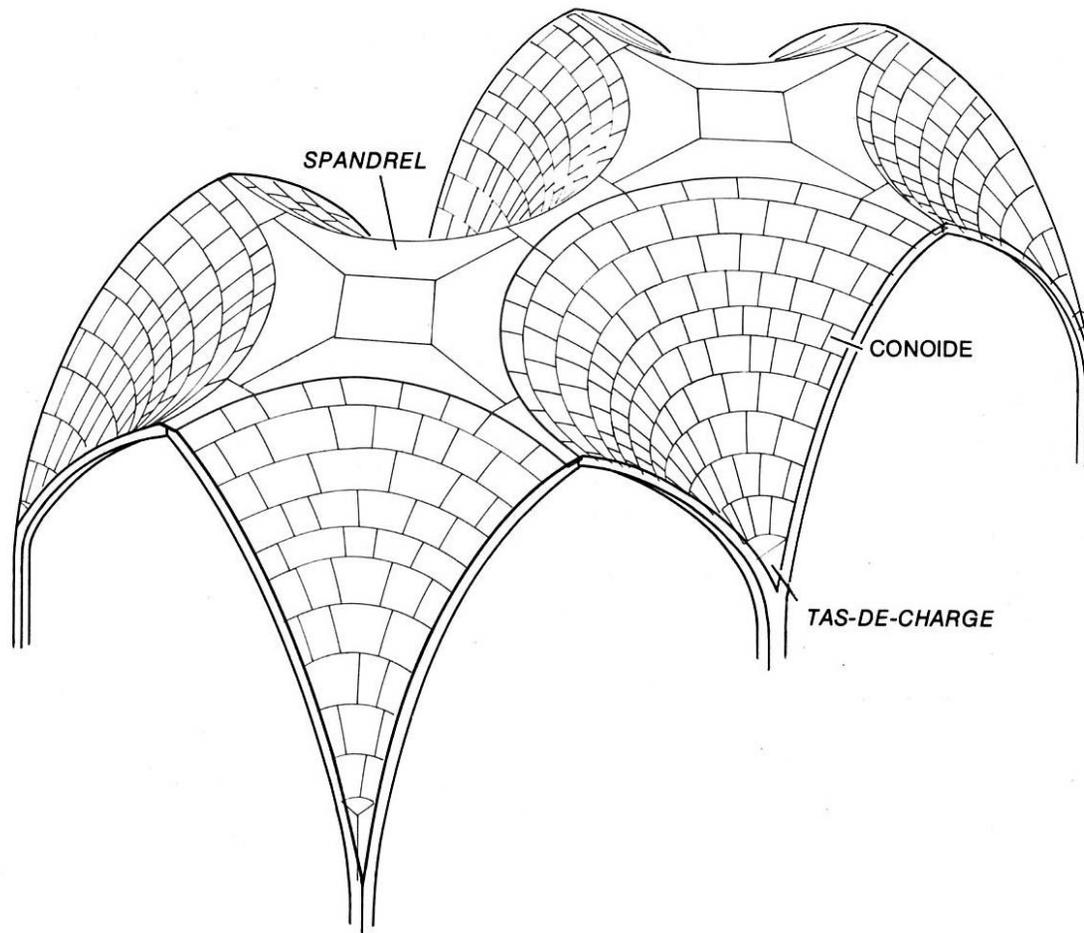
Nel 1300 i costruttori inglesi convertirono l'arco gotico a sesto acuto in un **guscio organico dalla forma di calice**, ottenendo delle strutture perfette dal punto di vista statico.

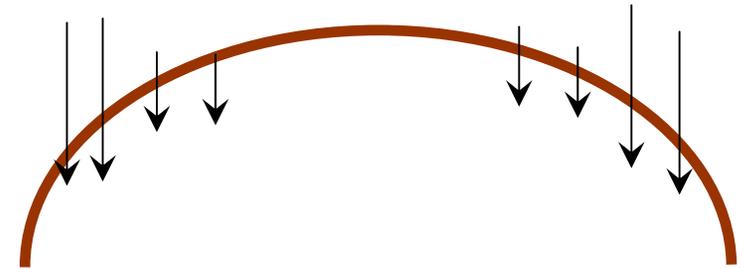
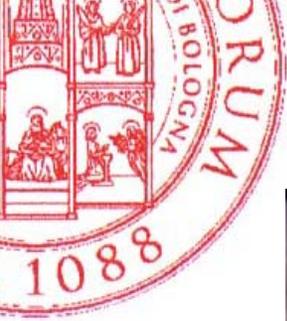


La volta a costoloni, la classica struttura del soffitto gotico, fu concepita dai maestri muratori medioevali come una struttura a intelaiatura in cui gli archi a sesto acuto svolgono la funzione di costoloni portanti. Ciascuna delle unità modulari della volta, detta campata, comprende sei archi disposti a rettangolo con diagonali intersecantisi. Il carico del soffitto è convertito in spinte verso l'esterno e verso il basso le quali vengono trasmesse in parte, attraverso gli archi, ai pilastri e ai muri. La superficie della volta compresa fra un arco e l'altro è ricoperta di pannelli formati da pietre, i quali prendono il nome di vele. In Inghilterra le pietre delle vele erano disposte in corsi inclinati 45 gradi circa dal colmo longitudinale e trasversale sino allo spigolo di intersezione dei quadranti.

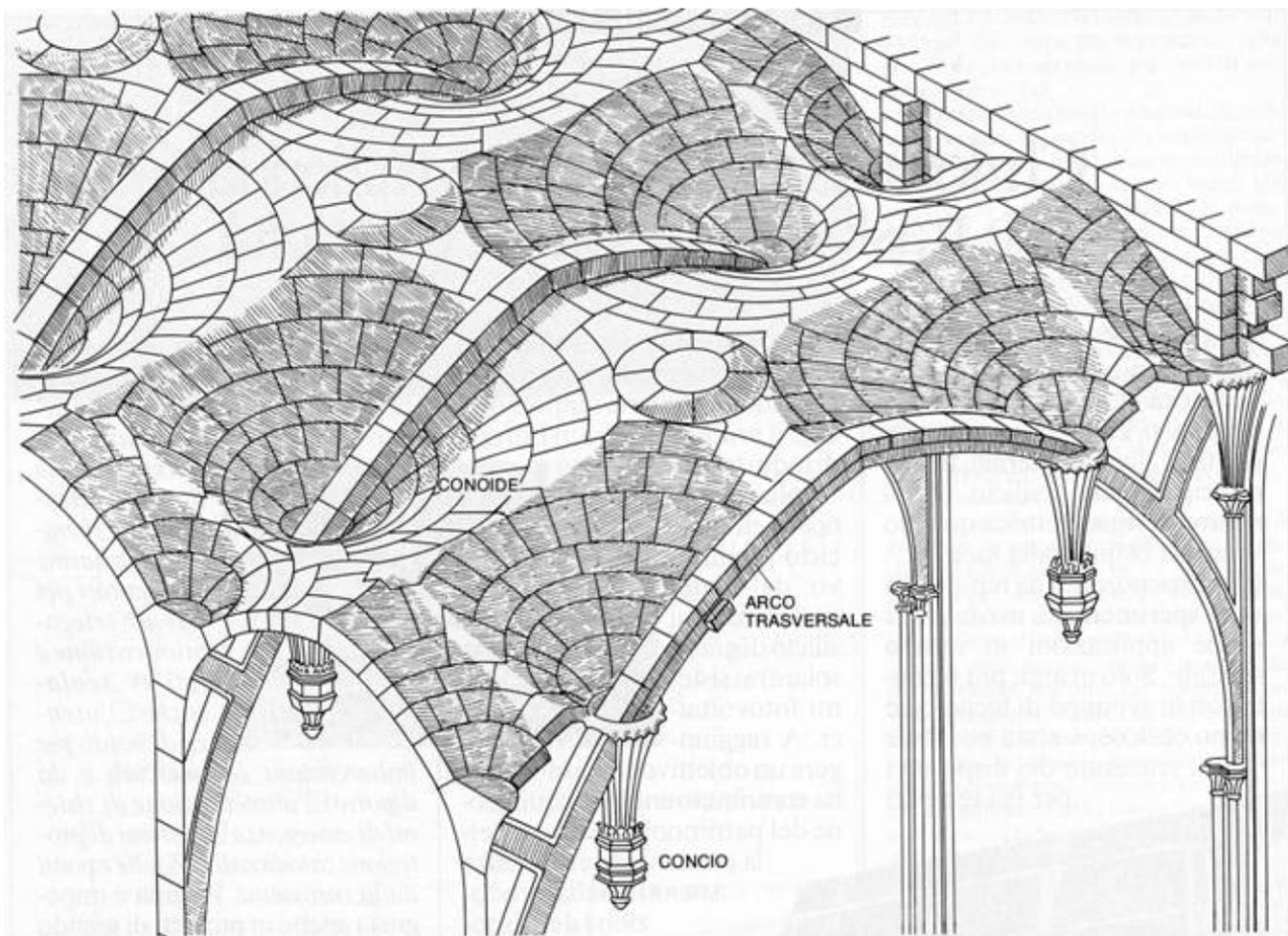
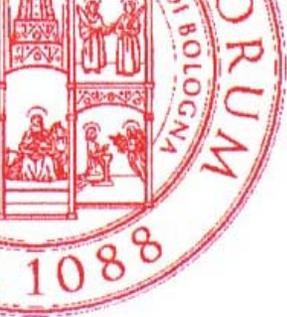


La nuova soluzione strutturale



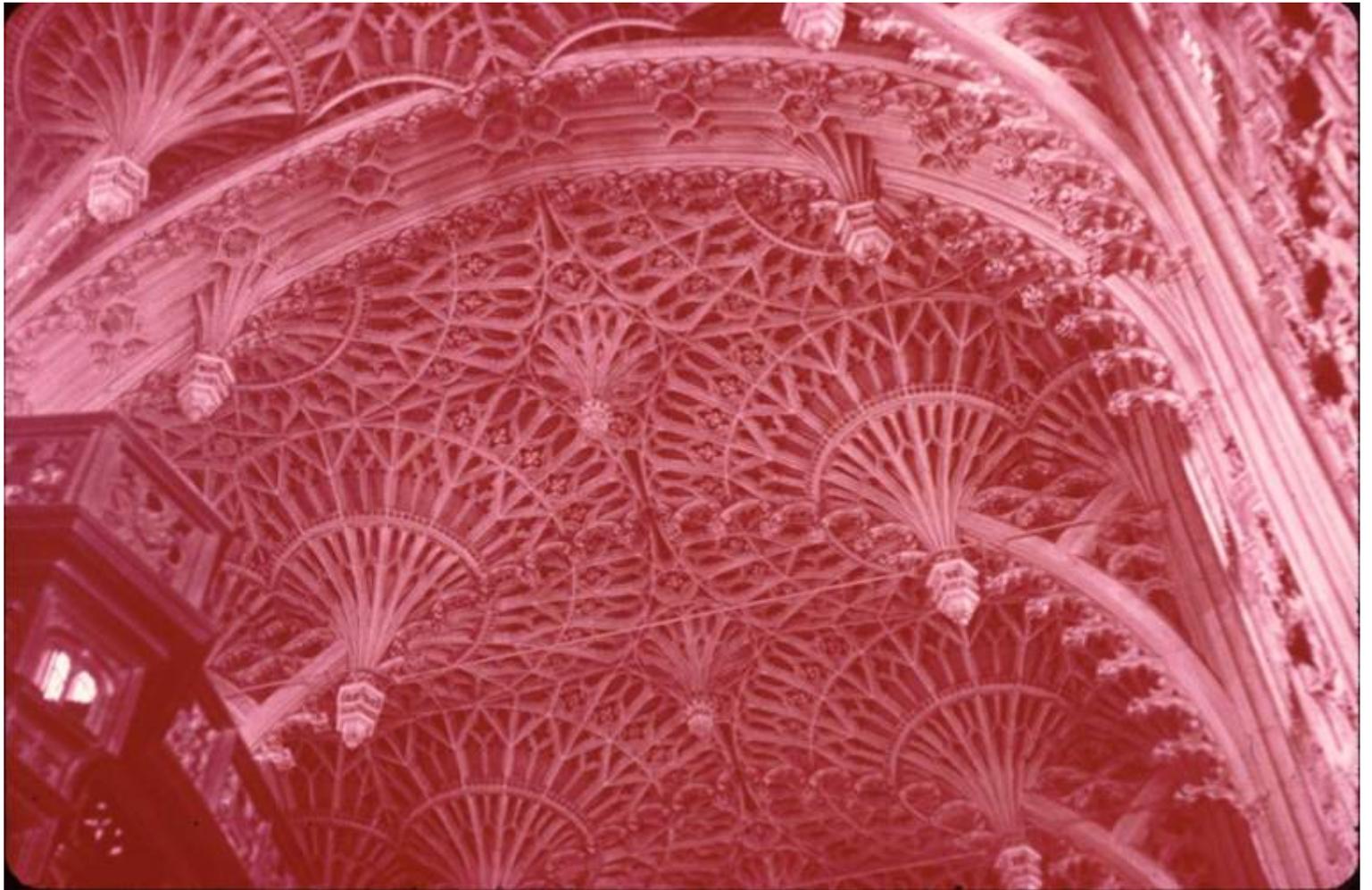


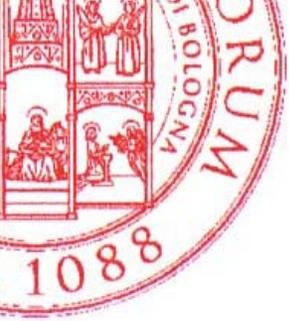
Per portare la curva delle pressioni a coincidere con la forma dell'arco principale occorre caricare l'arco "alle reni". Per questo motivo i ventagli laterali venivano caricati con forti pesi (tas de charge) o con i pendagli.



La Cappella di Enrico VII nell'Abbazia di Westminster possiede la più splendida fra tutte le volte a ventaglio. Il lavoro della volta fu iniziato attorno al 1500. L'ingegnosa progettazione della volta combina strutture a telaio e strutture a guscio. Archi trasversali massicci sostengono grandi pendenti prossimi ai muri della campata. I conoidi sono costruiti al di sopra dei pendenti. In corrispondenza di questi gli archi trasversali

penetrano nella superficie della volta passando dall'intradosso all'estradosso e correndo poi lungo la sua superficie superiore, cosicché gli archi non sono visibili nella parte centrale del soffitto. La maggior parte del peso viene assunta dall'arco nel punto, in corrispondenza del pendente, in cui attraversa la superficie del conoide. L'arco funziona come parte di un telaio di sostegno e il conoide come una struttura a guscio.





La prima corte rinascimentale

La prima corte rinascimentale fu
il regno Normanno di Sicilia.
(Jacques Le Goff).

Gli interessi per la cultura greca
erano presenti anche prima nel
VI, VII e IX secolo e furono
anche di carattere tecnico e
tecnico-scientifico: grammatica,
retorica, filosofia aristotelica e
neoplatonica, aritmetica e
geometria.

A Ravenna al tempo di
Giustiniano si attribuisce il
Fragmentum
Mathematicum Bobiense,
cod. ambrosiano L99 (una
trentina di fogli palinsesti) il cui
autore è stato identificato in
Antemio di Tralle, il
mechanikos/ matematico di
Santa Sofia.
Cosma l'italiota " ha scrutato
la totalità dello scibile umano".
Fatto prigioniero dagli Arabi
all'inizio dell'VIII secolo diviene
precettore di Giovanni
Damasceno in Siria in retorica,
filosofia, scienze
naturali, aritmetica, geometria,
musica e astronomia. (pag. 521
op. citata)



I grandi traduttori

La caduta di Bari nel 1071
segnò la fine del Regno
Bizantino in Italia ma non la
fine della presenza greca.

*(vedi G. Cavallo in I Bizantini in Italia, op.
cit. pag. 126)*

Ruggero I, conte di Calabria e
di Sicilia si circondò di
tecnocrati greci e i greco
rimase la lingua ufficiale della
amministrazione del regno.

Solo lentamente la classe
dirigente greca si
latinizzò assimilando la
lingua latina.

Alla fine del periodo
svevo, a parte alcuni
dotti, i greci superstiti
erano ridotti a frange
senza potere.

In Roma la cultura
bizantina si conclude nel
IX secolo. D'ora in poi
sarà **carolingia**.

In Sicilia e nell'Italia
meridionale l'elemento
greco resiste con
produzione libraria sacra
e profana.



In Sicilia, alla corte normanna si hanno le traduzioni **in latino dal greco** e dall'arabo di opere ellenistiche per merito di dotti noti (**Enrico Aristippo, Eugenio di Palermo**) e sconosciuti:

- Mechanica e Pneumatica di Erone
- Gli Elementi e Optica di Euclide
 - Almagesto di Tolomeo
- Elementatio phisycyca di Proclo
 - Syntaxis mathematica di Tolomeo

(dono di Manuele Comneno a Guglielmo I)

I dotti hanno a disposizione la "**Siracusarum et Angolicam Bibliothecam**" (Biblioteca greca di Siracusa). Della capacità della corte normanna di procurarsi i testi da Bisanzio ne sono prova splendidi manoscritti di opere scientifiche e filosofiche prodotti a Costantinopoli nel IX e X secolo che raggiunsero Palermo nel XII secolo (pag. 577). Lo standard di una buona biblioteca privata era di trenta libri.

La corte normanna sente gli stimoli della Rinascita del XII secolo che pervade l'Europa, ma la traduzione di **Tolomeo e di Euclide** è dimostrazione di una influenza della cultura bizantina e di emulazione della **Comnena**.



Il Rinascimento toscano

La scoperta dell'opera di Vitruvio avviene nel 1415.

Nasce la figura **dell'Ingegnere autore** che non esisteva più dai tempi di Vitruvio e di Erone Alessandrino. Questi scritti presentano una caratteristica importante: riportano **disegni** e illustrazioni esplicative, cioè

...." presentano una nuova dimensione del concetto di testo ..."

(Galluzzi, op. cit.).

"Si ha una contrapposizione della cultura dell'osservare e del fare rispetto alla cultura fondata sull'eloquenza e sulla retorica".

(vedi P. Galluzzi: Gli Ingegneri del Rinascimento. Catalogo della mostra omonima, Giunti Ed., Firenze 1996.)

Nasce allora il problema delle **due culture**.



La collaborazione tra artisti-ingegneri e umanisti

De Architectura di Vitruvio è decifrato con un lavoro comune tra le due culture.

Così per l'Ottica classica e medioevale con Lorenzo Ghiberti.

Così per la scienza della meccanica di Archimede e e per la geometria di Euclide. Non si hanno scritti o disegni del Brunelleschi (1377-1446).

Esistono testimonianze sul Brunelleschi come costruttore di orologi e naturalmente come orafo e come costruttore di effetti speciali.



Figure chiave di ingegneri/autori

Leon Battista Alberti (Genova, 1404 - Roma, 1472)

Taccola (Siena 1382 -1458)

Francesco di Giorgio (Siena 1439 -1501)

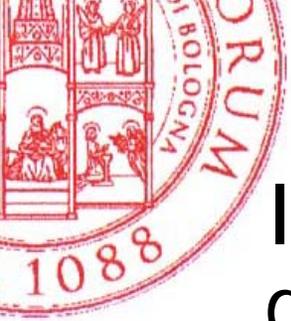
Giovanni Fontana (Padova 1400?- dopo il 1454)

Bonaccorso Ghiberti (Firenze 1451- 1516)

Giuliano e Antonio il Giovane da San Gallo

Roberto Valturio (Valturius) (Rimini, 1405-1475)

Leonardo (1452- 1519)



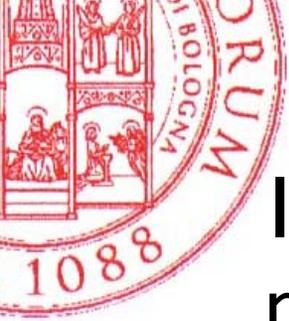
Il ruolo del disegno nella trasmissione del sapere tecnico/ scientifico

Da: H. Millon e V. Magnago Lampugnani a cura di: Rinascimento da Brunelleschi a Michelangiolo. (art. di Ubertus Gunter), Bompiani 1999

Di molte macchine si è sempre mantenuto la tradizione e l'uso dall'antichità o dal periodo ellenistico fino al Rinascimento.

Per altre, fu la rinnovata attenzione per il passato degli artisti e degli umanisti rinascimentali a trasmettere con disegni, la memoria di realizzazioni tecnico-scientifiche e di strutture significative.

"inizialmente si aprì una profonda frattura tra l'esigenza di analizzare gli scritti antichi e la realizzazione di questa stessa esigenza: gli architetti erano spesso privi delle conoscenze teoriche necessarie per comprendere i testi. Invece gli umanisti sovente non avevano la preparazione necessaria per farsi un'idea chiara sulle indicazioni complicate fornite da Vitruvio. cont."



In periodo rinascimentale (ri-)nascono i rilievi dal vero.

L'uso del disegno fu essenziale per stabilire le basi di una "tecnoscienza", in quanto richiede delle regole di corrispondenza tra il modello e la realtà che sono caratteristica essenziale del metodo scientifico.

Vedi: Alberto Pratelli: Il disegno di Architettura. Ed. Charta Milano, 1995

cont.: L'Alberti rappresenta un'eccezione poiché riuniva in sé entrambe le capacità..... Il suo trattato però presentava simili limiti come quello di Vitruvio: l'uso della lingua latina e la mancanza di illustrazioni ostacolavano la comprensione e perciò fu aspramente criticato da Francesco di Giorgio. Sarebbe stato necessario un artista che sapesse unire la conoscenza dei testi antichi con l'istruzione letteraria e che fosse contemporaneamente disposto a trasmettere il suo sapere, scrivendo in volgare e corredando l'opera con illustrazioni" (Op. cit., pag. 268)



Filippo Brunelleschi

Si tende ad escludere che egli conoscesse strumenti di modellazione teorica anche se la cupola (e il progetto di originalissimi argani e gru) fa pensare a conoscenze non intuitive di meccanica e di statica.

Rimane misterioso l'ispirazione delle invenzioni di Brunelleschi. Poco tempo dopo l'inizio del progetto arrivò a Firenze un grande numero di manoscritti greci di meccanica e di matematica.

Nel 1423, due anni dopo la costruzione dell'argano, un grande umanista siciliano **Giovanni Aurispa** portò da Costantinopoli un carico di 238 manoscritti in lingua greca (sei tragedie di Eschilo, sette di Sofocle, opere di Plutarco, Demostene e altri. Ma assieme a queste opere c'erano tutte le opere del geometra **Proclo di Aalessandria** e un trattato su **antiche tecniche di sollevamento di" le Collezioni matematiche di Pappo di Alessandria"**.

(Codice greco, Biblioteca nazionale di Parigi)

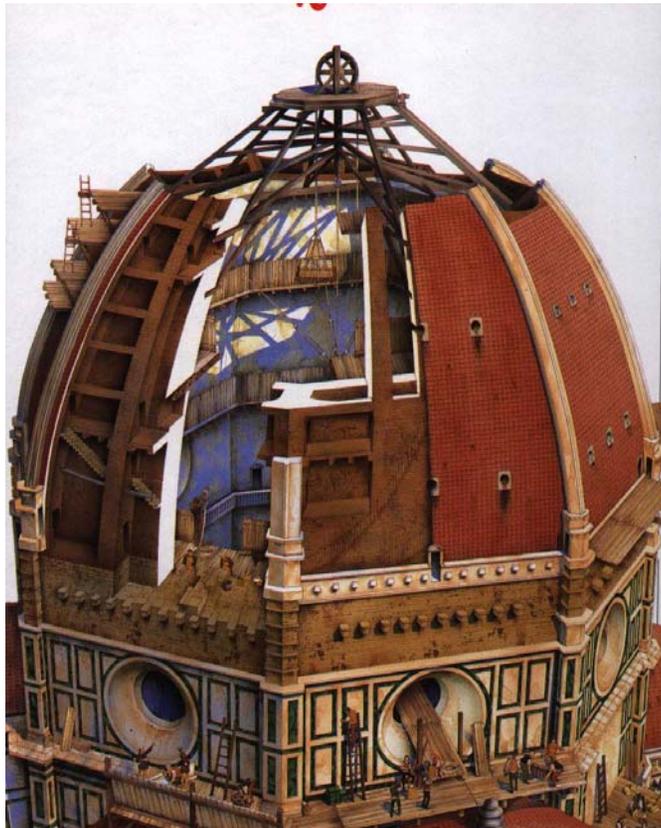


Brunelleschi conosceva le tecniche di costruzione orientali che avevano consentito la costruzione di cupole senza centine con l'uso della tecnica dei mattoni a spina di pesce?

Non è dato saperlo, ma la costruzione della cupola stabilisce comunque un nuovo paradigma strutturale.



La sperimentazione durante la costruzione (1420-1436)



：“.....perché la pratica insegna quel che si ha a seguire.....”

(Indicazione data dai committenti, cioè l'opera del Duomo, ai costruttori della cupola di Santa Maria del Fiore nel 1425)

Forse ispirato dal Pantheon, Brunelleschi genera, durante la muratura della doppia calotta, una struttura di rinforzo a meridiani e paralleli.

Prima potente espressione di una consapevole sintesi dei due mondi culturali romano e gotico.



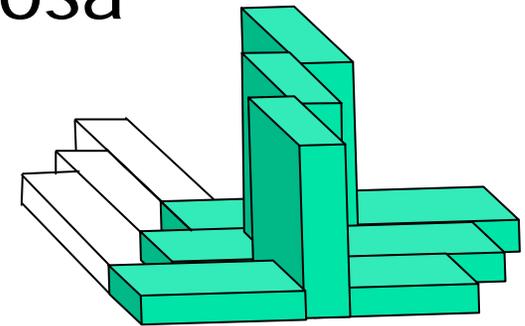
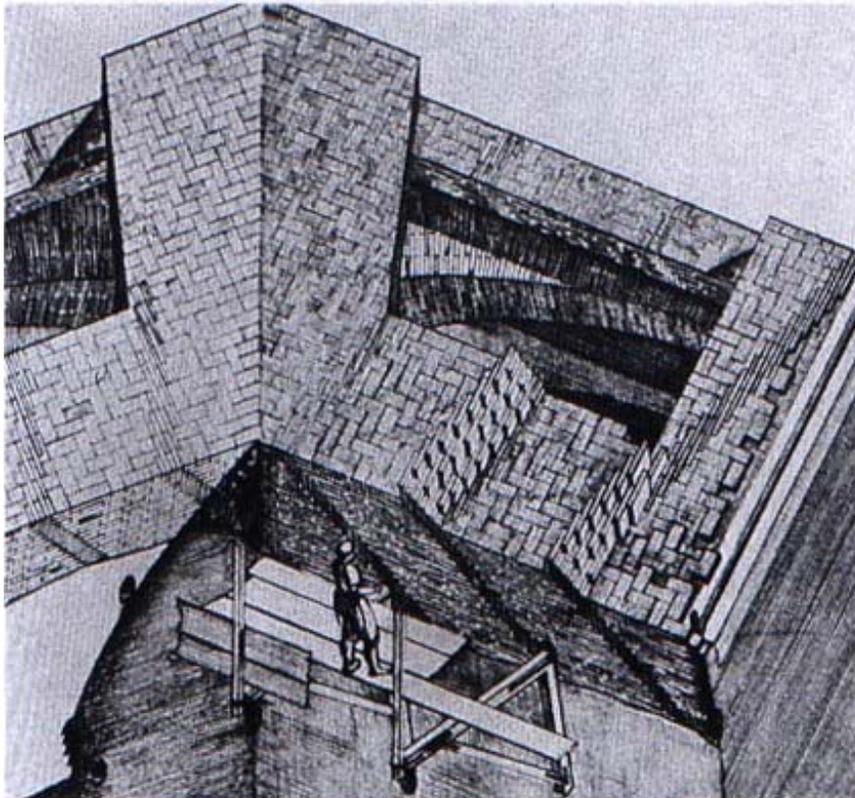
Esistono ancora oggi ipotesi
contrastanti sulla soluzione strutturale
(vedi S. Di Pasquale e Ross King).

Senza disegno esistono diverse
interpretazioni di una frase di
L.B. Alberti:

*“Anche la crociera composta si potrà innalzare senza
fare uso di armature purché all’interno del suo
spessore si inserisca una volta sferica. In tal caso
però occorrerà un saldissimo e strettissimo
collegamento tra le parti più debole e quelle più
robuste ...” (De Re Aedificatoria).*



La disposizione dei mattoni perpendicolari ai letti di posa



Disposizione dei mattoni a spina di pesce nei letti di posa per la creazione di guide verticali perpendicolari ai letti di posa e radiali rispetto all'asse della cupola evitano lo scivolamento dei mattoni durante la formazione dell'anello circolare che, una volta completato, si autosostiene.



La costruzione di modelli

Brunelleschi fa continuamente modelli di particolari e li dimostra agli operai praticamente, con la terra molle, con la cera, con legname, o con grosse rape tagliate col coltello;

Utilizza anche un modello "murato" di notevoli dimensioni, edificato ai piedi del campanile di Giotto nel 1430 per dimostrare ai committenti la tecnica costruttiva.

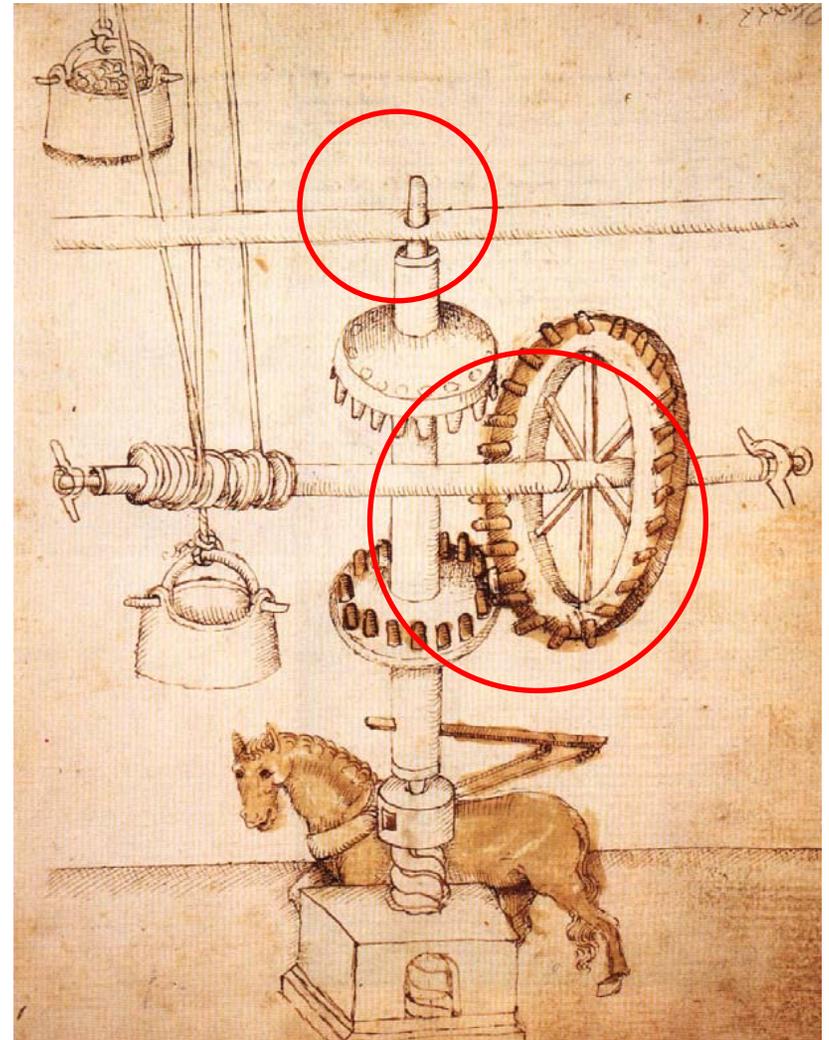
(Venne distrutto perché così grande da essere usato impropriamente dai fiorentini durante la notte. (vedi S. Di Pasquale, op. cit.).



Il disegno delle macchine

I disegni dell'argano principale attribuito a Brunelleschi, presentati da diversi autori, differiscono nella interpretazione e nella correttezza della rappresentazione.

Qui a fianco la versione del Taccola, senese.

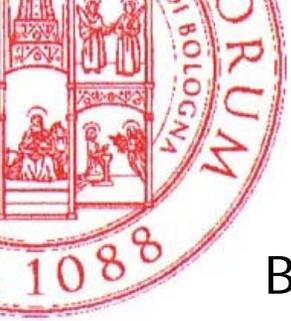




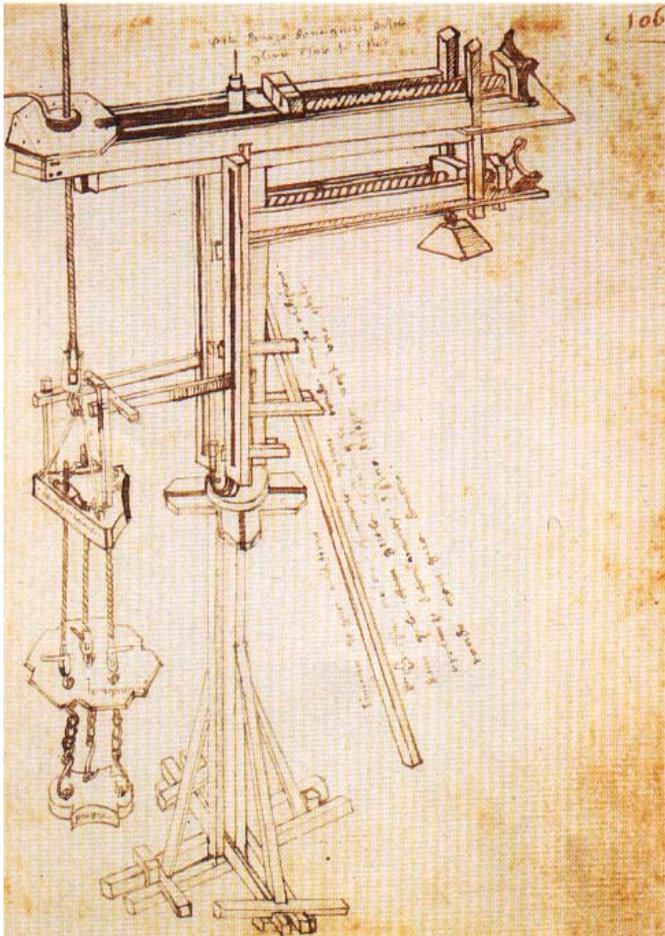
Si veda come era stato risolto il problema del perno dell'albero e lo si confronti con la soluzione precedente disegnata ma non realistica.



Parte di una macina presso una comunità di monaci copti (Deserto egizio, foto dell'A.)

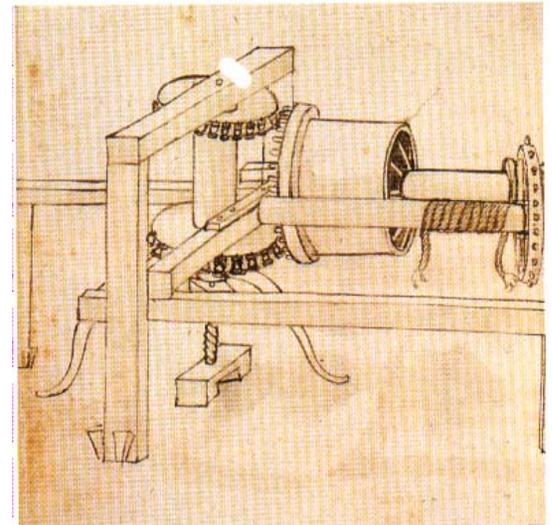


Bonaccorso Ghiberti: La gru girevole di 23 m di Brunelleschi

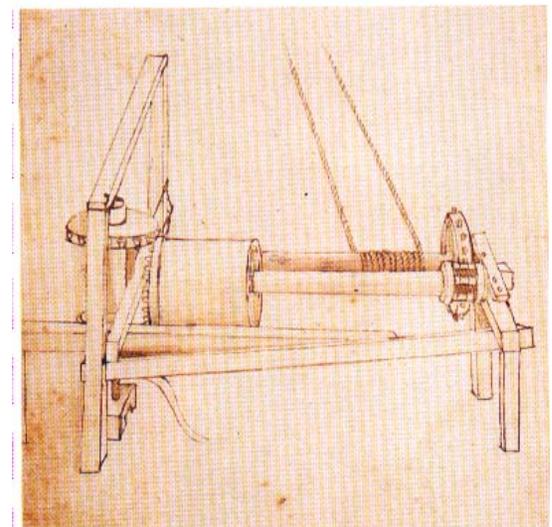




Bonaccorso Ghiberti:
L'argano del
Brunelleschi a tre
rapporti con ruote a
denti metallici
ruotanti.



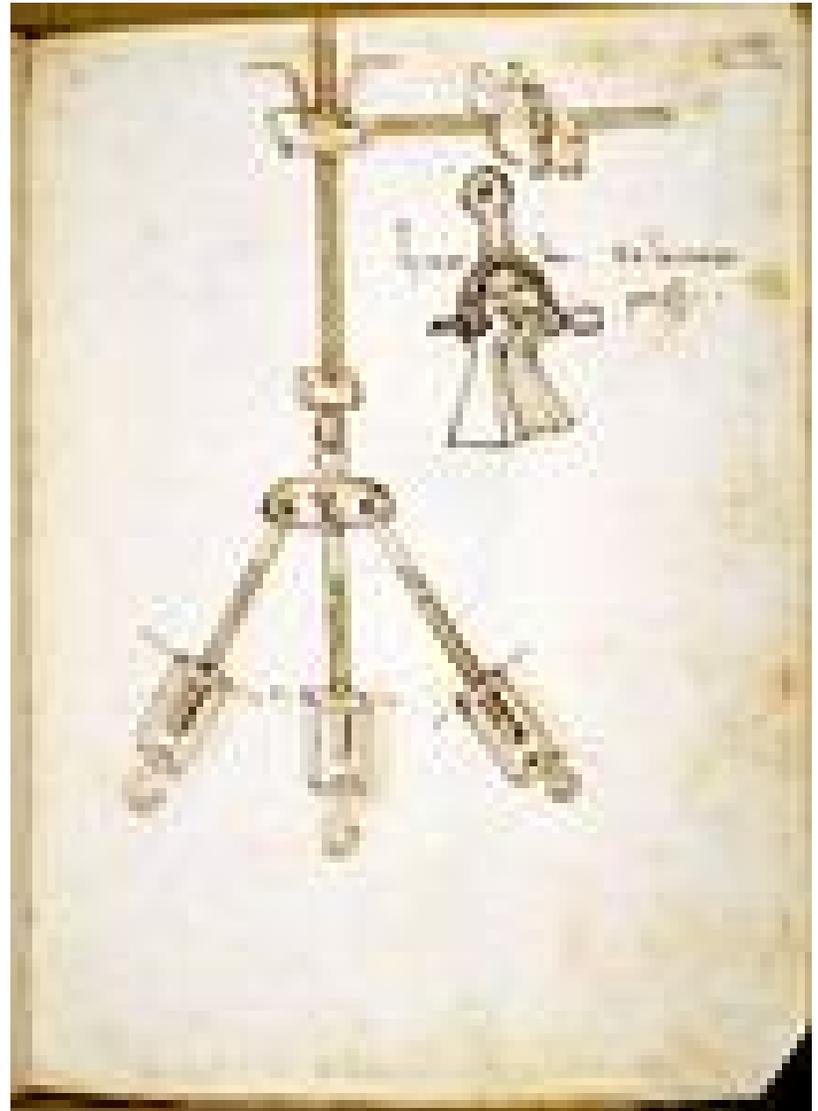
1.2B.1c

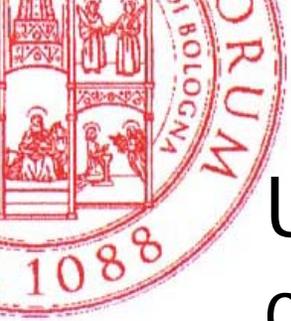




Bonaccorso
Ghiberti:

Ulivella con chiave
a coda di rondine





Un matematico pittore chiude un cerchio ideale tra il Rinascimento e la cultura greca

(Piero della Francesca 1412-1492): *Libellus de quinque corpibus regularibus*





BIBLIOGRAFIA

1. K. R. Popper: Tre saggi sulla mente umana, Vallecchi Ed. 1992
2. N. Abbagnano: Dizionario di filosofia, UTET 2001.
3. R. Carnap: Foundation of Logic and Mathematics, 1939. Vedi anche: I fondamenti filosofici della fisica (1967), Il Saggiatore, Milano, 1971.)
4. L. Russo: La rivoluzione dimenticata, Feltrinelli 2003
5. E. Grant : La scienza nel Medioevo, Il Mulino 1997
6. G. Pugliese Carratelli a cura di: I Bizantini in Italia, Garzanti Scheiwiller 1982
7. G. Ravegnani: I Bizantini e la guerra, Jouvence 2004
8. D. Quarante: Diseño Industrial Vol. 1 & 2 . Enciclopedia del Diseño CEAC S.A. Barcelona, 1992.
9. M. French: Invention and Evolution. Design in Nature and Engineering. 2th Ed. Cambridge University Press, 1994.
10. S. Selby: The visible Chinese Bow, 1999:
11. Geoffrey E. R. Lloyd, in La scienza dei Greci
12. F. Wickhoff: Arte romana, Le Tre Venezie, 1885, 1912, 1947
13. G. Galilei: Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze. Elzeviri 1638
14. R. Mark: Analisi fotoelastiche . Sta nelle Nuove Scienze. 1968?



BIBLIOGRAFIA cont.

15. G.L. Huxley: Anthemius of Tralles (Cambridge Mass., 1959)
16. R.J. Mainstone : Justinian Church of Santa Sophia
17. Cyril Mango: Architettura bizantina Electa 1989, Milano
18. A. Pertusi, a cura di: La caduta di Costantinopoli, fond. Valla A. Mondadori Ed. , Milano 1976, 2003
19. G. Hafner: L'Italia antica e Roma. Rizzoli Ed. 1970 pag.244
20. J.E. Gordon: Structures Penguin Book 1978
21. S. Gasparri: I Longobardi. Ed. Giunti, Firenze, 1990
22. P. Murrey: Architettura Rinascimento Electa 2000
23. P. Galluzzi: Gli ingegneri del Rinascimento, Giunti, Firenze, 1996
24. A. Pratelli: Il disegno di Architettura. Ed. Charta Milano, 1995
25. A. Grabar: Bisanzio Ed. il Saggiatore 1964
26. J. Gypfel: storia dell'architettura, Koenemann, 1999
27. H. P. L'Orange: Forme artistiche dell'Impero Romano, Jaca Book, 1999
28. G. Pugliese Carratelli a cura di: I Bizantini in Italia Garzanti Scheiwiller 1982
29. D. Talbot Rice: L'arte bizantina, Sansoni ed., Firenze 1966
30. D. Talbot rice: Arte bizantina, Universale Cappelli, 1958
31. H. Millon e V. Magnago Lampugnani a cura di: Rinascimento da Brunelleschi a Michelangiolo. Bompiani 1999
32. O. Belluzzi I e II Vol. Zanichelli Ed. Bologna.



BIBLIOGRAFIA cont.

33. E. Concina: La città bizantina Ed. Laterza 2003
34. A. Grabar: Bisanzio Il Saggiatore 1964
35. J. Gympel : Storia dell'architettura. Könemann 1999
36. G. Cavallo, V. Von Kalkenhausen et alii: I Bizantini in Italia Garzanti Schewiller, Utet,1993
37. A. Alpago Novello: Grecia Bizantina. Tamburini ed. 1969
38. R. Mantran : Costantinopoli ai tempi di Solimano il Magnifico: Rizzoli Ed. 1985
39. A. K. Bowman : L'Egitto dopo I faraoni. Giunti Ed. 1988
40. L. Brehier: Bisanzio. Vita e morte di un Impero ECIG Genova 1995
41. J. Beckwith: L'arte di Costantinopoli . Einaudi Ed. 1963
42. M. Chatzidakis, A. Grabar: La pittura bizantina e dell'alto medioevo. Club degli Editori, da Mondadori, 1965.
43. S. Di Pasquale: Brunelleschi : La costruzione della cupola di Santa Maria del Fiore. Marsilio Ed. 2002
44. Ross King : La Cupola del Brunelleschi
45. G. Fanelli e M. Fanelli: La Cupola del Brunelleschi, Storia e futuro di una grande struttura, : 2004 Mandragora Ed. ISBN 88-85957-90-0 *italiano*
46. Dictionary of Scientific Quotations (1991, Inst. of Physics Press),