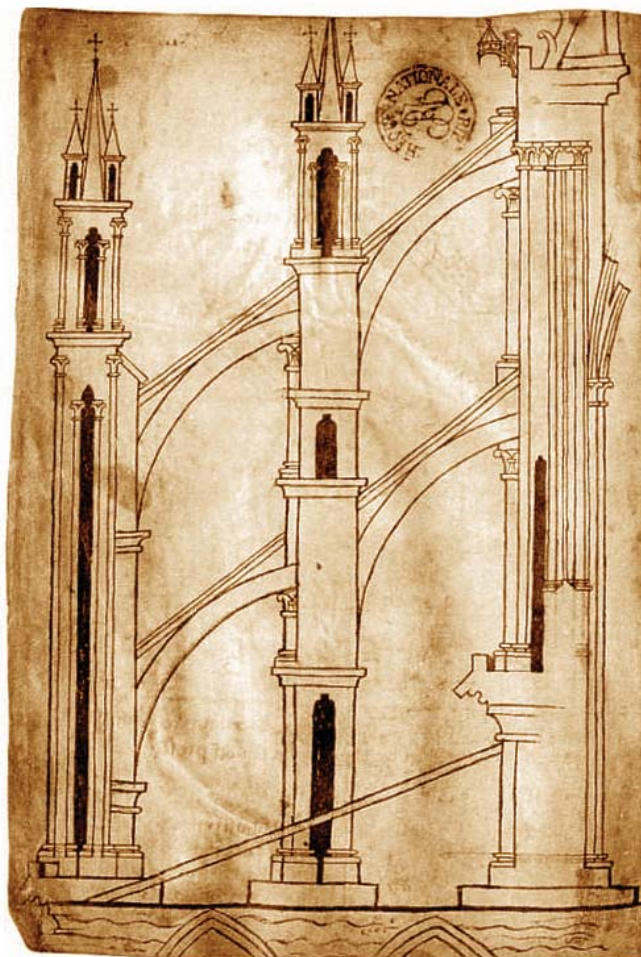


Daniela Galasso



## Villard de Honnecourt

*la rivoluzione strutturale del medioevo*



**ArchigraficaA** paperback

collana monografica on-line del semestrale di architettura, città e paesaggio **ArchigraficaA**

daniela galasso

## **Villard de Honnecourt**

*la "rivoluzione strutturale" del medioevo*

*presentazione di francesco abbate*

*Stampato in Italia*

© ottobre 2008 by ArchigraficaA

prima edizione per **ArchigraficaA**

formato *ebook for educational purpose*

Creative Common licence - con restrizioni

**ArchigraficaA**, *live architecture on the web*

[www.archigrafica.org](http://www.archigrafica.org)

info: [ricci@unina.it](mailto:ricci@unina.it)

testo di approfondimento tematico

in copertina: Villard de Honnecourt, *Cattedrale di Notre Dame a Reims*

ISSN 1974-2843

Archigrafica paperback

[online]

## Presentazione

*Se l'insieme strutturale di una cattedrale manifesta, anche ad una osservazione superficiale, la perfezione dell'equilibrio, non solo di forme, ma anche e soprattutto di strutture, ad un esame più approfondito il tema dell'equilibrio, il disegno stesso della struttura, il modo in cui è stata pensata e le tecniche impiegate, fanno pensare ad una logica strutturale che mai prima del XII secolo si era manifestata appieno.*

*L'abbandono da parte dei costruttori del continuum murario ed il passaggio ad un sistema di appoggi puntuali di strutture voltate sottende necessariamente, ben oltre l'implicito sviluppo di tecniche proprie di questa scelta, anche l'impiego di conoscenze geometrico-matematiche, non certamente nuove, ma mai prima d'allora impiegate appieno nella costruzione di un organismo architettonico.*

*Ed a un più accurato esame risulta che tutti i componenti strutturali di una cattedrale, dalle volte nervate al complesso sistema del contrasto delle spinte, sono riferibili a sistemi piani ed appunto in sistemi di equilibrio nel piano va ricercato il modello cui si sono ispirati gli architetti che hanno operato fra il XII e il XIII secolo.*

*Se il tentativo di ricostruzione del modello funicolare impiegato dai progettisti medievali nella "camera della tracciatura" può non portare alla ricostruzione esatta di quello realmente impiegato – del resto mancano del tutto descrizioni coeve – è pur vero che l'idea del "modello a bilance" ipotizzato da Daniela Galasso è quello più prossimo alla ricostruzione indiziaria, quello che, permettendo la ripartizione del peso complessivo della cattedrale nei suoi elementi strutturali, si avvicina maggiormente alla logica del tempo.*

*Del resto quando, sul finire del 1500, Stevino, sistematizzando il problema della funicolare dei carichi, ne dà la trattazione esatta ("meraviglia non è più meraviglia") e non tratta l'argomento come una novità ma ne parla come un fatto da tempo acquisito; mentre, precedenti alla sua trattazione, si hanno accenni all'impiego di modelli meccanici le cui descrizioni, vaghe e sommarie, fanno pensare che questi modelli fossero da tempo in uso, anche se non si conosce fino a che punto si spingessero nella determinazione compiuta della forma.*

*Lo studio di Daniela Galasso ha il pregio di aver colto il momento essenziale della "rivoluzione strutturale del medioevo" e di chiarire, attraverso il preciso confronto delle opere con quanto descritto da Villard de Honnecourt, l'evoluzione delle strutture delle cattedrali in relazione anche ad una precisa logica di ottimizzazione del cantiere; esso è inoltre un interessante ed originale approccio metodologico allo studio delle strutture in architettura che mette in evidenza il preciso rapporto fra la sollecitazione e la forma.*

*Per l'originalità che lo contraddistingue, questo studio e, meglio ancora, il suo metodo meritano di essere ulteriormente sviluppati da una studiosa che si è dimostrata capace di proseguire autonomamente le sue ricerche.*

*Francesco Abbate*

## Premessa

Una scala stretta si snoda in una torre in costruzione; una piccola porta compare all'improvviso. Dietro quella porta c'è una stanza: disegni sparsi un po' dovunque, un enorme tavolo di legno, modelli, sagome, sculture appena sbazzate, archipendoli, traguardi e strumenti per disegnare. Una stanza inaccessibile, vietata.

Così potrei immaginare una *chambre des traits*, ovvero la stanza di ogni cattedrale medievale nella quale il progettista si ritirava per studiare o disegnare; lo scrigno cioè in cui l'architetto della cattedrale conservava tutte le sue idee, le sue conoscenze, il suo mestiere.

Molto spesso, molte persone mi hanno chiesto quale potesse essere l'utilità di guardare tanti secoli indietro. Sperando di trovare cosa, di scoprire cosa?

Domande più o meno oziose, al pari di una serie di luoghi comuni riguardanti proprio il Medioevo.

Il cosiddetto secolo buio, per eccellenza; che ci ha lasciato invece in eredità le cattedrali, rari esempi di intelligenza, di fede, di arte, di tecnica, di scienza, di geometria e così continuando.

Qualche anno fa ho avuto la fortuna di imbarcarmi in un *Taccuino di disegni* o *Livre de portraiture*; un manoscritto di un architetto del XII secolo, Villard de Honnecourt.

Conteneva disegni belli come le cattedrali medievali, complessi come le cattedrali medievali.

Dunque ho iniziato a ricercare nel passato, sulle tracce di un'idea del mestiere di architetto: potrei dire di aver scoperto il modo per far quadrare il cerchio o quello per realizzare il muro perpetuo.

Forse ho scoperto molto di più, nel senso che il *Livre de portraiture* di Villard è ancora più prezioso di qualunque sfida all'impossibile: perché andando avanti nello studio dei disegni in esso contenuti, le cattedrali medievali mi sono sembrate oggetti sempre più possibili, o meglio gli unici oggetti possibili o adeguati alla qualità dei loro costruttori.

Forse guardare al passato può servire per riscoprire la sapienza del costruire.

Dedico pertanto questo mio studio a tutti coloro che riescono ad essere grandi maestri, pur non avendo la pretesa di diventare tali.

# La cattedrale medievale

Metafisica della luce e sperimentazione strutturale, simbolismo e tecnologia, fede e ragione. Il pensiero medievale oscilla fra questi opposti termini e trae dalla loro compresenza dialettica motivo e modo per rinnovarsi; la cattedrale medievale ha vita grazie ad essi e ne diventa strumento unificatore.

Le dottrine medievali di Gilbert de la Porreé, Rupert von Deutz, Wolofried Strabo, Onorio, Bonaventura, Alberto Magno, San Tommaso, originatesi a loro volta dalle teorie sull'illuminazione elaborate fra il III e il V secolo da Porfirio, Plotino e Sant'Agostino, da pensiero diventano realtà tangibile nelle grandi vetrate colorate delle cattedrali, racconti in luce delle Sacre Scritture e delle vite dei Santi, della Madonna e di Gesù Cristo, ma anche rappresentazione dei tagliapietre, degli scultori o dei mercanti, insomma di uomini comuni. Perché se il cammino che si può e si deve compiere nella cattedrale è un cammino di fede, il luogo in cui questo cammino si rende possibile nasce dall'uomo, dal suo lavoro, dall'applicazione della sua ratio.

Le grandi vetrate diventano possibili perché l'uomo studia il modo per scindere l'organismo edilizio in struttura portante ed elementi portati e questi ultimi ormai non necessari perché privi di funzione di sostegno, possono essere sostituiti dai trafori delle vetrate e dei rosoni. Tutto il cantiere di una cattedrale, dagli scalpellini ai carpentieri, ai vetrai, ai tagliapietre è glorificazione di Dio ma anche dell'uomo.

Ed è proprio l'interesse per l'uomo la grande novità del Medioevo, la fede nel suo progresso la chiave per capirne ogni aspetto.

Scrive Gilbert de Tournai, teologo francescano del XIII secolo: “Non troveremo mai la verità se ci accontentiamo di ciò che è già stato scoperto. Quelli che hanno scritto prima di noi non sono dei padroni ma delle guide. La verità è aperta a tutti e non è ancora stata trovata per intero.”

Bernardo di Clairvaux (1091-1159) e Pietro Abelardo (1079-1142) si scontrano sulla contrapposizione della ragione alla fede, predicando il primo la necessità di un atteggiamento di amore ed umiltà dinanzi alla Verità inconoscibile e indiscutibile, il secondo la possibilità di spiegare quella Verità con l'intelletto.

Fra il XII e il XIII secolo nasce appunto il concetto di filosofia accanto a quello di teologia, a sottolineare l'autonomia e la libertà della ragione rispetto alla fede; si diffonde lo studio di Aristotele, di cui si leggono e discutono gli scritti di logica, di fisica, di politica e di morale.

Dunque il pensiero si apre alla scienza, si abitua alla dialettica, al ragionamento, alla confutazione e si avvicina

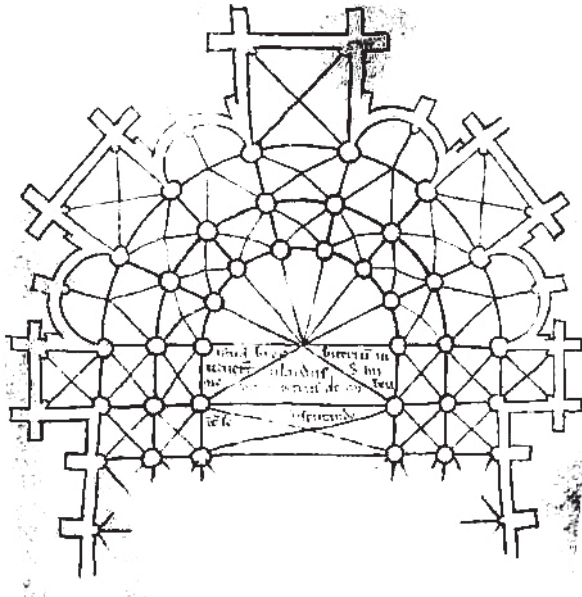


fig. 1

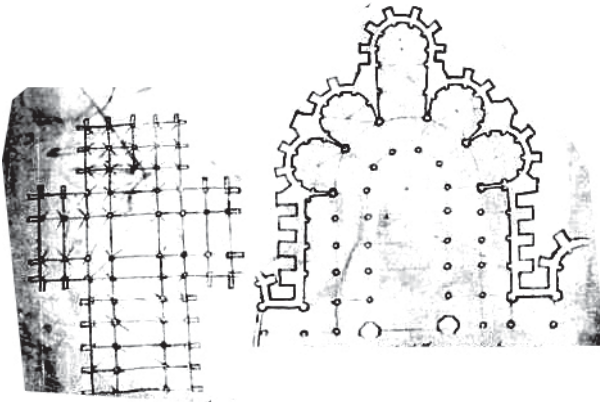


fig. 2

con interesse anche allo studio della natura, dei suoi fenomeni, delle sue leggi. Dirà San Tommaso (1225-1274): “Dio si rallegra di tutte le sue cose, perché ognuna è in armonia con il suo Essere”. Perciò il divino può essere rappresentato e prendere le sembianze del terreno e l’uomo può finalmente arrivare a Dio valorizzando tutto se stesso senza mortificare la sua ineliminabile natura umana.

Per questi motivi la sfida lanciata dai costruttori a se stessi nel superamento di ogni limite strutturale o costruttivo diventa necessaria e nello stesso tempo possibile.

## Villard de Honnecourt

C’è un luogo, il nord della Francia, è c’è un tempo storico, gli anni compresi fra la seconda metà del 1100 e la prima metà del 1300, nei quali la costruzione delle cattedrali raggiunse il suo livello massimo, sovvertendo e nel contempo migliorando, ovvero sfruttando in maniera ottimale, qualsiasi regola precedente del costruire. Un testimone di questo fondamentale momento dell’architettura, dell’arte, della tecnica, della cultura e della storia dell’uomo fu Villard de Honnecourt; oggetto di questa testimonianza è un prezioso “Taccuino di disegni” o *Livre de portraiture*, di cui Villard è l’autore certo.

Secondo Jaques Le Goff Villard de Honnecourt fu lo sconosciuto architetto della cattedrale di Košice, in Ungheria<sup>1</sup>. Oltre a questa notizia ben poco si conosce a suo riguardo: si sa infatti soltanto che egli nacque in Piccardia, regione situata nel nord della Francia, a Honnecourt-sur-Escault, e che ricevette la sua educazione nella vicina abbazia cistercense di Vaucelles<sup>2</sup>.

L’analisi di tutto quanto è contenuto del Taccuino di disegni, didascalie e disegni, cioè, può aiutare a tracciare un profilo più preciso del suo autore.

Nel foglio 17r del Taccuino è contenuta la pianta del coro di Notre-Dame a Vaucelles (fig.1), che è la chiesa dell’abbazia cistercense nella quale Villard compì i suoi studi. Agli inizi del 1100 a Cambrai, città nei pressi di Vaucelles, si iniziò la costruzione della cattedrale: nel foglio 14v del Taccuino Villard ne riportò la pianta del coro e, accanto ad essa, la pianta di una chiesa dell’ordine cistercense (fig. 2). Si dà il caso che la pianta di quest’ultima chiesa risulti simile a quella di una delle grandi cattedrali cui si lavorò nel nord della Francia tra il XII e il XIII secolo: la cattedrale di Notre-Dame a Laon. Se non fosse per una differenza fondamentale: la

1 J. Le GOFF, *Das Hochmittelalter*, Frankfurt am Main, 1965, trad. it. Milano, 1967.

2 E. DI MAJO COLDAGELLI, Voce “Villard de Honnecourt” in *Dizionario Enciclopedico di Architettura e Urbanistica*, Roma, 1969.

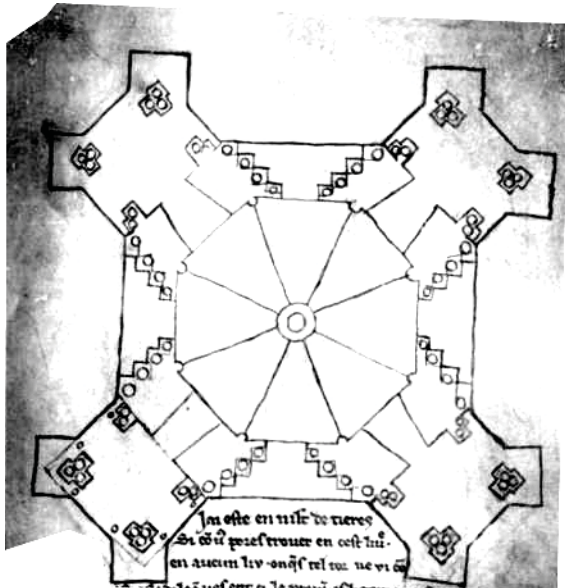


fig. 3

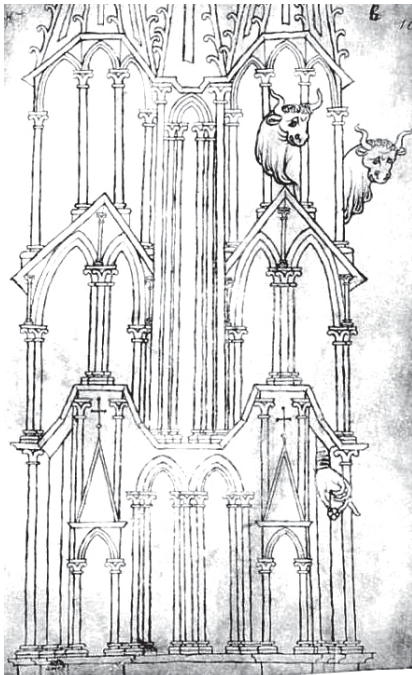


fig. 4

chiesa disegnata da Villard de Honnecourt è coperta unicamente da volte quadripartite, la cattedrale di Laon presenta successione di volte esapartite a copertura della navata maggiore.

La costruzione di Notre-Dame a Laon fu iniziata nel 1160 e coperture a volte esapartite compaiono anche nella navata maggiore della cattedrale di Notre-Dame a Parigi, cui si iniziò a lavorare nelle più antiche cattedrali di Saint'Etienne a Sens e di Notre-Dame a Noyon (fig.6), alle quali si iniziò a lavorare intorno al 1130.

I costruttori cistercensi avevano iniziato nella seconda metà del 1100 la costruzione della chiesa dell'abbazia di Ebrach, in Germania: la pianta di questa chiesa non è dissimile da quella disegnata da Villard de Honnecourt e come quest'ultima fu coperta interamente con volte quadripartite.

Ciò può significare che i cistercensi a quell'epoca avevano già definitivamente risolto il problema della copertura delle navate maggiori delle chiese, preferendo alle volte esapartite, o a qualsiasi altro tipo di copertura, le volte a crociera quadripartite.

La qual cosa potrebbe spiegare perché Villard de Honnecourt, allievo di una scuola cistercense, quando visitò il cantiere della cattedrale di Laon trasse motivo di meraviglia esclusivamente dai campanili, dei quali la regola cistercense proibiva categoricamente la costruzione, rappresentandoli doviziosamente in pianta e in alzato (figg.3 e 4) e omettendo invece il disegno dell'impianto complessivo della cattedrale.

Ad ulteriore conferma di quanto la ricerca dei costruttori cistercensi, riguardo ai problemi relativi all'arte del costruire, fosse già molto avanzata intorno alla metà del 1100, propongo il seguente esempio: il complesso abbaziale di Maulbronn, in Germania. In esso i tipi di volta usati per coprire i vari ambienti sono molteplici dalle volte quadripartite a quelle esapartite, ai sistemi più complessi: come il particolare tipo di volta presente in una sala rettangolare adiacente ad uno dei lati del chiostro e prossima all'abside della chiesa.

Su di esso mi voglio soffermare perché nel foglio 21r del *Taccuino* (fig.5) Villard annotò un tipo di volta ad essa molto simile, presentandola come un buon modo per coprire un ambiente a pianta quadrata, collegando otto colonne ad una sola<sup>3</sup>.

Che cos'ha di particolare questa volta?

Confrontiamola con la volta della lanterna della cattedrale di Notre-Dame a Laon: essa è suddivisa in otto spicchi mediante otto nervature, delle quali quattro si innestano nei vertici di imposta della volta e quattro nella metà di ciascuno dei lati. In questo modo risultano più sollecitati proprio i punti critici del sistema, cioè i vertici del quadrato (punti deboli di per sé in quanto ottenuti dal concorrere di due diverse direzioni) e le metà dei lati, corrispondenti queste ultime alle chiavi delle grandi arcate sottostanti per le quali, ai fini dell'equilibrio, risulterà necessaria l'adozione di un sesto adeguato.

Nello schema di Villard a questi otto costoloni fondamentali vengono aggiunte otto coppie di costoloni, che collegano in coppie i costoloni fondamentali adiacenti per poi innescarsi nei lati del quadrato di imposta. A circa 1/3 e 2/3 di ognuno dei lati stessi. In questo modo si evitavano di caricare appunto i vertici di imposta della volta e le metà dei lati.

3 "Par chu met om on capitel d'uit colonbes a one sole; s'en n'est mies si encombrés, s'est lo machonerie bone" da Villard DE HOONECOURT, *Livre de portraiture*, manoscritto n. 19093 della Biblioteca Nazionale di Parigi, XIII secolo.

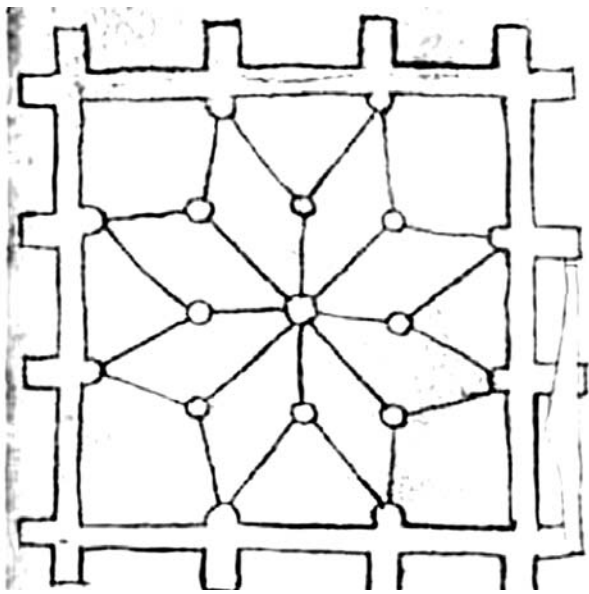


fig. 5

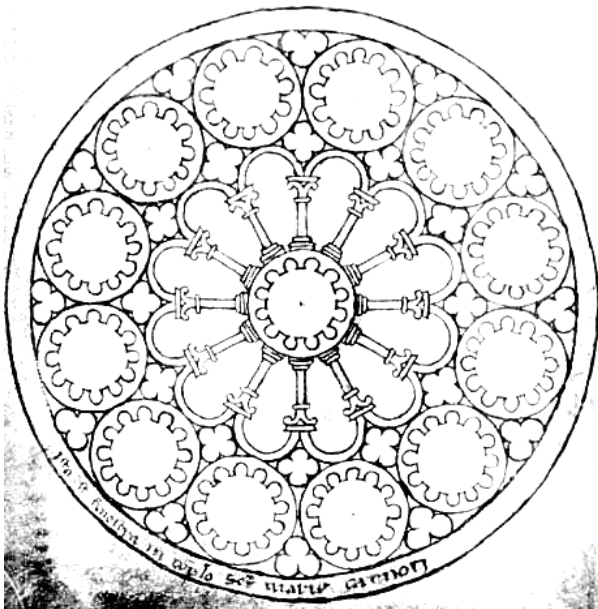


fig. 6

Ritengo pertanto probabile che Villard de Honnecourt abbia annotato nel Taccuino alcuni dei segreti costruttivi che aveva appreso presso i cistercensi e che ad essi egli abbia aggiunto quelli appresi recandosi a visitare i cantieri delle cattedrali allora in costruzione.

Infatti della cattedrale di Notre-Dame a Chartres (data di inizio dei lavori 1194) egli disegnò unicamente lo schema di un rosone (fig. 6); nella realtà i rosoni di Chartres furono realizzati secondo un altro schema in cui una più attenta disposizione dei vuoti e dei pieni portava ad avere minori problemi di stabilità.

Della cattedrale di Notre-Dame a Reims, di cui si iniziò la costruzione nel 1211, Villard disegnò il particolare di una delle finestre, qui per la prima volta realizzate in modo da risultare indipendenti dalla muratura circostante, così da non risentire dei suoi assestamenti (fol.10v) ed una serie di altri particolari: gli archi rampanti delle cappelle absidali (fol.32v)(fig.7), particolari della costruzione dei pilastri, delle loro sagome in legno e del taglio delle pietre (fol.32r), gli alzati interno ed esterno delle cappelle absidali (foll.30 v, 31r), gli alzati interno ed esterno dei muri perimetrali (fol. 31v)(fig. 8).

E' come se Villard de Honnecourt non si fosse recato nei cantieri di queste cattedrali con l'intento di riprodurre compiutamente e meccanicamente ma piuttosto con quello di annotare eventuali soluzioni innovative, problemi costruttivi, metodi e tecniche più evoluti.

Una questione che è necessario affrontare è quella relativa al fatto che tra i disegni di Villard e la realtà non sia verificabile una perfetta corrispondenza come si è già sottolineato riguardo ai rosoni della cattedrale di Chartres. Ciò significa probabilmente che egli aveva modo di visionare i disegni di progetto, cioè di avere accesso alla cosiddetta *chambre des traits* ovvero alla stanza in cui, in ogni cattedrale, lavorava il progettista. La qual cosa ha una certa rilevanza se si pensa che non era per niente facile avere un simile permesso, dal momento che il progettista di una cattedrale (o maestro murario o architetto) raramente era disposto a rivelare i segreti della sua arte, faticosamente conquistati durante il suo apprendistato, studiando e spostandosi di cantiere in cantiere.

A riguardo sottolineo da un lato che Villard de Honnecourt per due volte ricorda nel Taccuino di essere stato in Ungheria, o meglio di esservi stato mandato<sup>4</sup> e dall'altro riporto una notizia tratta da un testo scritto da Arnold Hauser<sup>5</sup>, secondo la quale difficilmente i monaci sceglievano la professione di architetto, data la discontinuità delle attività edilizie nei singoli conventi, ma vi erano comunque delle eccezioni, dimostrazione ne sia la storia di Achard, frate del monastero di Clairvaux, messo a disposizione di altri conventi e fabbriche religiose dall'abate di Clairvaux in persona, ovvero San Bernardo.

Mi piace di conseguenza pensare che Villard de Honnecourt possa essere stato il miglior allievo in architettura della scuola dell'abbazia di Vaucelles (subordinandosi forse egli stesso alla regola cistercense) e che per questo abbia goduto del privilegio di essere mandato in Ungheria e nei cantieri delle più importanti cattedrali

<sup>4</sup> "vesci une des formes de Raims, des espaces de le nef, teles com eles sunt entre JJ.pilers, j'estoie mandés en la tierre de Hongrie, quant jo le portrais, por ço l'amai jo miex" (fol. 10v), "J'estoie une fois en Hongrie, la u je més maint jor, la vi jo le pavement d'une glize de sifaite maniere" (fol.15v) da Villard, *op.cit.*

<sup>5</sup> A. HAUSER, *Sozialgeschichte der kunst und literatur*, München 1955, Torino, 1955.

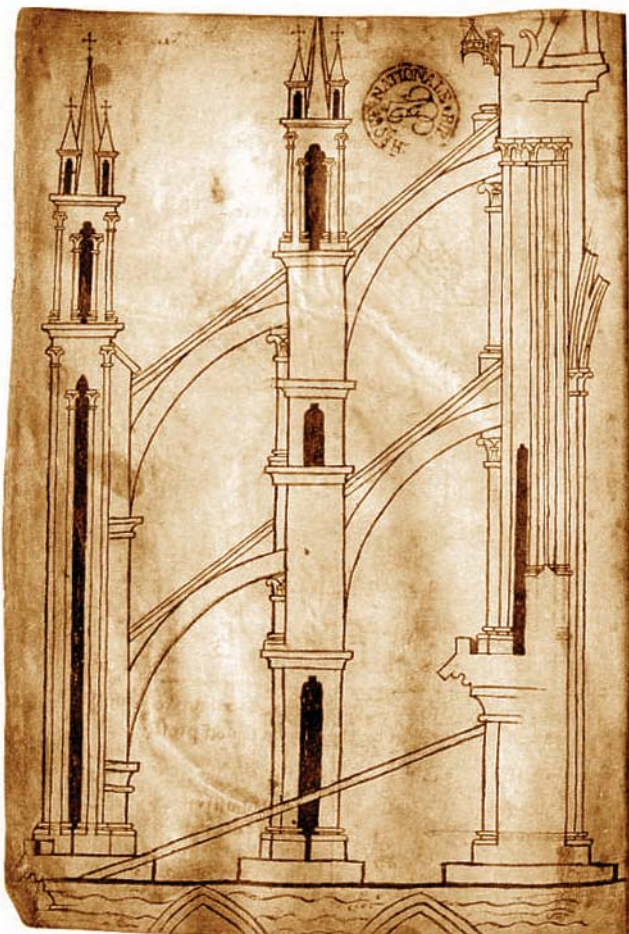


fig. 7

in costruzione; come inviato da un ordine monastico molto potente egli avrebbe avuto così facile accesso alla *chambre des traits*, visto che nessun architetto avrebbe ritenuto certamente opportuno negare un favore a quest'ordine. Senza escludere che, essendo le scuole delle abbazie delle vere e proprie scuole di formazione di artigiani ed architetti, forse gli stessi architetti avevano compiuto i loro studi in scuole abbaziali cistercensi e dunque avevano un motivo in più per sentirsi obbligati a mostrare loro una certa benevolenza.

Tenendo presente che nelle scuole abbaziali cistercensi si studiavano certamente una serie di materie quali l'arte della rappresentazione artistica, l'arte della copia dei codici, la geometria, l'arte del costruire e inoltre l'idraulica e il modo di costruire macchine lavoranti a energia idraulica, arte cui i cistercensi dedicavano particolare attenzione, si può trovare ulteriore conferma degli strettissimi legami intercorrenti fra i cistercensi e Villard de Honnecourt in tutta un'altra serie di disegni contenuti nel Taccuino: da uno studio sugli atteggiamenti dei dodici Apostoli (fol. 1v), agli esempi di sega idraulica (foll. 20r, 23r), dai procedimenti e tracciati per l'edilizia (fol. 20r) ai modelli per il disegno (foll. 18v, 19r), dagli studi per un monumento antico (fol. 6r) alla lettera iniziale S (fol. 6v.). Proprio la varietà del contenuto del Taccuino mi induce ad un'ultima considerazione.

Il progettista di una cattedrale medievale doveva essere esperto non solo dell'arte del costruire ma anche di tutte le altre attività del cantiere, dovendole seguire tutte in prima persona, essere in grado di coordinare e fornire qualsiasi soluzione a qualsiasi tipo di problema; negli anni in cui Villard de Honnecourt si dedicava al Taccuino nella città di Cambrai, vicinissima a Vaucelles e quindi all'abbazia presso la quale lo stesso Villard aveva studiato, si era dato inizio alla costruzione della cattedrale e nel commento ai disegni contenuti nei fogli 30v e 31r, relativi agli alzati interni ed esterni delle cappelle absidali della cattedrale di Reims, egli scrisse che quelli della cattedrale di Cambrai, se mai fossero stati costruiti, si sarebbero dovuti costruire in maniera diversa<sup>6</sup>.

Perché Villard ritenne di poter proporre una soluzione valida per la cattedrale di Cambrai?

Si è precedentemente sottolineato come nel Taccuino Villard abbia annotato tutte le sue conoscenze, tutti i segreti appresi sia nella scuola dell'abbazia di Vaucelles che nei cantieri delle cattedrali visitate: il Taccuino potrebbe pertanto essere considerato una sorta di curriculum vitae del suo autore messo a punto per proporsi come progettista della cattedrale di Cambrai. Forse effettivamente Villard fu l'architetto di questa cattedrale, forse la sua vita si interruppe durante la costruzione di questo edificio. Per una ironia del destino la cattedrale di Cambrai è uno di quei pochi edifici costruiti in Francia tra il XI e il XIII secolo che il tempo non ha risparmiato; la sua *chambre des traits* non potrà svelarci quest'ultimo segreto.

<sup>6</sup> "Et en cele autre pagene poés vos veir les montées des capirle de la glize de Rains par de hors, très le comencement descì en le fin, ensi com eles sunt. D'autre tel maniere doivent estre celes de Cambrai, s'on lor fait droit. Li daerrains entavlemens doit faire cretiaus", da op.cit.

## La volta a crociera e la trasformazione dell'idea di edificio



fig. 8

La grande lezione dei costruttori medievali credo possa riassumersi in una breve frase: necessità bellezza del costruire con arte. Si intenda però che alla parola “arte” non deve essere legato il significato restrittivo attribuitole dal lessico moderno, quanto piuttosto quello proprio della cultura medievale: arte sarà dunque non solo una qualità estetica ma soprattutto un modo di fare con ingegno, studio ed esperienza, un mezzo ingegnoso per raggiungere uno scopo.

In virtù di questa arte il costruire diventa ricerca continua, sperimentazione estrema, amplificazione delle possibilità umane; perché l'ingegno col passare del tempo non può che affinarsi, se non ci si siede sulle acquisizioni passate.

E l'arte è anche un'eredità che si tramanda, che si affida in custodia a chi è desideroso di apprenderla per non lasciarla morire; soprattutto perché grazie all'arte ogni problema diventa risolvibile e da ogni limite si può trarre un ulteriore stimolo a migliorarsi.

In questo senso le scuole della abbazie da un lato e le botteghe delle corporazioni dall'altro possono indicarsi come inestinguibili serbatoi di arte; arte che diventa mestiere ovvero attività dell'uomo al suo più elevato grado. Il passato diventa così necessaria condizione per il presente. Perciò la lezione dei costruttori medievali è anche una lezione di umiltà, nell'intelligenza di saper guardare al lavoro di quanti li avevano preceduti come ad una guida inestimabile da utilizzare per risolvere i nuovi problemi del costruire.

La volta a crociera medievale nasce come evoluzione di quella romanica, a sua volta derivante da quella romana.

Quale fu il contributo dei costruttori medievali in questo senso?

I Romani arrivarono alla configurazione della volta a crociera partendo dalla volta a botte e cioè facendo intersecar, perpendicolarmente l'una all'altra, due volte a botte a tutto sesto. La volta derivante da questa operazione presentava i quattro archi perimetrali a tutto sesto; le curve di intersezione delle due volte a botte erano semiellissi.

Il materiale con il quale i romani realizzarono queste volte era il conglomerato cementizio; talvolta essi ponevano dei filari di mattoni a rinforzo degli archi. Per ogni volta a crociera venivano realizzati due tipi di centine: quelle dal profilo a tutto sesto per gli archi perimetrali e quelle dal profilo semiellittico per gli archi diagonali. La tecnica di messa in opera del conglomerato cementizio permetteva, una volta realizzate le suddette centine e approntate le cassature per le vele, di concludere la costruzione effettuando un unico getto di materiale. L'operazione risultava piuttosto semplice e perciò ad essa poteva attendere anche manodopera non specializzata. Ciò costituiva naturalmente un vantaggio di natura economica, perché il lavoro non specializzato poteva essere corrisposto con salari più bassi. D'altra par-



te proprio la semplicità delle operazioni relative alla preparazione e alla in opera del conglomerato cementizio permisero molto spesso l'utilizzo di contingenti militari, soprattutto per la costruzione delle opere pubbliche. Definirei la volta a crociera romana un elemento continui, congruente alla contemporanea idea di edificio e alle caratteristiche stesse del materiale usato, nonostante l'evidente intuizione dello sviluppo di particolari comportamenti strutturali a seconda della conformazione della massa stessa (Roma, basilica di Massenzio). Cosicché direi che i romani usarono un materiale corrispondente alla loro idea di edificio e viceversa, quest'ultima influenzò il primo.

La discretizzazione della massa muraria indotta dall'adozione di conci relativamente piccoli di materiale lapideo non poté allora non portare alla definizione di una nuova idea di edificio.

Quando i costruttori romani avevano ritenuto opportuno rinforzare gli archi della volta a crociera con filari di mattoni avevano in fondo sottolineato un problema costruttivo e intuito un modo di risolverlo.

Le mutate e rovinose condizioni economiche imposero ai costruttori romani l'utilizzo dei materiali reperibili sul luogo, evitando più ingenti spese di trasporto ed eliminando anche le spese relative all'acquisto di materiale proveniente da altri paesi. La riduzione dello stesso materiale in piccoli conci ne facilitava le modalità di carico, scarico, trasporto e messa in opera. Ma al materiale bisognava adeguare le tecniche costruttive.

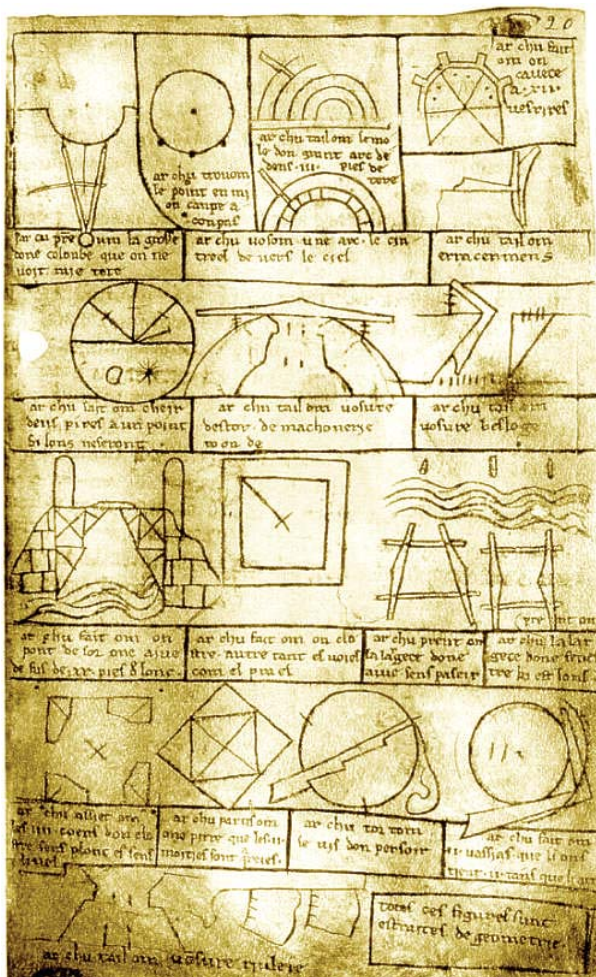
Le volte a crociera messe in opera dai costruttori romani presentano dei veri e propri archi in conci di pietra uniti con malta, sui quali poggiano gli apparecchi delle vele.

Alla difficoltà di approntare cinte ellittiche e alla necessità di migliorare il comportamento statico della volta essi risposero adottando il profilo a tutto sesto per gli archi diagonali e, ferma restando l'adozione di campate quadrate, modificando il sesto degli archi perimetrali, introducendo l'uso del profilo a sesto acuto.

Probabilmente questo tipo di profilo era entrato nella cultura dei costruttori romani grazie ai rapporti sempre più fitti che vennero a intrecciarsi fra l'Oriente e l'Occidente; gli archi a sesto acuto realizzati con piccoli conci di materiale lapideo o laterizio erano infatti a quell'epoca già da tempo nella tradizione costruttiva orientale. E certamente l'esperienza ne aveva fatto intuire il diverso comportamento statico, attraverso la diversità della modalità di rottura e le conseguenti necessità di carico ai fini del raggiungimento dell'equilibrio. Mi riservo di approfondire più avanti questo argomento per sottolineare invece immediatamente altre questioni.

Gli edifici romani hanno ancora masse murarie di notevoli spessori, interrotte da ben poche discontinuità; nelle chiese romaniche, ad esempio, nei massicci muri perimetrali si aprono serie di piccole finestre, poste nella loro parte superiore. Che questo corrisponda ad una idea religiosa, e cioè alla necessità di una maggiore meditazione sulla oscurità della condizione del peccato, è certamente vero ma è pur vero che non era alla portata dei costruttori romani nessun altro tipo di organismo edilizio. La volta a crociera romana è ancora da considerarsi un elemento continuo, tanto è vero che nella definizione dei costoloni e delle vele non è riscontrabile alcuna particolare differenziazione; perciò a questo tipo di copertura non possono che corrispondere masse murarie continue (Modena cattedrale).

La rivoluzione strutturale indotta dai costruttori medievali partì proprio dall'esaltazione delle diversità funzionali dei costoloni e delle vele della volta a crociera.



I costruttori romani erano arrivati a definire la loro volta a crociera, a vele e costoloni, probabilmente soltanto a seguito di una necessità legata alle fasi stesse della sua costruzione: come per le volte a crociera romane infatti la prima operazione era sempre l'approntamento delle centine per gli archi e la messa in opera di questi ultimi, sui quali si appoggiavano poi le centine per le costruzioni delle vele.

I costruttori medievali fecero di questa necessità un modo per ottenere notevoli vantaggi costruttivi e strutturali.

Se gli archi venivano costruiti prima delle vele e queste ultime poggiavano su di essi non poteva significare altro che i primi fungevano da elementi portanti e le seconde da elementi portati (Reims, cattedrale di Notre-Dame).

In più, in tempi in cui bisognava fare i conti con una manodopera sempre meno numerosa e sempre più specializzata e perciò costosa nonché con la necessità di economizzare al massimo sul materiale da costruzione, la differenziazione delle parti della volta a crociera poté introdurre anche una differenziazione del trattamento di esse; maggiore attenzione doveva essere posta nel taglio e nella messa in opera dei conci degli archi, minore cura poteva essere posta nello sbizzamento e nella rifinitura dei conci delle vele. Inoltre per queste ultime si potevano utilizzare anche materiali meno resistenti o più leggeri. Ed infatti spesso nelle cattedrali medievali del nord della Francia mentre per l'intera costruzione fu utilizzata la marna, roccia composta da calcare e argilla propria di questa zona geografica, per le vele delle volte a crociera si ricorse all'utilizzo di conci di tufo. L'estensione della individuazione degli elementi portanti, cioè strutturalmente indispensabili, e degli elementi portati in tutto l'organismo architettonico della cattedrale portò alla definizione finalmente di un sistema strutturale, indipendente dalla massa. Quest'ultima si ridusse a quella necessaria per la messa in opera delle strutture e lasciò il posto ai vuoti, che divennero le grandi vetrate o i rosoni così tipici delle cattedrali medievali.

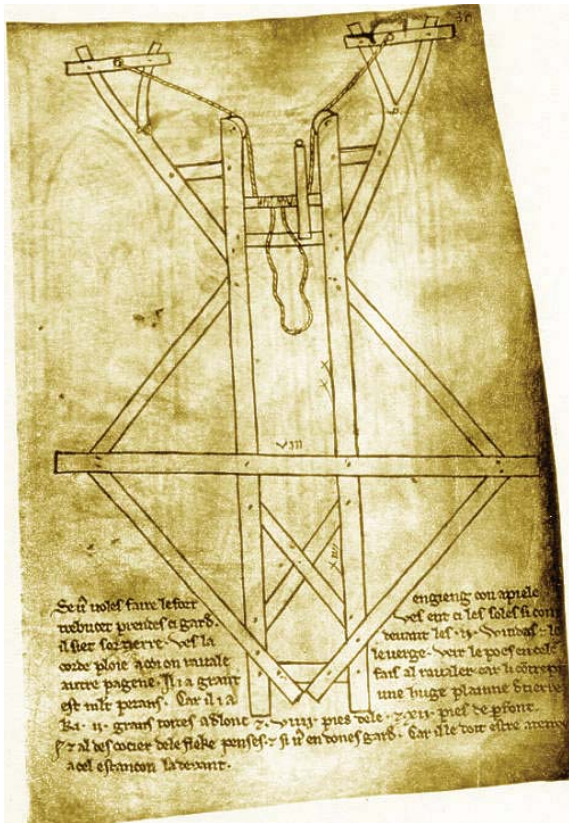
Si può pertanto affermare che con i costruttori medievali si attuò il passaggio dal concetto di edificio come massa a quello di edificio come sommatoria di elementi puntiformi. Ed è questo il significato ultimo della rivoluzione strutturale del Medioevo.

La ricerca dei costruttori medievali non si fermò qui anzi, a partire ancora una volta dalle operazioni necessarie alla costruzione della volta a crociera, si indirizzò verso una semplificazione massima di tutte le fasi costruttive della cattedrale, cercando di ottenere la migliore qualità con il minor impiego di tempo.

A questo proposito ritengo opportuno richiamare nuovamente l'attenzione sul Taccuino di disegni di Villard ed in particolare su di un disegno contenuto nel foglio 21r, presentato dallo stesso Villard come il modo per ottenere tre archi di diverso sesto con la stessa apertura di compasso.

La qual cosa, come si vedrà qui di seguito, comporta non indifferenti conseguenze.

## La regola dei tre archi di Villard de Honnecourt



Che i tre archi siano ottenuti con la medesima apertura di compasso lo scrive lo stesso Villard nella didascalia al disegno<sup>7</sup>; a noi non rimane che verificarlo.

L'arco 1, a tutto sesto, è ottenuto facendo centro in C1 ed in esso  $r = d/2$  (con  $r$  = raggio,  $d$  = diametro); l'arco 3 si ottiene puntando il compasso in C3 con la stessa apertura dell'arco 1. Nell'arco 3 si ha che  $r = d$ . L'arco 2 infine si ottiene facendo centro in C2, proiezione sull'orizzontale dell'altezza dell'arco 3, mantenendo la stessa apertura di compasso con la quale si sono ottenuti gli archi 1 e 3. Nell'arco 2 si ha che  $r = 2/3d$ . Si vede dunque come effettivamente con questo metodo si riescano a disegnare tre profili di archi aventi sesto, luce e monta differenti usando una sola apertura di compasso.

Mi chiedo pertanto che significato abbia questo disegno, se per caso gli archi indicati da Villard fossero quelli effettivamente usati nella costruzione delle volte a crociera quadripartite delle cattedrali medievali, se cioè questo disegno potesse essere usato come una sorta di strumento proporzionale per legare le dimensioni dei lati di campata ai profili degli archi. E ancora, perché una simile corrispondenza verrebbe ad essere assai significativa.

Nella messa in opera di una volta a crociera i carpentieri dovevano ovviamente fare in modo che le centine avessero lo stesso profilo degli archi da realizzare e i tagliapietre dovevano sbazzare e rifinire i conci in modo tale che essi, una volta assemblati, restituissero questo stesso profilo. Indispensabile, data la necessità portante degli archi, era ridurre al minimo le possibilità di errore nel taglio dei conci. Se allora i tre profili del disegno di Villard corrispondessero a quelli usati in una volta quadripartita, da un lato i carpentieri avrebbero dovuto realizzare un unico tipo di centina, utilizzabile per più archi e quindi reimpiegabile un elevato numero di volte, dall'altro lato i tagliapietre avrebbero potuto realizzare conci tutti uguali, cioè conci aventi tutti lo stesso raggio di curvatura, usando come guida un unico profilo.

Si vede bene come tutto questo si sarebbe tradotto in una notevole semplificazione del lavoro fuori e nel cantiere, con un conseguente risparmio di tempo e non solo, visto che si sarebbe potuto lesinare anche sul numero di centine da approntare, facendo economia di un materiale, il legname da costruzione, che andava diventando sempre più scarso e perciò costoso.

Poiché era in fase di progetto, dunque ancor prima che la costruzione venisse avviata, che si decideva come sarebbero state le volte, dipendendo da esse i sostegni verticali, i contrafforti, lo spessore delle murature e la possibilità di aperture nei muri, si può affermare che insieme alla cattedrale veniva progettata anche la suddetta semplificazione delle operazioni legate alla sua costruzione.

Che l'edificio fosse pensato non disgiuntamente dal suo sistema di copertura è verificato dal fatto che i costruttori medievali segnavano sempre nelle piante lo schema delle volte: conferma ne siano le piante disegnate da Villard qui precedentemente riportate.

A questo punto rimane da dimostrare se è possibile verificare l'ipotesi proposta: che il disegno di Villard

<sup>7</sup> “Par chu fait om trois manires d'ars a compas ovrir one fois”, Villard, op.cit.

definisca particolari rapporti fra i lati di campata e i profili degli archi in una volta a crociera e che di questi rapporti si tenne effettivamente conto nella costruzione delle cattedrali.

Le dimensioni degli archi del disegno di Villard sono:

ARCO 1	$Ld = 4,5$	$Hd = 2,25$
ARCO 2 ( $r = 2/3d$ )	$Lt = 3,4$	$Ht = 2,15$
ARCO 3 ( $r = d$ )	$Ll = 2,25$	$Hl = 1,95$

Ciò porta ad avere i seguenti rapporti di campata:

$$Ld/Lt = 4,5/3,4 = 1,32; \quad Lt/Ll = 3,4/2,25 = 1,51; \quad Ld/Ll = 4,5/2,25 = 2$$

Consideriamo adesso una campata rettangolare individuata dai suoi quattro pilastri di imposta e poniamo che sia  $Lt$  la distanza fra gli interassi degli stessi pilastri.  $Ll$  la misura longitudinale della campata ottenuta comprendendo anche i pilastri,  $Ld$  la diagonale del rettangolo definito dalle linee di involuppo dei pilastri della campata. Se è vera l'ipotesi di base, poiché questi rapporti si mantengono naturalmente invariati anche variando la dimensione di  $Ld$ , essi dovrebbero riscontrarsi nelle cattedrali in questione.

Nella campata della navata maggiore della cattedrale di Chartres si hanno i seguenti rapporti di campata:

$Ld = 2,2$	$Lt = 1,8$	$Ll = 0,9$
$Ld/Lt = 1,2$	$Lt/Ll = 2$	$Ld/Ll = 2,44$

Nella campata della navata maggiore della cattedrale di Reims i rapporti di campata sono (con l'approssimazione della scala 1:200):

$Ld = 10,2$	$Lt = 7,7$	$Ll = 4,95$
$Ld/Lt = 1,32$	$Lt/Ll = 1,55$	$Ld/Ll = 2$

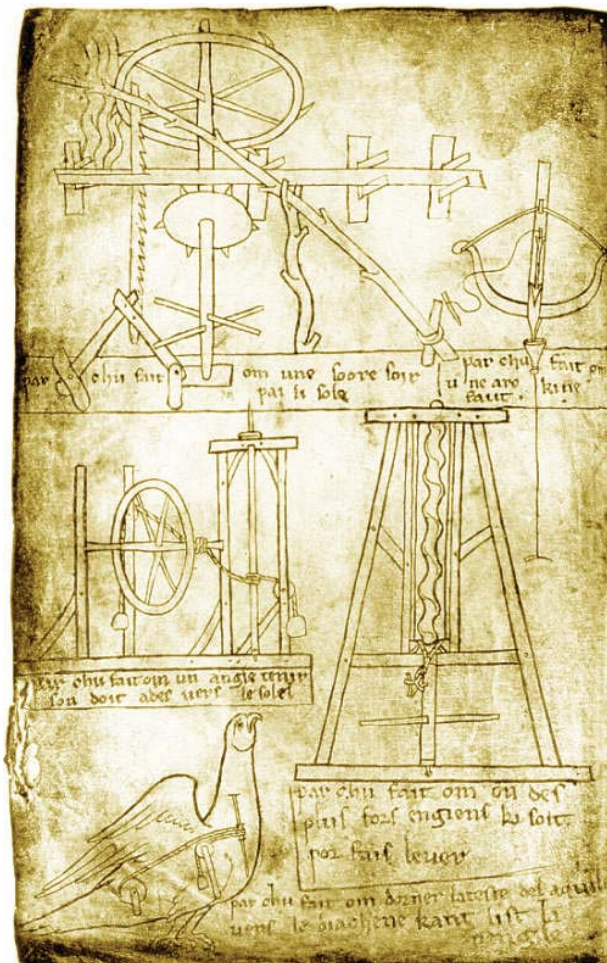
Nella navata maggiore della cattedrale di Amiens, infine, si hanno i seguenti rapporti di campata:

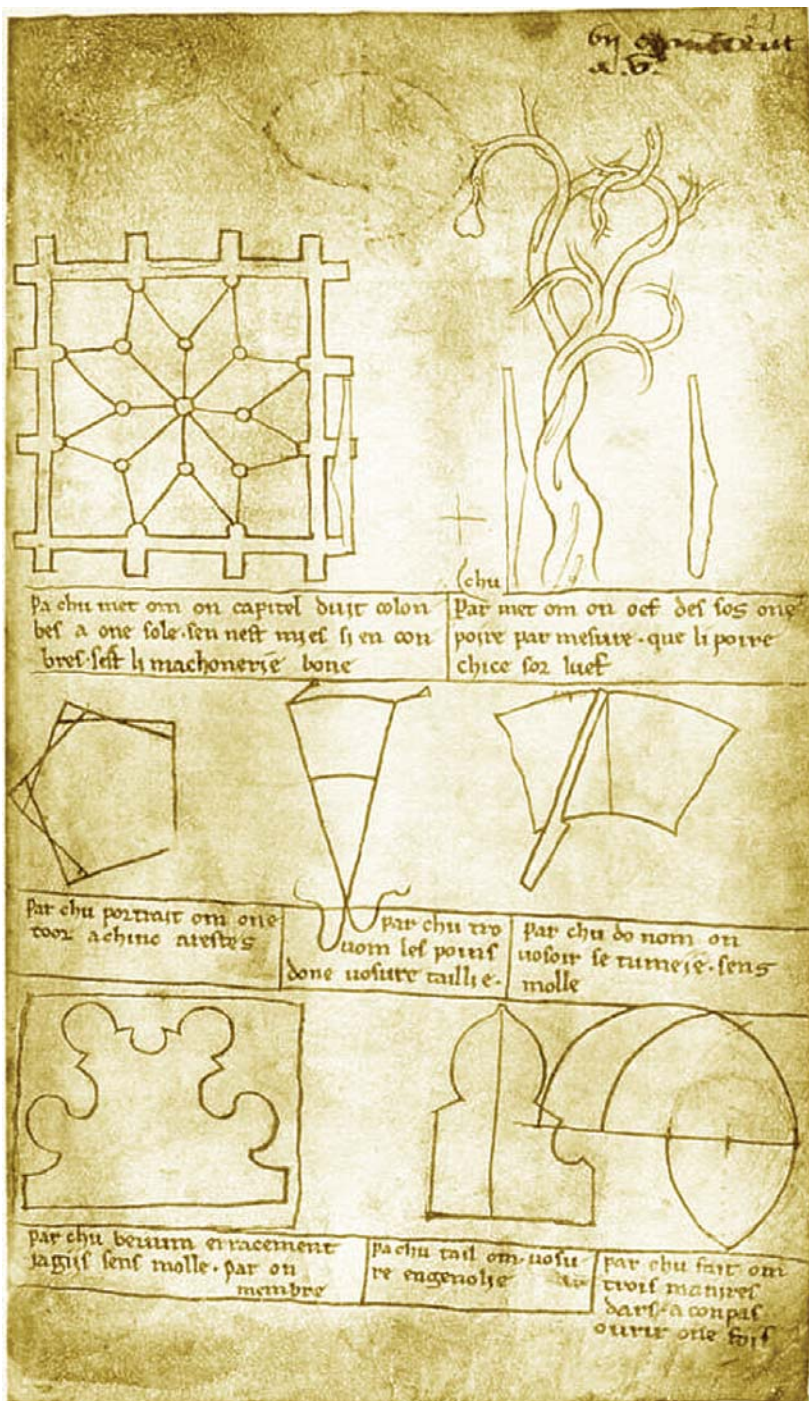
$Ld = 1,7$	$Lt = 1,35$	$Ll = 0,8$
$Ld/Lt = 1,26$	$Lt/Ll = 1,69$	$Ld/Ll = 2,12$

I rapporti di campata individuati mediante la regola di Villard sono pertanto verificati a Reims e ad Amiens, cioè in costruzioni posteriori alla cattedrale di Chartres; si potrebbe pensare che fu probabilmente proprio nel cantiere della cattedrale di Reims che Villard venne a conoscenza della regola dei tre archi, qui per la prima volta perfettamente applicata (come si evidenzia dalla lettura dei rapporti di campata).

Che tale regola non sia stata messa a punto prima della costruzione della cattedrale di Reims (1211) e che perciò Villard non poté esserne venuto a conoscenza prima, ad esempio durante la visita al cantiere della cattedrale di Laon, può trovare conferma nella lettura dei rapporti di campata riscontrabili in quest'ultimo edificio.

Innanzitutto esso presenta volte quadripartite soltanto nel transetto, avendo invece volte esapartite a copertura





delle campate della navata maggiore. Nella volta esapartita non sono verificabili i rapporti del disegno dei tre archi. Ciò basterebbe come dimostrazione del quesito, dal momento che la regola non si sarebbe potuta applicare a tutte le volte da costruire in questa cattedrale, venendo così a cadere una delle maggiori semplificazioni costruttive ad essa connesse. Analizziamo comunque i rapporti di campata riscontrabili nelle volte quadripartite del transetto della cattedrale di Laon :

$Ld = 1,6$	$Lt = 1,35$	$Ll = 0,6$
$Ld/Lt = 1,19$	$Lt/Ll = 2,25$	$Ld/Ll = 2,67$

Si vede bene come i rapporti di campata qui sussistenti siano piuttosto lontani da quelli individuabili mediante la regola dei tre archi.

Una analisi del comportamento statico di una volta a crociera medievale

E' chiaro che la regola dei tre archi avrebbe doppiamente importanza se da quella combinazione di archi ne potesse derivare anche un sistema ottimizzato nel comportamento statico.

La volta a crociera romana, così come la volta a crociera romanica, è posta a copertura di campate di forma quadrata; le volte esapartite, cioè quelle presenti ad esempio nella cattedrale di Notre-Dame a Laon, coprono campate ancora pressoché quadrate. Le campate della navata maggiore della cattedrale di Chartres sono invece rettangolari, così come quelle della cattedrale di Amiens. Ed infatti la regola dei tre archi indicata da Villard definisce la combinazione degli archi per una volta a crociera impostata su campata rettangolare.

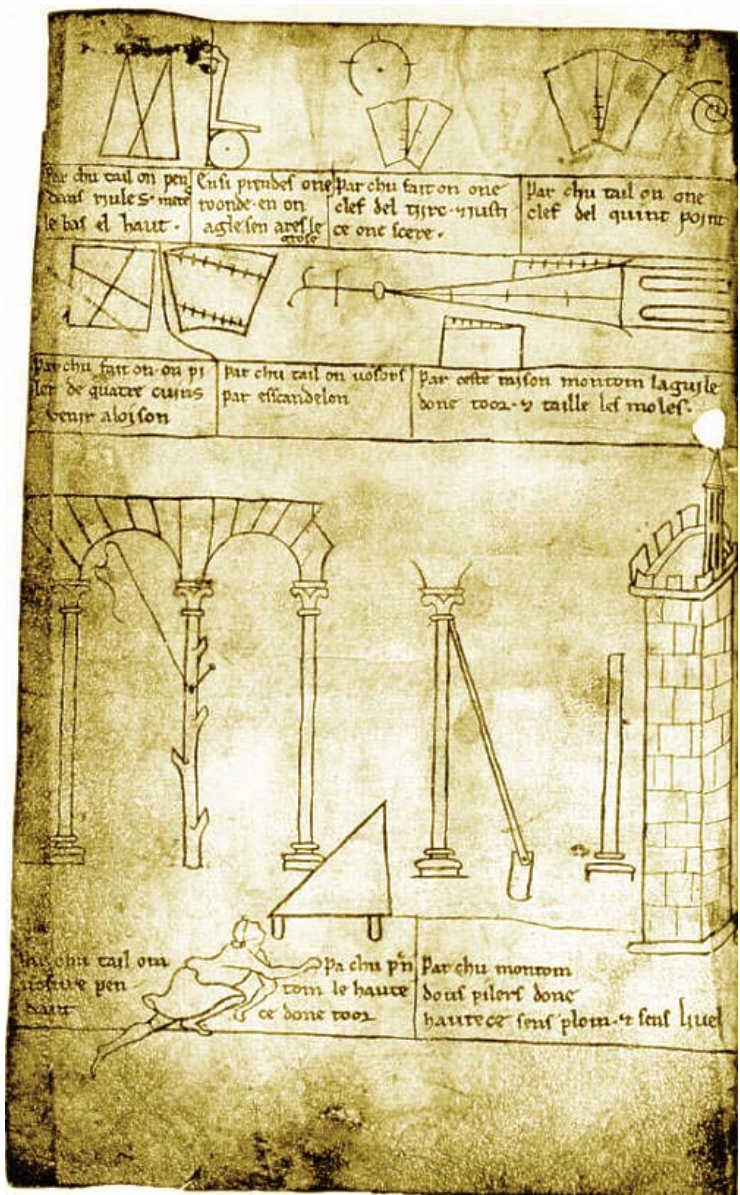
Pertanto il passaggio dalla campata quadrata a quella rettangolare potrebbe non essere casuale.

Per affrontare la discussione di questo nuovo quesito, se cioè nella volta a crociera ottenuta mediante l'applicazione della regola dei tre archi riportata da Villard si ottenga un comportamento statico ottimale, mi sembra utile proporre l'analisi di un arco a tutto sesto e dei due archi acuti aventi rispettivamente  $r = d$  e  $r = 2/3d$  svolta mediante la costruzione dei relativi poligoni funicolari e dei conseguenti diagrammi dei carichi ideali<sup>8</sup>.

Poiché la costruzione del diagramma dei carichi ideali visualizza le intensità che le forze verticali agenti sull'arco dovrebbero avere affinché nei conci costituenti lo stesso arco si abbia una sollecitazione baricentrica, il che induce l'arco ad un comportamento ottimale, si può dedurre che l'arco a tutto sesto ( $r = d/2$ ), per caratteristiche legate alla sua forma, necessita di carichi maggiori alle reni piuttosto che in chiave.

Come nell'arco a tutto sesto anche nell'arco a sesto acuto ( $r = d$ ) i punti critici sono in cor-

<sup>8</sup> Francesco ABBATE, *Sollecitazione e forma - Scala struttura voltata*, Napoli, 1990.



rispondenza della chiave e delle reni, ma, al contrario di quanto avviene nell'arco a tutto sesto, il carico necessario in chiave è maggiore di tutti gli altri carichi, compreso quello alle reni.

Perciò l'arco a tutto sesto si rompe abbassandosi in chiave e spanciandosi alle reni, mentre l'arco a sesto acuto si rompe aprendosi in chiave ed abbassandosi alle reni.

L'arco avente  $r = 2/3d$  infine presenta un diagramma dei carichi ideali simile a quello dell'arco a sesto acuto, sebbene in esso risulti minore la differenza fra l'intensità della forza necessaria alle reni e quella della forza necessaria in chiave: quest'ultima, ancora superiore all'intensità della forza necessaria alle reni, è in questo arco minore rispetto a quella necessaria nella chiave di un arco a sesto acuto.

Ebbene, nel disegno dei tre archi riportato nel foglio 21r del Taccuino di Villard si vede bene come la chiave degli archi diagonali a tutto sesto abbia altezza maggiore rispetto sia alla chiave degli archi trasversali, aventi  $r = 2/3d$ , che a quella degli archi longitudinali, aventi  $r = d$ , e che la differenza di quota tra la chiave degli archi diagonali e la chiave degli archi longitudinali sia maggiore rispetto alla differenza di quota fra la chiave degli archi diagonali e quella degli archi trasversali.

L'innalzamento della quota della chiave degli archi diagonali rispetto alla quota degli archi perimetrali (reguglio) e la scelta per questi ultimi del profilo a tutto sesto permette di far scaricare il peso della volta sulla chiave degli archi acuti e d'altra parte permette di scaricare la chiave degli archi diagonali. Il che corrisponde alle necessità individuate nell'analisi appena riportata dei carichi ideali relativi a questi tre profili di archi e alla più generale necessità di avere una volta interamente compressa.

A questa osservazione se ne aggiunge immediatamente almeno un'altra, riguardante le conseguenti spinte gravanti sui piloni di imposta della volta stessa: ben si vede come, aumentando la montatura dell'arco tale componente diventi meno obliqua e più prossima alla verticale. Problema non secondario se si pensa che i piloni di imposta per non ribaltarsi dovevano essere sollecitati da uno sforzo normale pressoché baricentrico.

D'altra parte i costruttori medievali, nella costruzione delle volte a crociera delle cattedrali, ricorsero all'aggiunta di riempimenti portati fino ad una certa altezza, com'è dimostrato dagli studi di Viollet-le-Duc, e a volte in questi stessi punti erano ricorsi anche all'adozione di conci di taglia maggiore nell'apparecchio murario delle vele, come può notarsi nelle volte della cattedrale di Reims. Questi accorgimenti non solo contribuivano alla verticalizzazione delle spinte concorrenti all'imposta della volta ma servivano anche a stabilizzare i suoi archi acuti, per quanto rilevato dall'analisi dei relativi diagrammi dei carichi ideali.

Rimanevano dunque da contrastare fondamentalmente le spinte residue degli archi perimetrali e la spinta più obliqua degli archi diagonali. Per porre rimedio a questo ulteriore problema i costruttori medievali realizzarono gli archi rampanti singoli o in doppio ordine come nella cattedrale di Reims, e quindi, a completamente di tutto il sistema resistente, i contrafforti.

## La costruzione delle centine per le vele della volta a crociera medievale

Nel *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XI au XVI siècle* Eugène Viollet-le-Duc riporta il disegno del tipo di centina in uso presso i costruttori medievali per la costruzione delle vele: è una centina ottenuta dall'unione di due sagome superiormente curvilinee e scorrevoli l'una rispetto all'altra grazie ad un collegamento a scanalatura. Le estremità della centina venivano appoggiate sui costoloni, o meglio sul secondo filare di conci costituenti i costoloni, quello più aggettante su ambedue i lati.

I costruttori medievali iniziavano a costruire le vele dall'imposta e procedevano con filari paralleli ai colmi della volta stessa; Poiché questa centina è allungabile essi potevano usarla per costruire tutti i filari, dall'imposta al colmo.

Mi sono chiesta se la regola dei tre archi, contenuta nel Taccuino potesse essere utilizzata anche per la definizione della curvatura e delle dimensioni massima e minima di questa particolare centina.

Ho pertanto fatto le seguenti considerazioni.: la corda AB, sottesa all'arco compreso fra la proiezione dell'altezza della chiave dell'arco  $r = d$  e la chiave dell'arco  $r = d/2$ , misura 1,1, cioè quanto la metà della profondità della campata risultante dalla applicazione dello stesso disegno. La corda AC, sottesa all'arco compreso fra la proiezione dell'altezza della chiave dell'arco  $r = d$  e la chiave dell'arco  $r = 2/3d$ , misura 1,7, cioè esattamente la metà della larghezza della campata definita applicando il disegno di Villard.

Ciò porterebbe a concludere che effettivamente, almeno a Reims ed a Amiens, la regola dei tre archi venisse utilizzata per la definizione delle centine delle vele.

Il che significa che con una sola regola si riuscivano a controllare più fasi della costruzione e che carpentieri e tagliapietre, uniformandosi a questa stessa unica regola, avevano modo di ridurre al minimo le rispettive possibilità di errore. E naturalmente il tutto riduceva anche il tempo necessario per portare a termine la costruzione di tutta la cattedrale.

## La standardizzazione dei procedimenti costruttivi nella cattedrale medievale

E' complesso individuare la causa scatenante l'idea di costruire le grandi cattedrali medievali. Naturalmente parlerei di concomitanza di più cause piuttosto che di un'unica causa e direi innanzitutto che le cattedrali di certo nacquero per fede. Nel senso che rispondevano alla crescente necessità popolare di avvicinarsi al divino, o meglio all'eterno: un modo per riscattarsi dall'angoscia di una vita quotidiana misera e difficile come no mai.

Ma le cattedrali nacquero anche per calcolo: quando nel 1194 un incendio distrusse la cattedrale di Sainte-Marie a Chartres, prima preoccupazione del Capitolo fu accertarsi che non fosse bruciata anche la Camicia della Vergine, preziosa reliquia donata nell'anno 876 da Carlo il Calvo alla stessa cattedrale<sup>9</sup>, Perché grazie ad essa Chartres era diventata la più frequente meta di pellegrinaggio, la qual cosa non provvedeva a rimpinguare soltanto le casse delle autorità cittadine ma anche di quelle religiose, destinatarie di elemosine e donazioni.

<sup>9</sup> E. HOUVET, *Monographie de la cathédrale de Chartres*, Chartres 1991.



E le cattedrali nacquero anche come sfida: dei costruttori a superare se stessi, nonostante le difficoltà economiche, la scarsità di materiali pregiati da costruzione, la sempre più evidente mancanza di manodopera. Effetto quest'ultimo non solo della nascita di una serie di nuovi mestieri o attività collegati alla dinamica della vita cittadina, ma anche della maggiore specializzazione della stessa manodopera, che imponeva perciò retribuzioni più elevate. Con la conseguente necessità di ogni progettista di proporre al suo committente la costruzione di edifici ben fatti cui potessero attendere il minor numero di operai nel minor tempo possibile.

La regola dei tre archi riportata nel foglio 21r del Taccuino di Villard, per quanto si è finora esposto, permise di definire una sorta di modello (o tipo standard) di volta a crociera adattabile a edifici di qualsiasi dimensione, fermi restando i rapporti fra i lati della campata e il sesto degli archi in essa individuati. Dunque tale definizione, che è spaziale e strutturale nello stesso tempo, sottintendeva la prede finizione di una serie di operazioni a monte della costruzione stessa, come la scelta dei tipi strutturali, il controllo del comportamento statico, il modo di tagliare i conci per ottenere il massimo rendimento; operazioni riguardanti evidentemente la parte progettuale della costruzione di un edificio.

Pertanto si può dire che i costruttori medievali compresero che era possibile ottenere costruzioni complesse attraverso la ripetizione seriale di alcuni elementi, già ampiamente studiati prima della loro messa in opera.

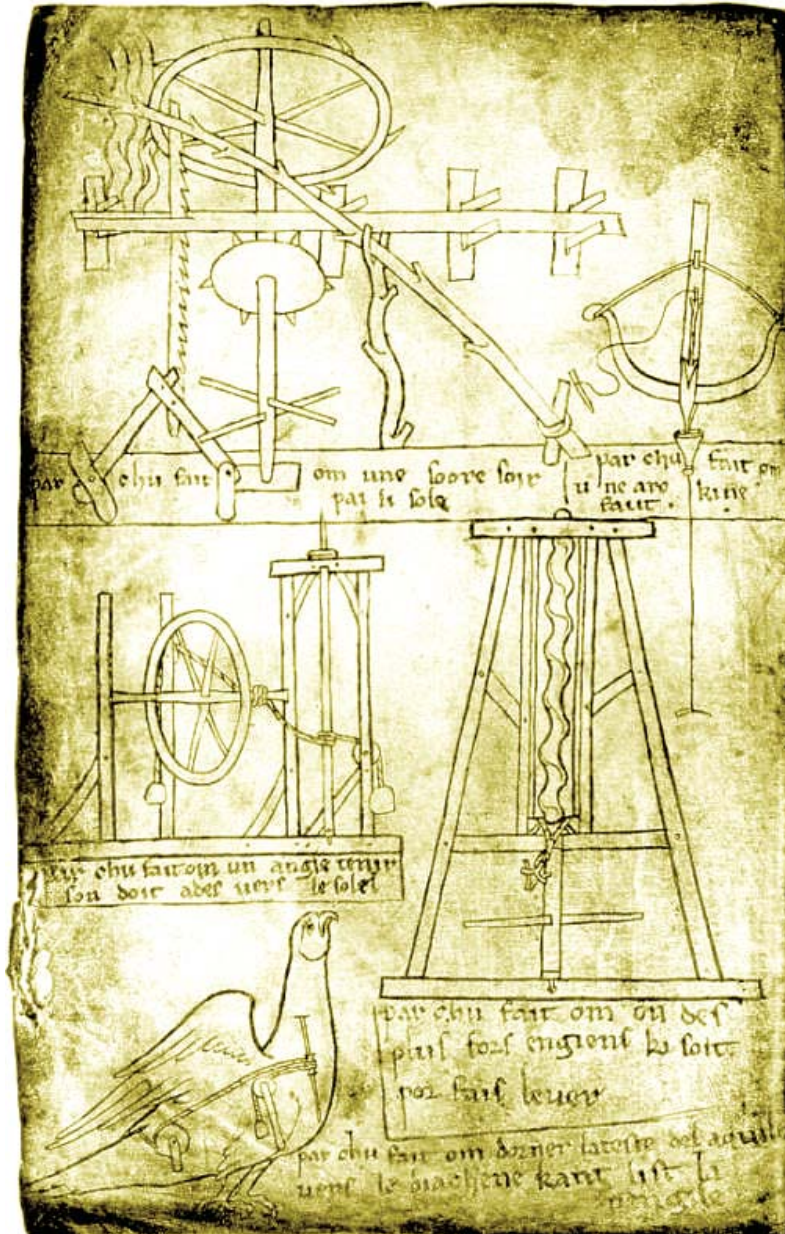
Ed infatti la cattedrale medievale è una ripetizione nello spazio di campate tutte uguali, per ottenere la navata maggiore, coperte con volte a crociera tutte uguali (definite applicando una unica regola cui si sottoponeva anche la costruzione delle centine delle vele), nonché di campate ancora tutte uguali per formare le navate minori e di contrafforti, pinnacoli, archi rampanti ancora tutti uguali per completare l'intero sistema strutturale.

Soprattutto si può dire che i costruttori medievali compresero che la serializzazione ovvero la standardizzazione dei procedimenti costruttivi non significava dequalificare l'edificio così ottenuto bensì raggiungere una maggiore qualità, riducendo al minimo la casualità e l'improvvisazione: il che significava evitare spreco di tempo ma anche errori madornali.

Il cantiere diventò un sistema perfettamente organizzato, in cui ognuno aveva un ruolo ben definito: così si faceva fronte all'offerta di lavoro specializzato ma nello stesso tempo se ne controllava la libertà o approssimazione.

La costruzione della cattedrale si protraeva molto al lungo nel tempo soprattutto perché ovviamente influenzata dalle più che mai alterne vicende politiche ed economiche della città cui essa apparteneva, conferma ne sia il fatto che quando la situazione politica ed economica di una città si manteneva positivamente tranquilla la costruzione della cattedrale poteva ultimarsi in tempi relativamente brevi: la cattedrale di Notre-Dame a Chartres fu ad esempio costruita in soli 27 anni, a partire dal 1194.

## I modelli analogici



Il problema cui dà una soluzione la regola dei tre archi contenuta nel foglio 21r è in fondo quello di conformare la volta a crociera in modo tale da ottenere un particolare regime di sollecitazione. Viceversa si potrebbe dire che la diversità delle caratteristiche statiche, legata alla forma di ognuno di questi tre archi, induca a conformare conseguentemente la stessa volta a crociera.

D'altra parte tutti gli elementi costituenti il sistema strutturale di una cattedrale medievale rispondono con la loro forma alla necessità imposta dalle sollecitazioni: dai pilastri ai contrafforti, agli archi rampanti. Valga per tutti proprio l'esempio di questi ultimi. Come si arrivò a questi elementi strutturali?

Un arco rampante più propriamente risulta ottenuto dalla combinazione di due distinti elementi strutturali: l'arco e la piattabanda. Ai costruttori medievali serviva un elemento che sostenesse la parte superiore della cattedrale, gravata dalla pressione del vento e dal carico del tetto e che in più rispondesse alle sollecitazioni indotte dalle volte a crociera delle navate maggiori. Una soluzione al problema poteva essere la costruzione di grandi contrafforti che si sviluppavano per tutta l'altezza dell'edificio: ma questa soluzione era già stata adottata dai costruttori romanici ed essa significava chiaramente l'impossibilità di costruire le navate minori, che sarebbero state letteralmente invase dalla massa dei contrafforti.

Le navate laterali erano diventate necessarie nella cattedrale medievale soprattutto in relazione alla ritualità processionale, al crescente numero di fedeli, all'uso stesso della cattedrale come fulcro di tutta la comunità cittadina che in essa si raccoglieva non solo per pregare ma anche per incontrarsi, dialogare, discutere.

Una seconda soluzione al problema prima indicato fu quella di costruire sulle navate minori le tribune (fig. 51; Parigi, la cattedrale di Notre-Dame). Chiara derivazione dei matronei di origine paleocristiana le tribune non risolvevano certo la necessità di ridurre le masse murarie, risparmiando così sul materiale da costruzione e anche sul tempo necessario a metterle in opera, e rimanevano una risposta quantitativamente eccessiva al problema.

I costruttori medievali ridussero le tribune a gallerie pressoché inesistenti (la cattedrale di Amiens in un disegno di Viollet-le-Duc), il più delle volte non praticabili, cui viene generalmente dato il nome di triforio. Ma ciò si rese possibile proprio grazie all'introduzione dell'arco rampante: in esso la piattabanda, per forma, contrasta adeguatamente le spinte ivi concorrenti istituendo contemporaneamente una continuità strutturale fra la parte centrale della cattedrale e i contrafforti laterali. L'arco sotteso alla piattabanda per forma ne assicura la stabilità, data la sua maggiore resistenza ai carichi verticali, contribuisce alla realizzazione della suddetta continuità strutturale e nello stesso tempo funge anche da centina permanente.

Tutto questo mi porta a considerare che i costruttori medievali avessero intuito l'esistenza del

rapporto biunivoco fra la sollecitazione e la forma degli elementi strutturali.

D'altra parte proprio per questo ho ritenuto possibile lo studio delle caratteristiche statiche della volta a crociera definibile attraverso l'applicazione della regola dei tre archi, riportata da Villard de Honnecourt nel suo Taccuino, mediante la costruzione del poligono funicolare di ognuno dei tre archi e dei relativi diagrammi dei carichi ideali.

Ma tutto questo mi porta ad ulteriori considerazioni.

Dopo la sistematizzazione fatta da Simon Stevin (Stevino, 1548-1620) dello studio sui problemi dell'equilibrio dei gravi, con la definizione della macchina e del poligono funicolare, si è compresa la possibilità di progettare o verificare i sistemi strutturali di un qualunque edificio attraverso la messa a punto di modelli funicolari spaziale a pesi indipendenti: cioè di modelli analogici, nei quali è più che mai evidente la correlazione tra la forma e la sollecitazione.

E' possibile che anche i costruttori medievali controllassero questo stesso rapporto con un modello analogico? Che tipo di modello analogico avrebbero potuto usare?

Per rispondere a queste domande ho ritenuto necessario risalire innanzitutto alle possibili conoscenze scientifiche di un costruttore medievale.

## Le conoscenze scientifiche dei costruttori medievali

Pur senza l'intento di scrivere un trattato sull'evoluzione della scienza, evidentemente fuori posto in questo contesto, mi riferirei in particolare almeno al *Trattato sull'equilibrio dei piani e dei loro centri di gravità* di Archimede (287-212 a.C.), passando per l'analisi di alcuni passi della *Fisica* di Aristotele (384-322 a.C.).

Nel Libro VII capitolo I della *Fisica* di Aristotele si legge: "Tutto ciò che si muove è mosso necessariamente da qualcosa". E' il cosiddetto principio di causalità, apparentemente ovvio eppure fondamentale: la causa provoca un effetto, in questo caso il movimento, il cui concetto ha dunque in sé quello di quiete o equilibrio, essendo quest'ultima la condizione precedente all'azione della causa. Studiare il movimento significa studiare anche la quiete: per ottenere la quale si dovrà agire sul primo.

Più avanti, nel Libro VII capitolo 5, Aristotele tratta dell'azione del motore sul mobile, ovvero del moto indotto dal primo nel secondo, considerando l'intervallo di spazio e il relativo intervallo di tempo in cui questo movimento avviene e soprattutto indicando il rapporto esistente tra le grandezze del motore e quelle del mobile rispetto proprio al tempo e allo spazio in cui il moto si verifica: il che si può semplificare dicendo ad esempio che se una forza sposta di 1 metro in 1 secondo un corpo di 1 chilogrammo, per spostare sempre di 1 metro in un secondo un corpo di 2 chilogrammi sarà necessaria una forza due volte maggiore della precedente.

Considerazione importante perché in essa si riconosce che la causa è un motore e quest'ultimo è una entità ben definita, una forza, agente per un determinato tempo in un determinato spazio. Il movimento e la quiete sono allora legati all'azione di forze, proporzionalmente agli intervalli di tempo e di spazio nei quali esse

agiscono.

Dove per forza si intenda forza peso, dal momento che si è ancora lontani dal concetto attuale di forza ovvero di ente astratto rappresentabile attraverso un segmento orientato, definito perciò in intensità, direzione e verso.

Consideriamo ora un'asta rigida il cui punto di appoggio, o fulcro, sia situato in maniera tale da suddividere l'asta stessa in due bracci uguali ( $l_1 = l_2$ ). Se alle due estremità dell'asta AB poniamo corpi di ugual peso ( $P_1 = P_2$ ) l'asta rimarrà chiaramente in equilibrio, ovvero orizzontale. Se all'estremità A, ad esempio, poniamo un peso  $P_1$  doppio di  $P_2$  ( $P_1 = 2P_2$ ) l'asta rigida si inclinerà di un certo angolo  $\alpha_1$  rispetto all'orizzontale, ovvero alla sua posizione di quiete: l'estremità A subirà dunque un determinato spostamento verticale verso il basso, pari allo spostamento verso l'alto subito dall'estremo B, in un determinato tempo.

Modificando l'entità dei pesi si modificheranno anche le entità di questi spostamenti. In particolare si potrebbe notare che, a parità di angolo di inclinazione, un peso  $P_1$  posto in A pari a tre volte il peso  $P_2$  posto in B ( $P_1 = 3P_2$ ) indurrà l'estremo A a compiere lo stesso spostamento rilevabile con  $P_1 = 2P_2$  ma in minor tempo. E così continuando: il che significa la possibilità di spiegare la teoria di Archimede sul motore e sul mobile facendo ricorso ad un modello, la bilancia, che visualizzi il problema posto dalla stessa teoria.

La bilancia altro non è che un'applicazione del principio della leva, ben noto già ai tempi di Aristotele.

Tanto è vero che nel capitolo I delle *Questioni meccaniche* (testo erroneamente attribuito ad Aristotele, ma risalente allo stesso periodo storico) si legge: "...quasi tutti gli altri modi delle macchine si possono ricondurre a quello della leva ...".

Affermazione che mi sembra interessante se si considera che essendo la leva intesa come causa di tutti i moti (motore) essa sarà anche causa, per quanto finora esposto, della sua quiete: poichè la leva è strettamente connessa alla bilancia, che permette di confrontare le entità dei pesi, può allora dirsi che la causa del moto è un ente misurabile. Al motore si lega cioè una quantità di peso e di moto: il movimento diventa così controllabile e modificabile e di conseguenza tale risulta la quiete.

Alla bilancia si riferisce anche Archimede, nel Trattato sull'equilibrio dei piani e dei loro centri di gravità, quando illustra la proposizione VI, nella quale intende studiare il rapporto peso/distanza necessario nella leva per ottenere l'equilibrio. Questa volta il punto di applicazione è in realtà un punto di sospensione: se ad esso saranno applicati due pesi, perchè l'asta rigida rimanga orizzontale alle sue estremità si dovranno porre due pesi uguali, la cui somma sia pari al peso applicato nel punto di sospensione. Se in quest'ultimo si pongono tre gravi di ugual peso l'equilibrio potrà ottenersi aggiungendo ai pesi delle estremità dell'asta un peso nella sua mezzeria, in modo tale da ottenere ugualmente che i pesi sospesi all'asta eguaglino in tre pesi posti in sospensione. Oppure si potrà aggiungere il peso in mezzeria ad uno dei due estremi: per ottenere l'equilibrio si dovrà variare il punto di applicazione dei due pesi così ottenuti rispetto al punto di sospensione.

Fino a tutto il Medioevo il principio della leva e della bilancia rimase un principio fondamentale cui fare riferimento nello studio dell'equilibrio dei gravi, né fino agli studi di Simon Stevin e cioè fino alla determinazione grafica della macchina funicolare ci si era serviti di altri modelli che quello della leva e della bilancia.

## Il modello analogico a bilance di una cattedrale medievale

Con la macchina funicolare definita da Stevino è possibile modificare la forma di una fune sospesa, applicando ad essa carichi indipendenti: la conformazione finale della fune sarà conseguente alla entità e alla legge di distribuzione dei carichi lungo di essa.

In questo modo Stevino associò al peso del grave lo spostamento da esso indotto, leggendone le sue componenti secondo direzioni parallele a quelle assunte dalla fune stessa.

Ciò è particolarmente importante perchè porta a considerare il moto (o la quiete) non più come effetto di determinati rapporti proporzionali fra gravi e i loro punti di applicazione lungo un'asta rigida, ma come effetto di uno o più enti, individuati in intensità, una direzione e un verso.

Ma anche nella regola dei tre archi riportata da Villard de Honnecourt nel suo Taccuino, come nella bilancia, ciò che è fondamentale è la definizione di una legge proporzionale, che rende l'una e l'altra adattabili a qualsiasi nuova condizione.

Applicando la regola dei tre archi, infatti, i costruttori medievali si trovavano a poter definire le dimensioni delle campate della navata maggiore delle cattedrali partendo da una sola di queste stesse dimensioni; nello stesso tempo determinavano anche l'altezza della chiave della volta e il valore del suo reguglio. Cosicché essi avevano nella regola dei tre archi uno strumento eccellente per progettare il sistema di copertura della cattedrale.

In particolare le volte a crociera derivanti dall'applicazione della suddetta regola risultavano ottimizzate anche nel loro comportamento statico.

Ciò mi porta a considerare da un lato che i costruttori medievali, una volta definito il sistema di copertura, avevano da risolvere il residuo problema di dimensionare le restanti parti delle cattedrali in maniera congruente allo stesso sistema di copertura, dall'altro lato che essi, con questo scopo, avessero messo a punto uno strumento ancora una volta basato su una legge proporzionale.

A queste considerazioni se ne aggiunge immediatamente almeno un'altra: il sistema strutturale di una cattedrale medievale è evidentemente riferibile al piano. In una qualunque sezione trasversale di ognuna delle cattedrali medievali è infatti possibile rappresentare tutti gli elementi di questo sistema. La stessa volta a crociera, data l'indipendenza del sistema portante dal sistema portato, può considerarsi scomponibile nei piani individuati dai suoi elementi resistenti; la qual cosa, tra parentesi, ha legittimato lo studio delle caratteristiche statiche della volta a crociera medievale mediante la costruzione di poligoni funicolari e dei rispettivi diagrammi dei carichi ideali relativi ad ognuno dei tre tipi di archi costituenti la volta.

Pertanto ho ritenuto possibile costruire un modello analogico delle cattedrali medievali basato unicamente sul principio della leva e dunque costituito da una serie di bilance, attraverso le quali mettere in rapporto le dimensioni della cattedrale e la distribuzione del suo carico complessivo nelle parti costituenti il sistema strutturale.

Un modello analogico di questo tipo permette di lavorare nel piano e, nello stesso tempo, essendo basato su un

principio di proporzionalità, di usare una qualsiasi scala di proporzione, a partire da qualsiasi carico totale. Il che significa la possibilità di ridurre la cattedrale medievale a dimensioni facilmente rappresentabili, costruendo di conseguenza un modello analogico che avrebbe potuto facilmente trovare posto anche nella più piccola *chambre de traits*.

Ho preso come riferimento la sezione trasversale della cattedrale di Notre-Dame a Reims, soprattutto perchè in essa risulta perfettamente verificata la regola dei tre archi e perchè può dirsi che appunto in questa cattedrale la ricerca dei costruttori medievali raggiunse la sua massima qualità.

Il modello analogico a bilance per essa costruito ne riproduce esattamente la forma, dal profilo degli archi trasversali della volta a crociera della navata maggiore alla posizione delle riseghe nei contrafforti, di volta in volta rispondenti alla necessità di mantenere nei contrafforti stessi una sollecitazione baricentrica.

La legge di distribuzione dei carichi individuabile in tale modello analogico mette in evidenza come siano proprio i contrafforti a dover sopportare il carico di entità maggiore, confermando dunque la necessità della loro più consistente massa.

Infine si vede bene come, variando le reciproche distanze fra i punti di applicazione dei carichi lungo ogni asta rigida (il che corrisponde a variare le dimensioni della cattedrale), il modello possa servire a definire sistemi strutturali di dimensioni diverse da quelle considerate: la qual cosa conferma l'universalità della sua legge proporzionale.