

3. GEOMETRIE, COMPORTAMENTO MECCANICO E TECNICHE COSTRUTTIVE

(Ing. Giovanni CANGI - Libero professionista, Città di Castello, PG)

3.1 CLASSIFICAZIONE TIPOLOGICA DELLE VOLTE IN BASE ALLA FORMA

La manualistica tecnica ricorre di frequente ad una classificazione delle volte secondo tipologie canoniche, da quelle elementari alle più articolate e complesse, presentate come elementi dalle configurazioni strutturali adatte a diverse soluzioni architettoniche e statiche.

La più semplice delle volte nasce da una successione di archi affiancati impostati su due muri paralleli per assumere la caratteristica forma a botte, di uso comune soprattutto negli ambienti di forma allungata, ai quali si adatta con maggiore flessibilità.

Nell'architettura romana le volte a botte si costruivano partendo proprio dalla realizzazione di archi laterizi posti a distanze regolari, che servivano da supporti per la struttura in fase di esecuzione e da solide nervature in condizioni di esercizio.

La volta a crociera e quella a padiglione si ottengono dall'abbinamento di due volte a botte ortogonali, per semplice unione o intersezione di volumi, in modo da formare superfici caratterizzate rispettivamente dall'insieme di quattro unghie o quattro fusi simmetrici.

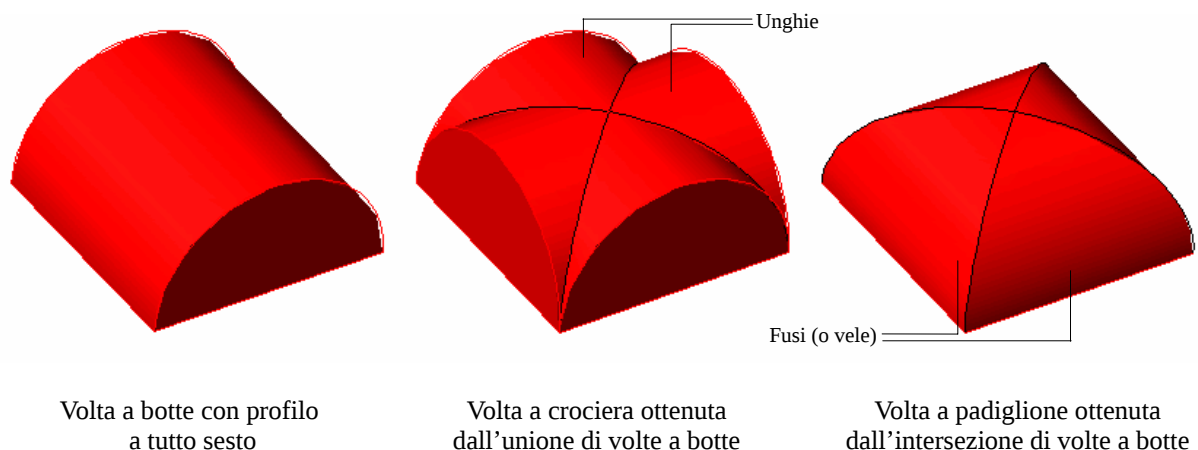


Figura 3.1. Configurazioni geometriche canoniche di soffitti a volta

Schemi geometrici così comuni sono riportati in tutti i testi che trattano della costruzione di archi e volte, da quelli che affrontano l'argomento ad un livello puramente didattico e divulgativo, a quelli finalizzati ad una trattazione più rigorosa e scientifica.

Schemi che tendono a sottolineare le diversità geometriche e gli elementi di distinzione piuttosto che le analogie costruttive e comportamentali, che aiuterebbero a dare una visione più chiara e corretta del problema.

Senza dubbio le volte a botte, le crociere e le volte a padiglione appartengono alle tipologie più diffuse nell'edilizia storica. Vi sono poi le cupole, le vele e altre forme derivate che si prestano a soluzioni estetiche di pregio e per questo utilizzate prevalentemente nell'edilizia specialistica.

Di fronte alle tante possibili configurazioni geometriche ci si chiede quali fattori hanno indotto a preferire di regola certe tipologie rispetto ad altre. Sicuramente il fattore economico e le difficoltà esecutive, oltre alla conoscenza e alla diffusione di tecniche che permettevano alle maestranze di operare in modo rapido e sicuro e, non ultima, la reperibilità e le caratteristiche dei materiali che meglio si adattano a determinate tipologie.

Esigenze statiche quali la distribuzione dei pesi e delle spinte sui muri d'imposta, così come la necessità di ricavare delle aperture nelle pareti perimetrali ed altri vincoli legati alla conformazione dell'ambiente e alla specifica destinazione d'uso, offrono un quadro piuttosto completo dei fattori che possono indirizzare verso la scelta più idonea.

Uno dei fattori che influenza il comportamento statico in modo significativo è costituito dal peso proprio della volta, che è direttamente legato alla configurazione geometrica della struttura.

A parità di superficie coperta, infatti, le volte a padiglione sono molto più pesanti delle volte a botte, a causa del maggiore volume strutturale, mentre le volte a crociera sono le più leggere.

Per apprezzare meglio questo elemento di distinzione fra le tre tipologie classiche, si noti che la volta a crociera si ottiene per sottrazione di due lunette dalla volta a botte, mentre per ottenere la volta a padiglione si devono aggiungere le due lunette alla stessa volta a botte.



Figura 3.2. Configurazioni geometriche e volumi strutturali di volte elementari. Gli schemi si riferiscono ad un modulo di mq 5x5 - A parità di superficie coperta il volume della volta a padiglione è circa il doppio di quello della volta a botte e più del triplo del volume della crociera.



Figura 3.3. Unghia o lunetta ($V_l = 3,71 \text{ mc}$)

Esiste pertanto un preciso rapporto geometrico fra i volumi dei tre tipi di volta che scaturisce da una semplice relazione matematica, ovvero, se si indica con V_b il volume fisico della volta a botte, con V_c il volume della crociera, mentre con V_p quello della volta a padiglione e infine con V_l quello di una lunetta come rappresentata in figura 3.3, vale la relazione:

$$V_c = V_b - 2V_l; \quad V_p = V_b + 2V_l \quad [3.1]$$

Distinguere le volte secondo queste tipologie è prassi comune, così come far corrispondere a ciascuna tipologia una diversa interazione strutturale con i muri d'imposta e con l'intero organismo edilizio. Tuttavia, per comprendere a pieno il funzionamento meccanico delle volte è opportuno ricercare le affinità fra questi elementi strutturali, che condividono la naturale capacità di resistere per forma alle sollecitazioni indotte dai carichi statici e dinamici.

Il discorso tuttavia è particolarmente complesso e va sviluppato seguendo un ragionamento che coinvolge anche altre configurazioni oltre a quelle illustrate, nel tentativo di individuare i caratteri geometrico-strutturali comuni riconducibili ad un unico modello generale capace di spiegarne al meglio il funzionamento.

Conoscere il filo comune che lega i diversi tipi di volta costituisce un passaggio importante nell'interpretazione dei meccanismi resistenti che ne regolano l'equilibrio; una chiave utile per l'analisi critica dei cinematismi indotti da eventuali patologie e anche per indirizzare verso una corretta opera di consolidamento statico. Gli schemi grafici e le illustrazioni riportate di seguito si propongono questo scopo.

Per un utile confronto è opportuno riferirsi ad uno stesso impianto strutturale costituito da una cellula muraria singola e isolata di forma quadrata, con cantonali ben connessi e tali da costituire degli efficaci punti di contrasto. Unica eccezione la cupola, da cui prende spunto la trattazione del problema, impostata per sua natura su una base circolare.

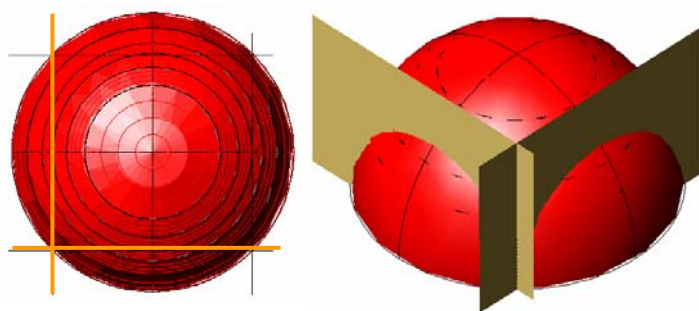


Figura 3.4. Cupola emisferica sezionata da piani verticali condotti dai lati di un quadrato inscritto nel cerchio di base

Tutto ciò costituisce un presupposto indispensabile per ottenere elementi di confronto oggettivi e per poter estrapolare i risultati nell'analisi di situazioni specifiche, con gli opportuni adattamenti.

Il percorso proposto prende spunto dalla geometria delle cupole per condurre, attraverso un graduale passaggio, alle volte a padiglione, attraverso numerose configurazioni intermedie in cui si potranno riconoscere altre forme classiche.

Le cupole sono utilizzate spesso come elementi di distinzione in architetture di pregio, poste a coronamento di importanti edifici.

Presenti nell'architettura orientale come in quella occidentale le cupole assumono una chiara funzione simbolica. Per questo, oltre che per le dimensioni spesso considerevoli, si distinguono rispetto alle volte ordinarie, inglobate nelle costruzioni e destinate ad arricchire con le proprie forme gli spazi interni degli edifici.

Per la costruzione richiedono un'imposta circolare, costituita in genere da un tamburo cilindrico che affiora dal volume di un edificio, così da realizzare un sistema voltato complesso che trova mirabili testimonianze nell'architettura classica e rinascimentale.

Il primo passaggio della metamorfosi tipologica che, come si vedrà in seguito, porterà dalla cupola alla configurazione delle volte piatte, passa attraverso la struttura della vela.

Questa si ottiene sezionando la cupola con quattro piani verticali, condotti rispettivamente dai lati di un quadrato inscritto nel cerchio di base. E' in questo modo che trova soluzione il problema del raccordo architettonico fra la forma quadrata e quella circolare.

Se si elimina la calotta, infatti, rimangono solo quattro pennacchi d'angolo, che costituiscono l'imposta ideale per un tamburo cilindrico.

La trasformazione della cupola in vela si ottiene quindi con il sezionamento della struttura circolare; un'operazione semplice che segna l'origine di una interessante metamorfosi geometrica e strutturale.

I passaggi successivi vanno immaginati attraverso un processo dinamico, caratterizzato dal progressivo abbassamento del punto di chiave.

Le variazioni di forma che si ottengono supponendo di abbassarne lentamente il colmo, si possono intuire facilmente. Nella prima fase il cervello della volta si abbassa mantenendosi ad una quota superiore a quella degli archi perimetrali.

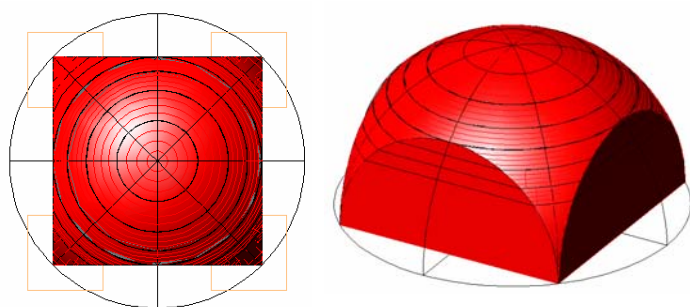


Figura 3.5. Volta a vela classica

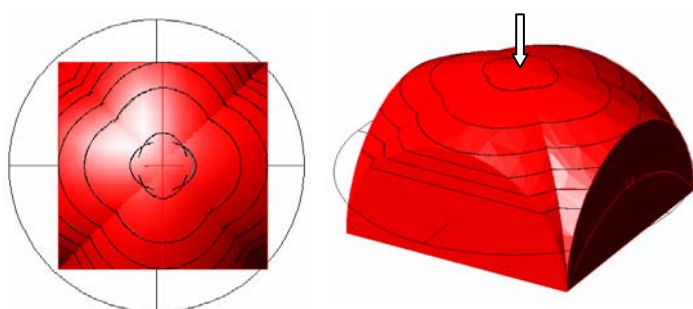


Figura 3.6. Volta a vela/crociera

Mentre avviene questa modifica geometrica si formano quattro incisioni diagonali sempre più marcate, collocate sulle bisettrici dei pennacchi. Le curve di livello, che nella vela sono costituite da cerchi concentrici, tendono così ad assumere una forma quadrilobata, ottenuta dall'unione di due ellissi ortogonali.

Con questa operazione la volta assume il profilo di una crociera rialzata, costituita da quattro unghie rampanti saldate lungo delle nervature diagonali.

Anche le curve di livello si restringono mentre le sezioni mediane verticali assumono la forma di archi di cerchio con raggi di curvatura crescenti. Strutture di questo tipo, con la variante degli archi ogivali, sono tipiche dell'architettura gotica.

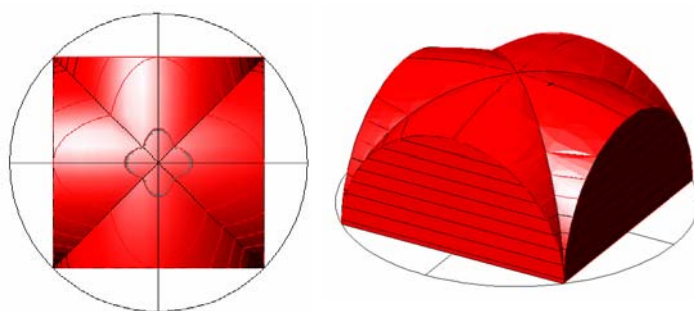


Figura 3.7. Volta a crociera rialzata

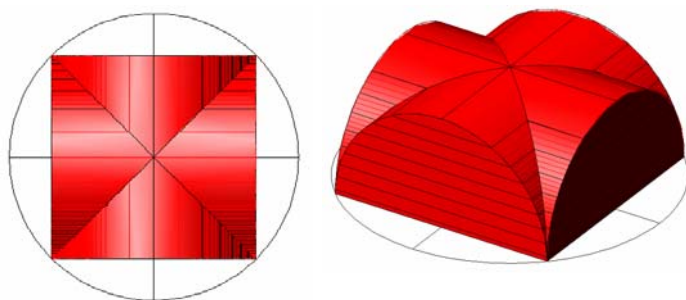


Figura 3.8. Volta a crociera classica

La metamorfosi evolve fino a quando il colmo della vela scende alla stessa quota di chiave dei quattro archi di bordo, per ottenere la configurazione della crociera classica a generatrici orizzontali. Il profilo delle curve di livello degenera in un sistema di rette parallele convergenti sulle nervature stesse (Fig. 3.8).

Se si suppone di abbassare ancora il colmo della volta si darà forma ad una crociera depressa, con le chiavi degli archi laterali più elevate del cervello della volta stessa.

Gli archi diagonali mantengono una forma ellittica molto ribassata, comunque in grado di autosostenersi, nonostante l'anomalia estetica e strutturale. A questo punto le curve di livello si aprono all'esterno con un profilo iperbolico.

Situazioni come questa si creano in genere nelle volte dissestate, con campo centrale ribassato.

Si immagini ora di agire simultaneamente sui quattro archi di parete; mentre si abbassano i punti di chiave si raggiunge una configurazione a vela ribassata con curve di livello a cerchi concentrici.

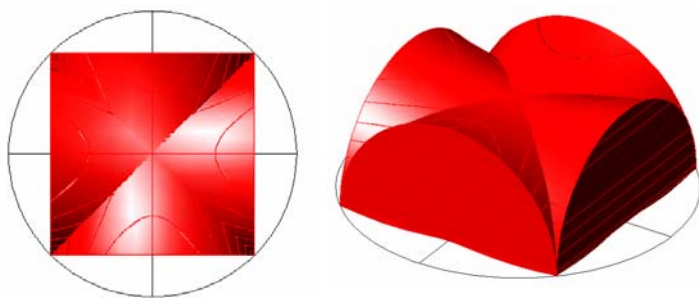


Figura 3.9. Volta a crociera ribassata

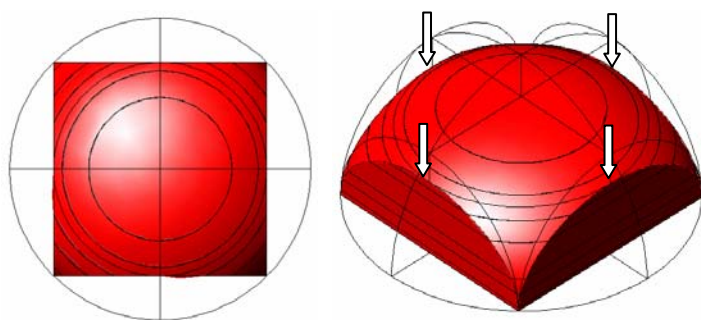


Figura 3.10. Volta a vela ribassata

Ricompariranno poi le infossature diagonali nel caso in cui si schiaccino del tutto gli archi di parete, per dare origine alle nervature in rilievo della volta a padiglione, in un passaggio che segna il raggiungimento di un'altra forma canonica.

Questa ultima configurazione si può comunque ricavare agendo sul cervello della volta a padiglione a tutto sesto, fino a rendere la volta completamente piatta, secondo una tipologia che sta alla volta a botte come la piattabanda sta all'arco. Forma rara, ma impiegata in alcune architetture di pregio, soprattutto ne meridione.

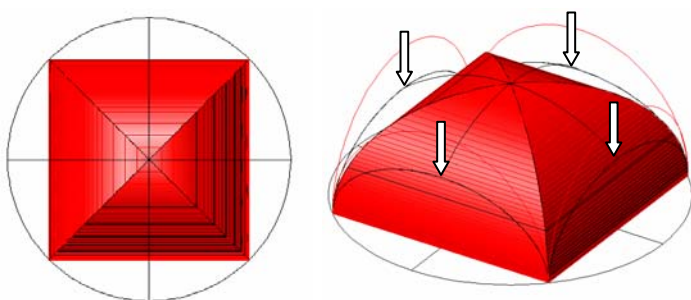


Figura 3.11. Volta a padiglione

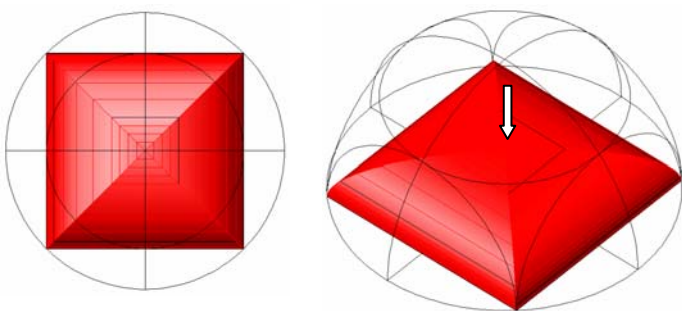


Figura 3.12. Volta a padiglione ribassata o volta piatta

In conclusione si può sottolineare l'appartenenza alla stessa famiglia architettonica e strutturale dei vari tipi di volte descritte attraverso uno schema grafico che propone una successione geometrica che sintetizza i passaggi della metamorfosi sopra illustrata.

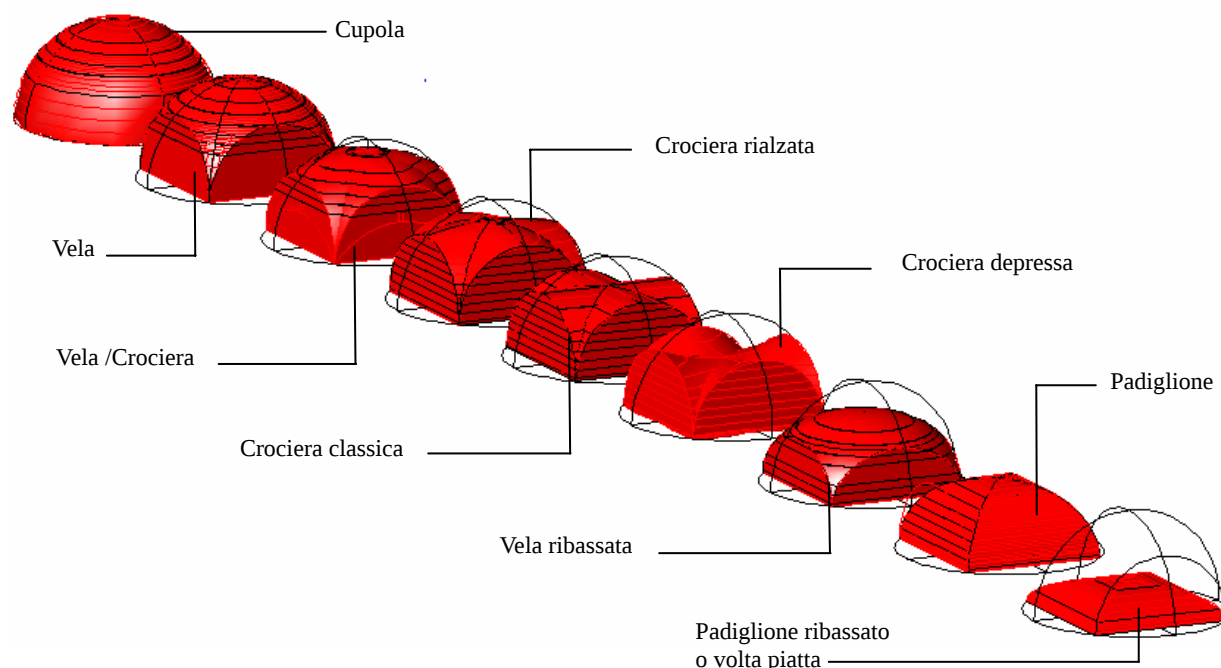


Figura 3.13. Metamorfosi tipologica delle volte: dalla cupola alla volta piatta attraverso configurazioni canoniche di passaggio.

3.2 FUNZIONAMENTO MECCANICO DELLE VOLTE IN RELAZIONE ALLA CONFIGURAZIONE GEOMETRICA

3.2.1 Meccanismi resistenti

La sostanziale affinità geometrico-strutturale rilevata fra le diverse tipologie di volte esaminate fa supporre l'esistenza di corrispondenti analogie sotto l'aspetto del funzionamento meccanico. Di ciò si può trovare riscontro nella configurazione dei meccanismi resistenti, attraverso una trattazione del problema riconducibile al ragionamento sviluppato nel paragrafo precedente.

Lo stesso approccio vale anche per l'analisi dei dissesti e delle patologie associate a particolari condizioni di sofferenza statica, che trova logica spiegazione dal confronto fra le diverse configurazioni strutturali.

Questo aiuta a dare una spiegazione qualitativa del comportamento statico delle volte e della manifestazione dei dissesti, attraverso un approccio pratico intuitivo tipico del cantiere tradizionale. Un metodo che permette di svincolarsi dai risultati di una pura analisi numerica computerizzata che da sola rischia di avere scarso significato.

Per studiare i meccanismi di funzionamento delle volte è necessario ripercorrere i passaggi illustrati nel paragrafo precedente, ad iniziare ancora dall'analisi delle cupole a base circolare, per esaminare poi le volte a vela e quindi gli altri tipi.

Si propone inizialmente una modellazione del meccanismo resistente che sarà compresa meglio solo con l'analisi delle altre geometrie; per fare questo si suppone di dividere la cupola in tre parti, costituite dalla corona d'imposta, da una banda mediana e dalla calotta d'estradosso, sottese rispettivamente da angoli di 30° e 60° .

Per una logica suddivisione si fa corrispondere la prima sezione alle reni della volta (30° sull'orizzontale) e la seconda ai fianchi superiori, sottesi da un angolo di 60° sull'orizzontale. All'interno della banda intermedia si immagina quindi di costruire un sistema di archi intrecciati, impostati sulla corona e tangenti alla calotta, che visti di profilo potrebbero caratterizzarsi come una serie di puntoni radiali distribuiti con regolarità geometrica, impostati sul perimetro della calotta.

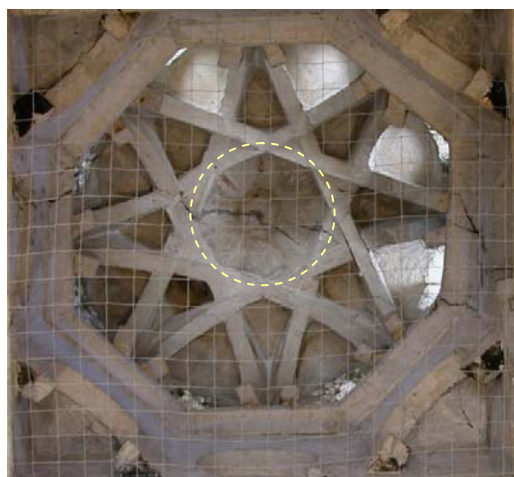


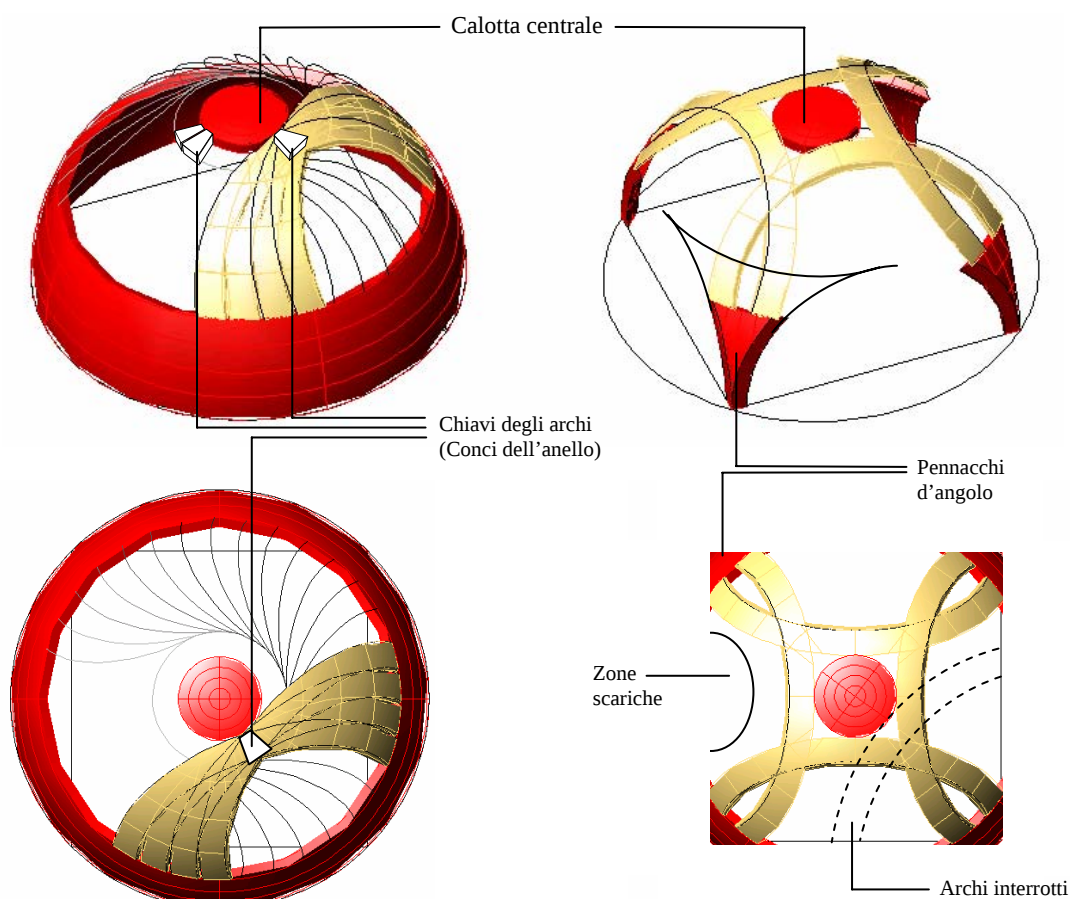
Figura 3.14. Toledo, Mezquita del Cristo de la Luz (X sec.) Foto G. Afani.

Se ora si punta l'attenzione sulla successione dei conci di chiave di questi archi, occultati nello spessore della volta, si noterà che insieme vanno a formare un anello autoportante, realizzando un meccanismo resistente che ripropone esattamente il modello statico ad anelli concentrici sovrapposti. Ad ogni anello è possibile associare un corrispondente fascio di questi archi virtuali.

Questo può apparire come una pura astrazione, ma serve invece a spiegare molto bene i meccanismi che si instaurano all'interno della cupola.

Una prova di questo funzionamento meccanico è fornita dal reticolo di archi che costituisce l'ossatura portante delle belle cupole barocche del Guarini, realizzate nella chiesa di San Lorenzo a Torino e ancora prima nelle volte delle moschee islamiche costruite in Spagna (fig.3.14) e in altre strutture di pregio.

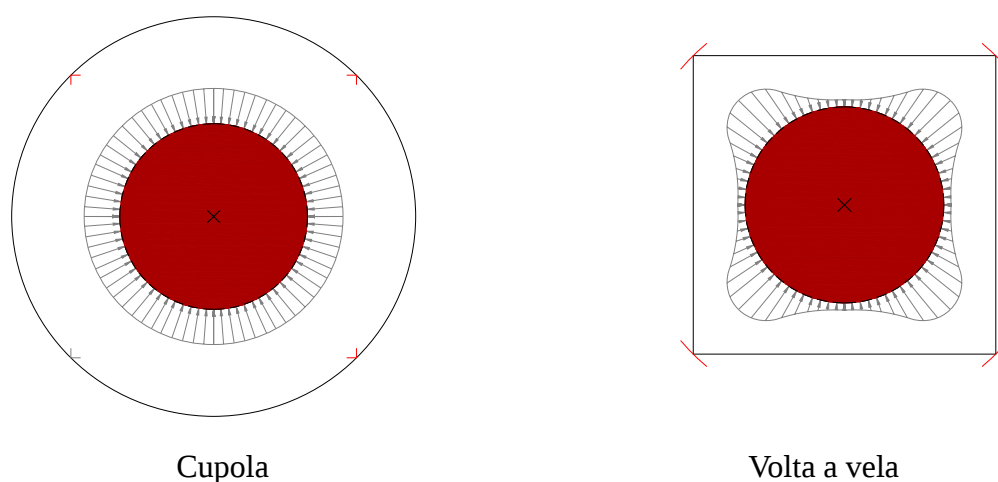
Il funzionamento di questi archi appare più evidente nel momento in cui si seziona la cupola per formare la vela. In questo caso tutti gli archi vengono tagliati, ad eccezione dei quattro simmetrici impostati sui pennacchi d'angolo (fig.3.15).



Cupola semicircolare a tutto sesto

Volta a vela classica

Figura 3.15. Modello strutturale comportamentale delle cupole e delle volte a vela, considerate come un ideale fascio di archi intrecciati tangenti alla linea d'imposta della calotta centrale.



Cupola

Volta a vela

Figura 3.16. Distribuzione delle forze equilibranti radiali lungo il perimetro dell'anello d'imposta della calotta, con distribuzione uniforme nella cupola, più intense nelle diagonali della volta a vela.

Nella volta a vela cambiano pertanto le condizioni di equilibrio della calotta centrale, sebbene questa non venga intaccata in alcun modo.

Nella cupola, infatti, la calotta è sostenuta da reazioni radiali distribuite in modo uniforme lungo l'anello d'imposta, mentre nella volta a vela gli sforzi tendono a concentrarsi sulle diagonali, per la maggiore rigidità offerta dai pennacchi stessi.

Si instaura così un meccanismo che fa perno sui quattro archi simmetrici, che corrispondono ad altrettanti puntoni posti a contrasto della calotta, capaci di entrare in esercizio in seguito del disarmo delle centine e all'assestamento fisiologico della struttura.

Per capire meglio cosa succede nella fase di passaggio dalla cupola alla volta a vela si può ragionare su un modello semplificato ipotizzando una serie di otto archi, distribuiti in simmetria attorno alla calotta, quando in realtà il numero di archi non è quantificabile, così come le loro dimensioni.

Si individuano pertanto otto imposte ideali, quattro delle quali destinate a scomparire nella configurazione della volta a vela, assieme agli archi corrispondenti, mentre le altre quattro si identificano con i pennacchi stessi (fig.3.17).

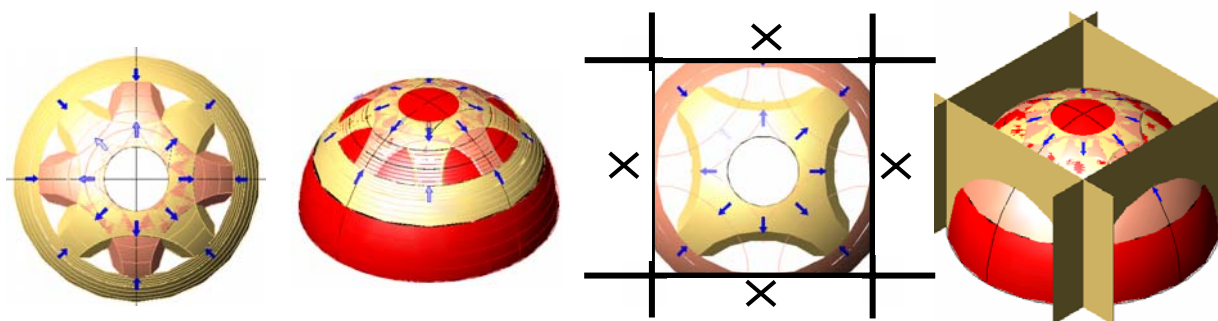


Figura 3.17a. Modello a fascio di archi intrecciati posti a coprire l'intera superficie della cupola.

Figura 3.17b. Volta a vela generata dalla sezione della cupola con quattro piani condotti dai lati di un quadrato di base.

Si spiega in questo modo una patologia classica delle volte a vela che si manifesta in modo spontaneo con la formazione di lesioni fisiologiche lungo le mediane e con il distacco di porzioni di muratura nelle zone dove si verifica una riduzione delle compressioni con un conseguente allentamento dello stato di coesione (fig.3.18).

Il meccanismo resistente a quattro archi simmetrici che si innesca nella volta a vela è lo stesso che si ritrova nelle strutture derivate illustrate nel paragrafo precedente.

Con l'abbassamento del colmo, mentre le curve di livello assumono una forma quadrilobata sempre più allungata, gli archi portanti tendono a disporsi su piani verticali (fig.3.22).

Questo si spiega con la progressiva riduzione e quindi con la scomparsa della calotta centrale, che viene inglobata nelle quattro unghie della crociera.

Supponendo di spingere il colmo più in basso, fino ad ottenere una corociera depressa, gli archi si adeguano alla nuova geometria inclinandosi verso le pareti perimetrali per continuare ad assolvere la loro funzione portante (fig.3.23).

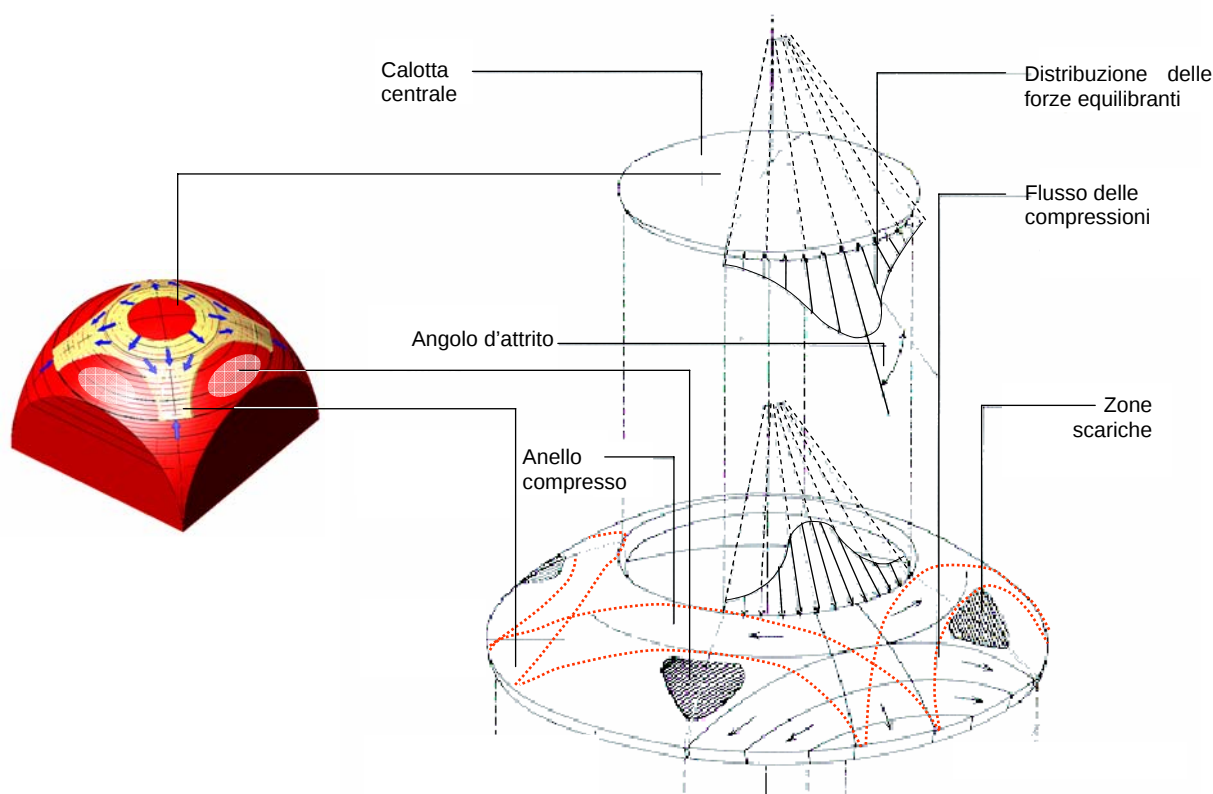
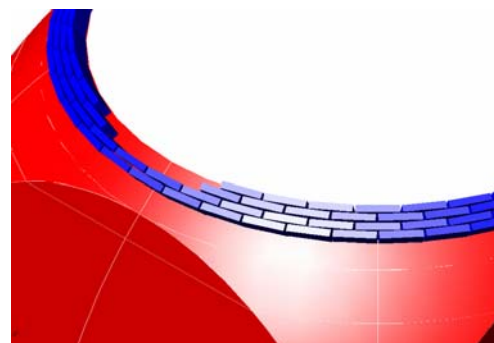


Figura 3.18. Sistema di archi che instaura il meccanismo resistente nelle volte a vela confrontato con la vela di copertura della *Rotonda Medievale di Città di Castello*¹

Figura 3.19. Direttrici di posa dei conci secondo l'andamento delle curve di livello nelle cupole circolari e nelle volte a vela.



Quando si abbassano le chiavi degli archi di parete, si osserva un'inversione dell'inclinazione degli archi resistenti, che lentamente tornano a disporsi su piani verticali per poi piegare ancora verso il centro, dove si crea campo centrale del padiglione equivalente alla calotta della volta a vela.

Nel proseguire la manovra già illustrata in precedenza per ottenere la forma a padiglione, i quattro archi resistenti piegano ulteriormente verso il centro per adagiarsi sui quattro fusi della volta e per convergere a coppie sulle nervature diagonali.

Si osserva pertanto che al variare della geometria strutturale, anche il meccanismo resistente si adegua alla nuova configurazione, senza modificarsi nella sostanza.

¹ Francesco Giovanetti (a cura di) "La Rotonda Medievale di Città di Castello" - Petrucci editore, 1993

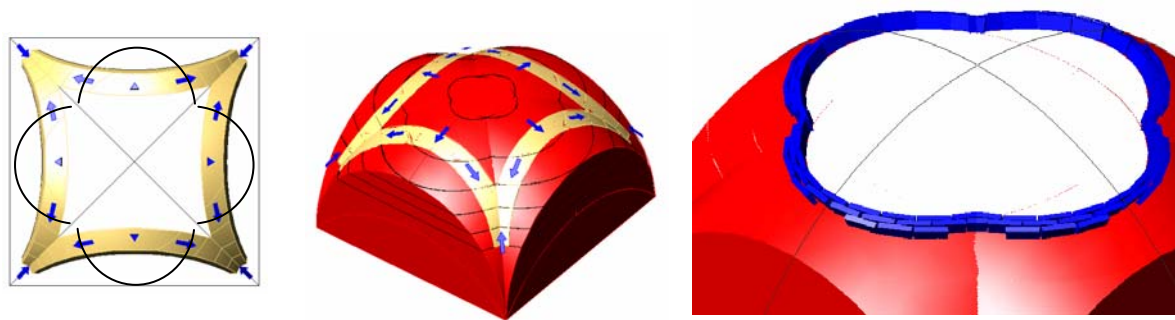


Figura 3.20. Meccanismo resistente nella volta a vela/crociera.
In evidenza le curve di livello quadrilobate.

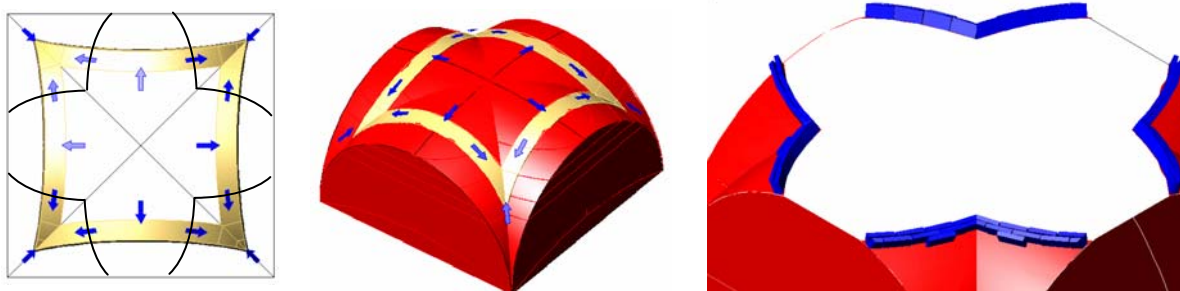


Figura 3.21. Meccanismo resistente nella volta a vela rialzata.
Curve di livello quadrilobate allungate.

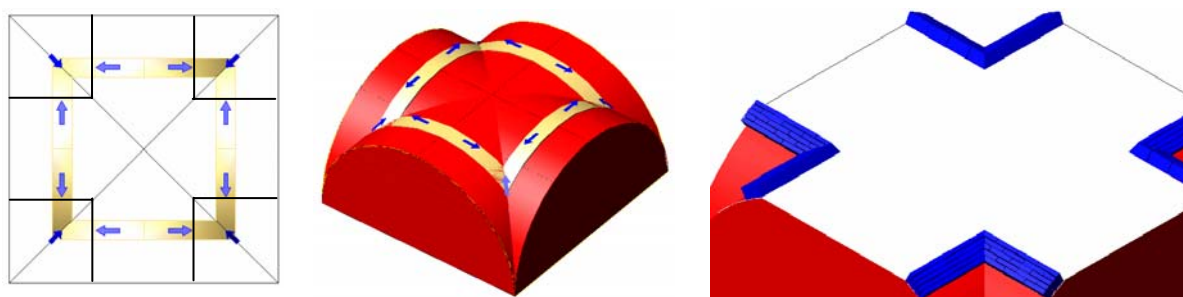


Figura 3.22. Nella volta a crociera gli archi si dispongono su piani verticali e le curve di livello degenerano in un sistema di rette coincidenti con le generatrici cilindriche.

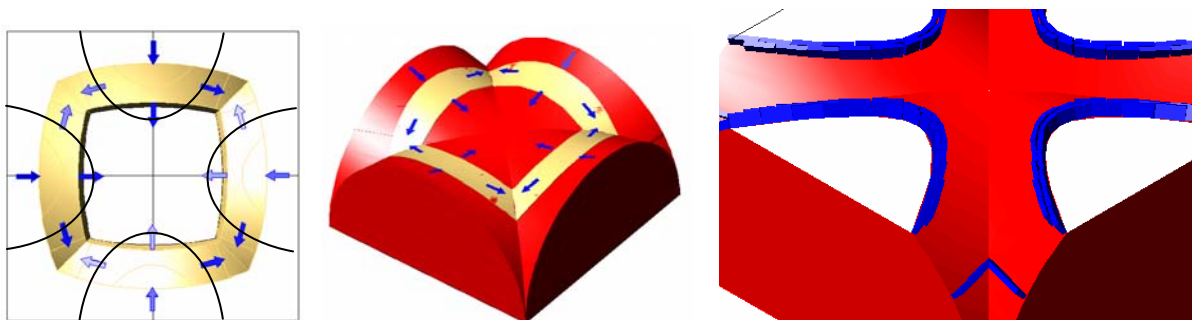


Figura 3.23. Meccanismo resistente nella volta a crociera depressa.
Le curve di livello assumono un profilo iperbolico aperto all'esterno.

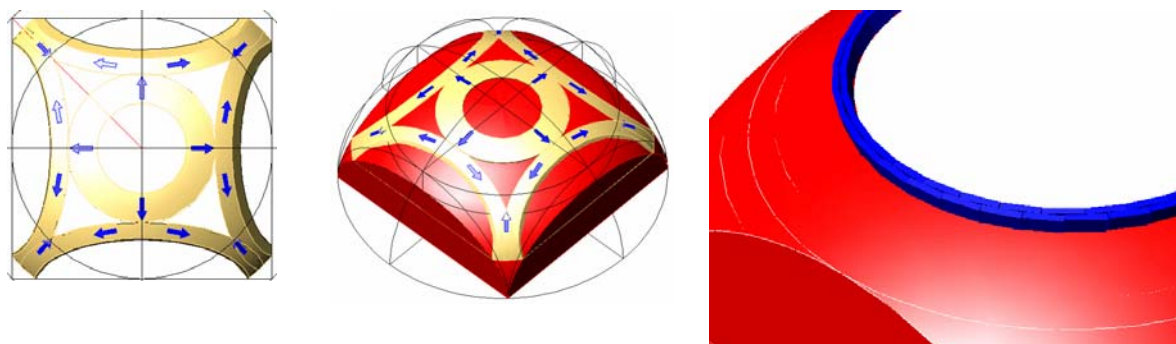


Figura 3.24. Meccanismo resistente nella vela ribassata analogo a quello della vela a tutto sesto, ma sottoposto a sforzi nettamente superiori.

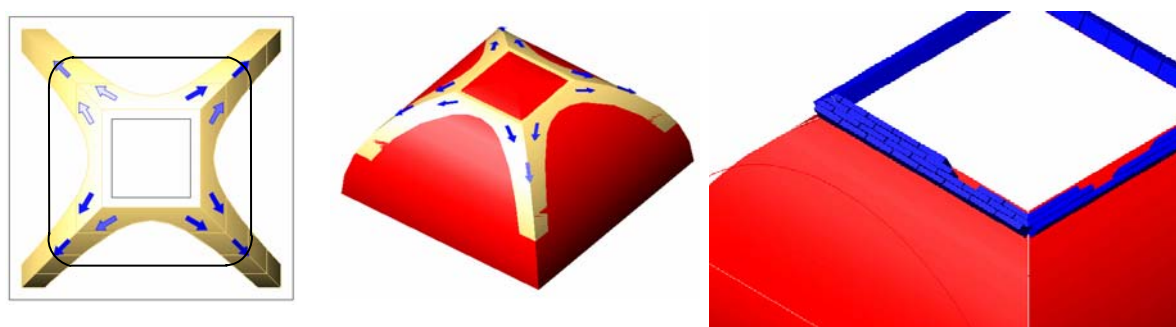


Figura 3.25. Meccanismo resistente nella volte a padiglione con archi raccordati a coppie lungo le nervature convesse.

Un meccanismo resistente così articolato, costituito da un sistema di archi perfettamente simmetrico, garantisce l'equilibrio della struttura anche in assenza del concio di chiave. Quindi è possibile creare un foro al centro della volta o costruirla direttamente con una cavità centrale, mantenendo una configurazione di piena sicurezza.

Il meccanismo a quattro archi si modifica nella configurazione solo quando il foro centrale si estende oltre i limiti della calotta; in questo caso gli archi sono costretti ad assumere una forma ribassata, tangente alla cavità medesima. Un foro, anche piuttosto ampio, praticato al centro della volta non compromette pertanto in alcun modo il meccanismo resistente, ma lo modifica solamente.

Nelle volte si instaura un funzionamento di natura spaziale, secondo meccanismi che si possono schematizzare utilmente attraverso un modello bidimensionale equivalente a doppia orditura, al solo fine di comprendere meglio la gerarchia strutturale (fig.3.26).

Il sistema di archi sopra descritto costituisce in ogni caso l'orditura principale, mentre nelle porzioni di volta sottese dagli archi maestri si individuano le strutture secondarie portate.

Le caratteristiche geometriche di questa doppia orditura vengono riportate in un'apposita scheda, per poter confrontare le curvature degli archi principali e secondari in sezioni equivalenti.

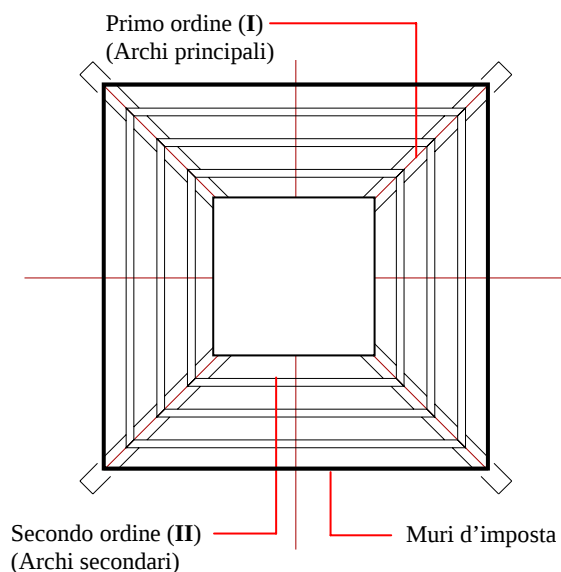


Figura 3.26. Schema strutturale bidimensionale equivalente a doppia orditura, valido per diverse geometrie di volte impostate su ambienti a pianta quadrata.

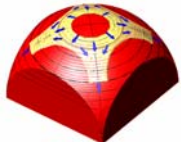
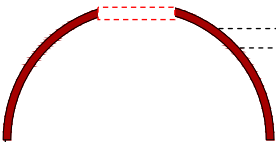
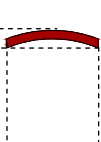
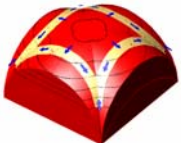
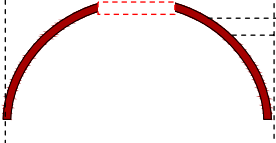
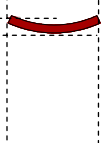
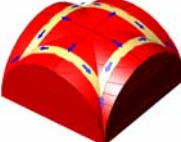
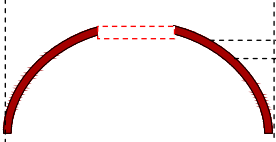
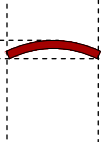
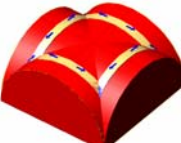
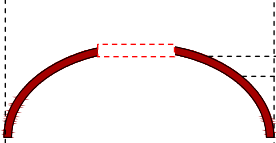
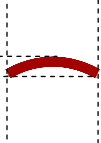
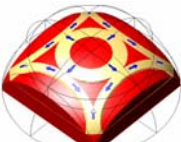
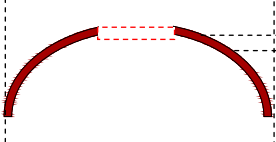
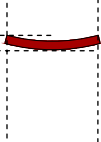
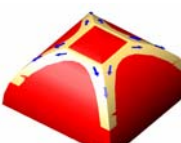
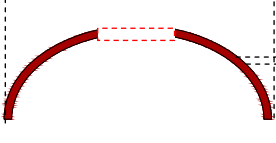
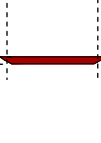
Geometria:	Tipo di volta:	Orditura principale (I) Sezione diagonale	Orditura secondaria (II) Sezione trasversale a 3/4
	Volta a vela		
	Volta a vela/crociera		
	Volta a crociera rialzata		
	Volta a crociera		
	Volta a vela ribassata		
	Volta a padiglione		

Figura 3.27. Profili delle orditure principali e secondarie in relazione alla specifica configurazione geometrico-strutturale delle volte

Dal confronto fra queste sezioni si apprende che gli archi dell'orditura principale (portanti) mantengono una curvatura regolare e piuttosto accentuata, mentre quelli secondari (portati) assumono profili sempre più ribassati e instabili.

Nelle volte a padiglione prevale pertanto il funzionamento dei semiarchi mediani, che assumono un profilo rampante impostato al centro delle pareti perimetrali. Il modello bidimensionale a doppia orditura vale quindi anche per le volte a padiglione, ma solo se si inverte la direzione dell'orditura secondaria (fig.3.28).

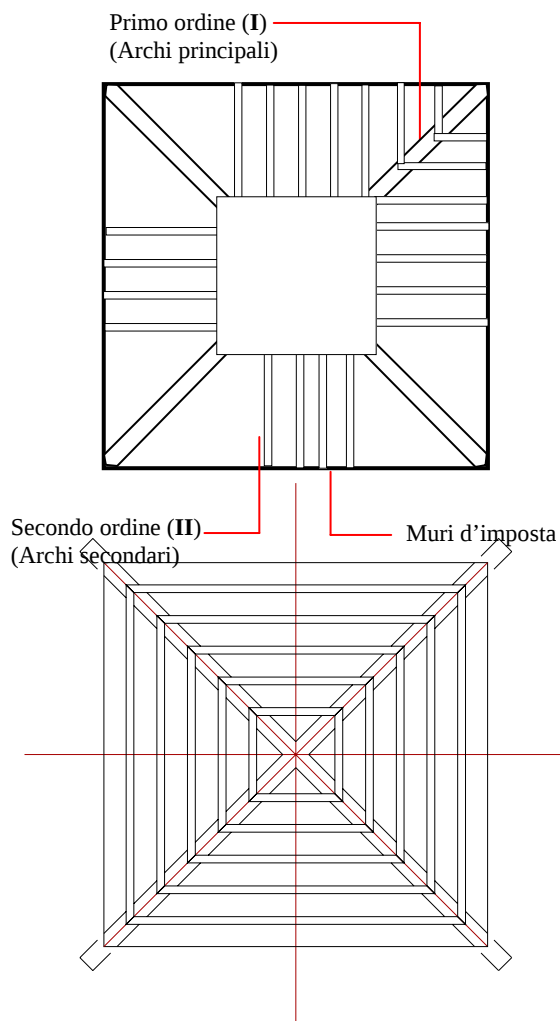


Figura 3.28. Schema strutturale bidimensionale equivalente a doppia orditura, valido per volte a padiglione impostate su ambienti a pianta quadrata

3.2.2 Volte a crociera e volte a padiglione

In base a questo si possono trarre delle prime conclusioni sul comportamento statico delle volte, nonché sulle analogie e le differenze che emergono dal confronto fra le volte a crociera e le volte a padiglione.

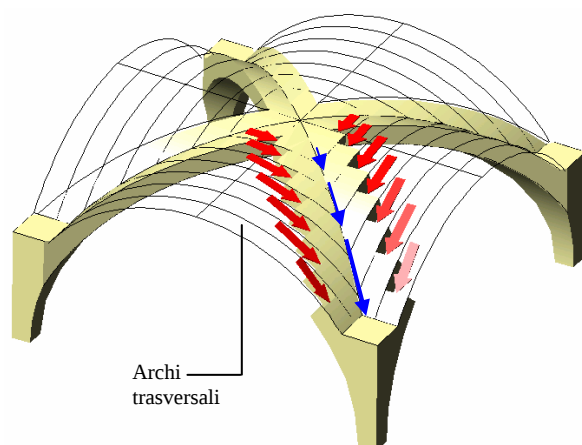


Figura 3.29. Diagramma delle spinte distribuite lungo la nervatura della volta a crociera trasmesse dagli archi secondari.

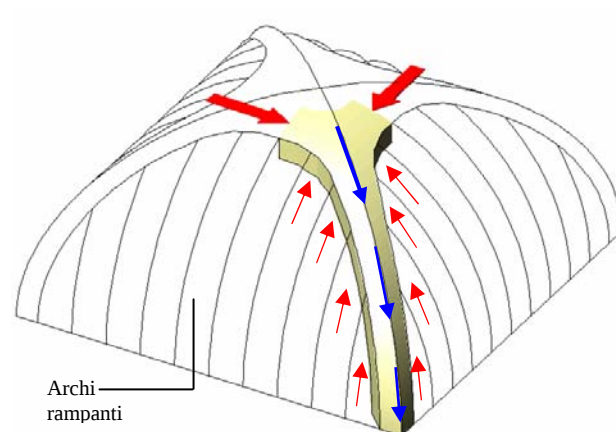


Figura 3.30. Spinte concentrate in chiave negli archi principali del meccanismo resistente delle volte a padiglione.

Nelle prime l'equilibrio delle nervature, ossia degli archi diagonali, è assicurato da uno sforzo assiale che cresce progressivamente dalla chiave (scarica) fino all'imposta, dove raggiunge il valore massimo (fig.3.29).

Nelle volte a padiglione, invece, la spinta massima è concentrata in chiave e si riduce progressivamente verso l'imposta per effetto del contrasto offerto dagli archi rampanti (fig.3.30).

Il differente comportamento statico deriva dalla diversa interazione con i muri 'imposta.

Le crociere scaricano le forze sui cantonali solo attraverso gli archi principali, mentre nelle volte a padiglione sia il meccanismo principale che quello secondario interagiscono con i muri perimetrali.

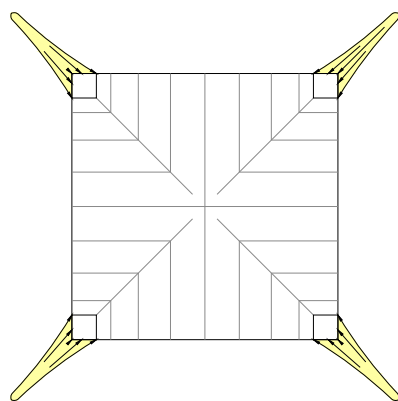
Nelle volte a padiglione, pertanto, può prevalere l'uno o l'altro meccanismo in funzione della rigidezza delle imposte.

Gli archi rampanti mediani possono assolvere una funzione determinante nel sostenere l'intera struttura, ma un eventuale loro cedimento, dovuto ad esempio all'assestamento delle pareti, troverebbe la struttura pronta ad innescare i meccanismi diagonali, che pertanto costituiscono una importante risorsa di resistenza. Ne deriva un comportamento duttile della volta a padiglione, caratterizzata da una precisa gerarchia dei meccanismi resistenti.

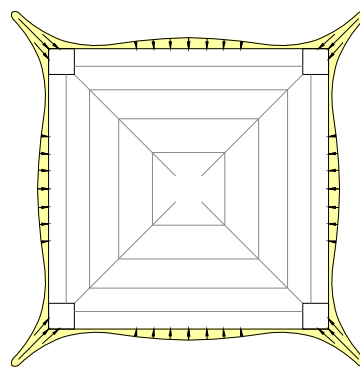
Appare chiaro, in ogni caso, che si può schematizzare il modello comportamentale delle volte a padiglione e delle volte a crociera come composizione di archi diagonali, solo se si tiene conto della reale distribuzione delle forze che convergono sulle nervature, molto diversa nei due casi.

La distribuzione delle spinte sui muri d'imposta e sui cantonali cambia sostanzialmente, ma la matrice su cui si impostano gli archi secondari è la stessa.

Testimonianze del funzionamento meccanico delle volte a padiglione sono offerte dal quadro fessurativo tipico che manifestano queste strutture.



a) Crociera



b) Padiglione

Figura 3.31. Diagrammi delle spinte esercitate dalla volta contro i muri d'imposta in funzione della configurazione geometrica.
Nella volta a padiglione può prevalere la spinta al centro delle pareti, ma non è automatico.

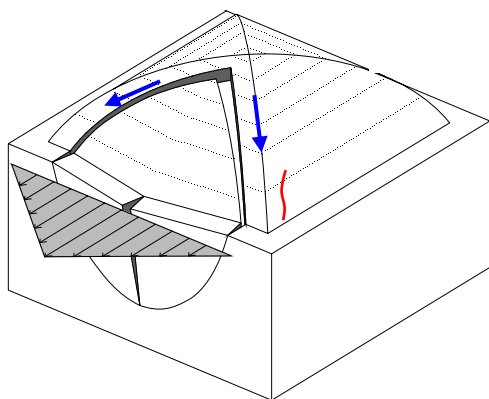


Figura 3.32. Fessurazione e distacco dei fusi nelle volte a padiglione in seguito alla flessione fuori del piano delle pareti perimetrali.

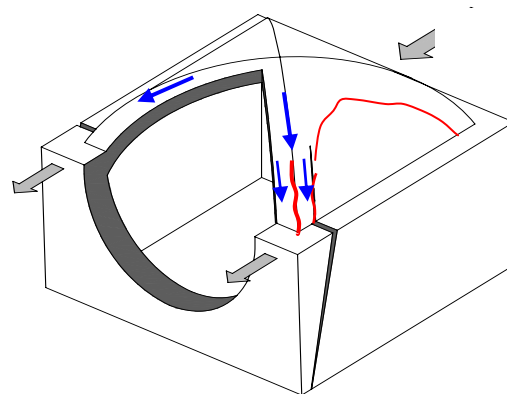


Figura 3.33. Evoluzione del cinemismo di danno conseguente al crollo del fuso frontale: fessurazione della nervatura diagonale

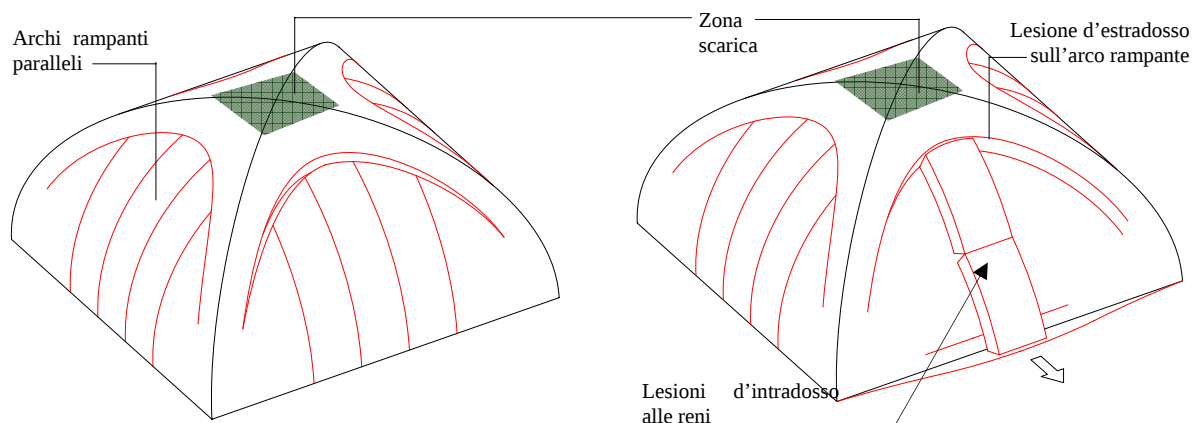


Figura 3.34. Configurazione della volta a padiglione con i profili degli archi principali e degli archi secondari rampanti e illustrazione del cinematismo di danno.

Le anomale lesioni che si formano all'intradosso delle reni, corrispondono in realtà a lesioni di chiave degli archi rampanti.

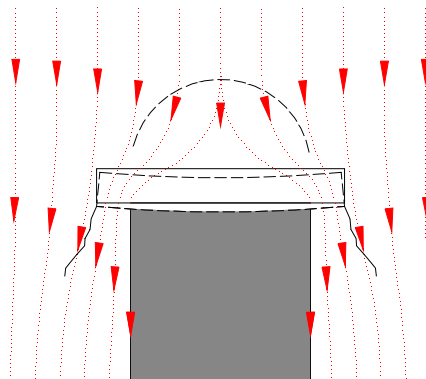


Figura 3.35. Il muro d'imposta della volta si comporta come un architrave inflesso sottoposto al carico del muro sovrastante, per cui si crea il distacco di una lunetta d'estradosso

La posizione e l'andamento caratteristico delle lesioni nelle volte a padiglione conferma l'andamento dei flussi di compressione sopra ipotizzato, che attraverso la struttura convergono sulle nervature, causando il distacco dei fusi che spingono in fuori le pareti d'imposta.

Il dissesto delle volte a padiglione si manifesta quindi con il distacco delle nervature diagonali, poi evolve con l'amplificazione di queste lesioni che possono estendersi ai cantonali della maglia muraria. In seguito si creano delle lesioni d'intradosso all'altezza delle reni, parallele ai muri perimetrali.

Ciò costituisce un'anomalia rispetto ai noti meccanismi degli archi a tre cerniere, che si lesionano spontaneamente alle reni, ma sull'estradosso.

Il fenomeno si spiega osservando che in realtà la fessura si forma in una sezione intermedia che corrisponde alla chiave dell'arco rampante, destinata pertanto ad aprirsi all'intradosso.

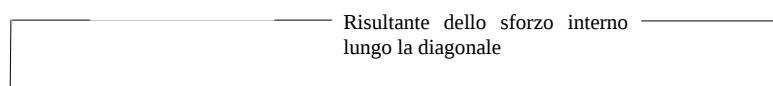
Nei fusi della volta si staccano delle lunette con un profilo analogo a quello che si crea sull'estradosso degli architravi inflessi delle strutture murarie.

La causa del dissesto è la stessa, dovuta in un caso all'inflessione dell'architrave e nell'altro alla flessione al centro dei muri d'imposta, sottoposti alle spinte degli archi rampanti,

Per comprendere le cause che determinano la fessurazione delle nervature delle volte a padiglione è utile confrontarle ancora con le volte a crociera.

In tutti e due i casi gli archi principali si impostano sulle nervature, ma con orientamenti fra loro ortogonali.

Le crociere mostrano una maggiore capacità di contrasto per il contributo offerto dalle unghie che convergono sulle nervature, nei padiglioni invece si genera uno sforzo di trazione nell'unione dei fusi, per cui le nervature si allentano e tendono a lesionarsi.



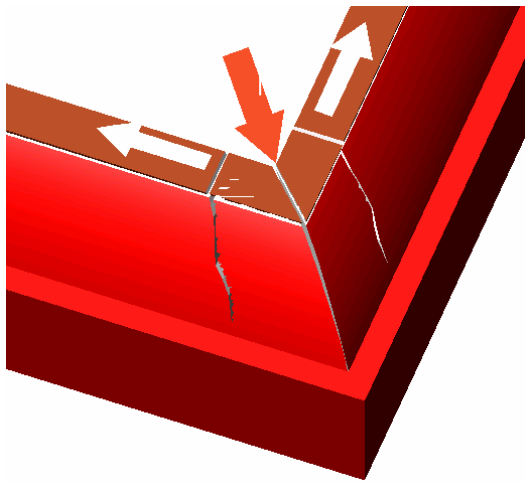


Figura 3.36. Sollecitazione di un elemento d'angolo di volta a padiglione, con lesione della nervatura: distacco dei fusi e divaricazione della spina



Figura 3.37. Sollecitazione di un elemento d'angolo di volta a crociera: la risultante è bilanciata dalle reazioni fornite dal contrasto delle unghie

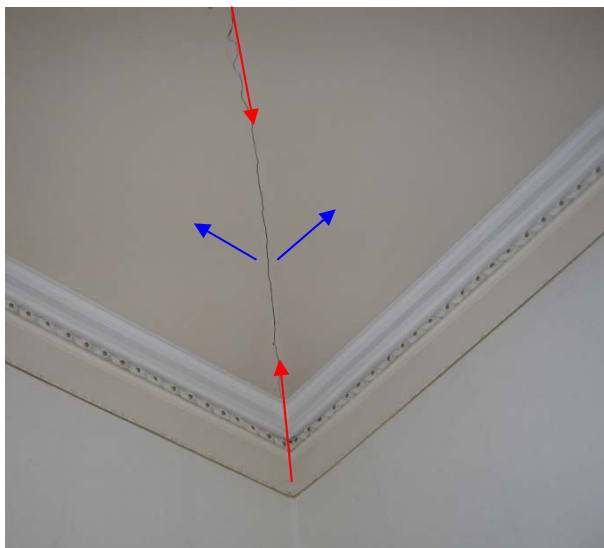


Figura 3.38. Stato di sollecitazione nelle nervature delle volte a padiglione con lesione di spina visibile all'intradosso

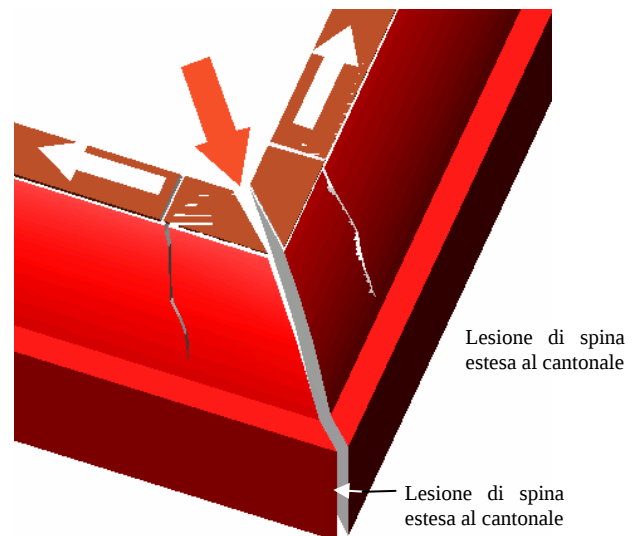


Figura 3.39. Evoluzione del meccanismo con ipotesi di estensione della lesione di spina al cantonale dei muri d'imposta

Capita che gli sforzi di compressione diagonali possano divaricare anche i muri d'ambito, quando le connessioni dei cantonali sono inconsistenti.

Rispetto alla volta a padiglione nuda si registra un comportamento migliore e sensibilmente diverso quando è presente del materiale di rinfiacco e riempimento ben costipato, in grado di contrastare lo strappo delle nervature diagonali. Il rinfiacco nelle volte a padiglione svolge pertanto un ruolo importante per la stabilità globale della struttura.

Sul comportamento delle volte a padiglione influisce anche il fatto che nella sezione alle reni lo spigolo d'estradosso della nervatura si viene a trovare in zona tesa, per cui viene meno il contributo dell'attrito che attraverso la compressione contribuisce a tenere uniti i blocchi dei fusi ortogonali.

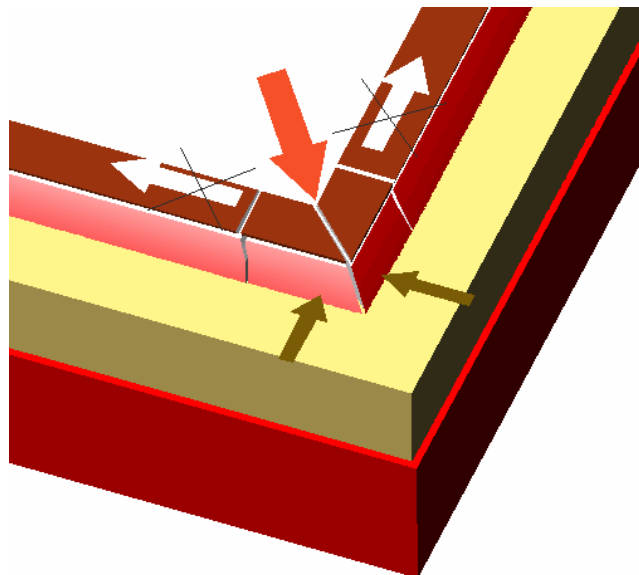


Figura 3.40. Azione di contenimento assicurata dal rinfiamento della volta con materiale di riempimento

Nelle volte a crociera invece il filo della nervatura si colloca all'intradosso dell'arcata diagonale, nel punto dove per natura si concentrano gli sforzi di compressione, condizione da cui le connessioni traggono notevoli benefici.

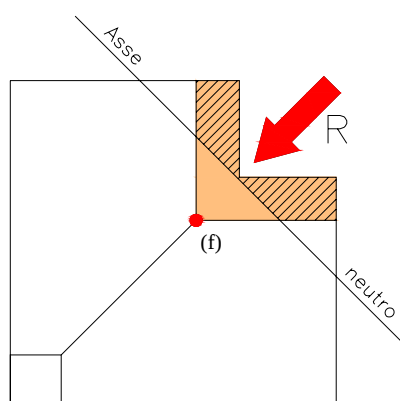


Figura 3.41. Particolare planimetrico della sezione alle reni di volta a padiglione con il filo (f) della nervatura situato in zona tesa.

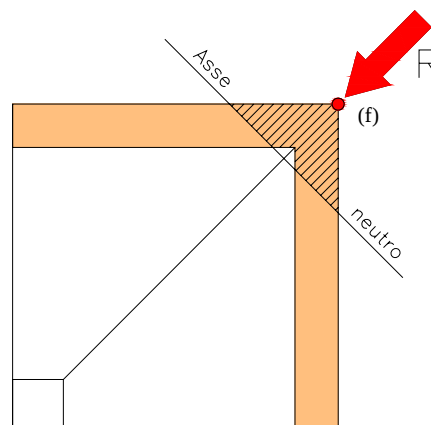


Figura 3.42. Particolare planimetrico della sezione alle reni di volta a crociera con il filo (f) della nervatura situato in zona compressa.

3.2.3 Volte a padiglione poligonali e cupole

Un comportamento analogo si osserva nelle cupole a base poligonale, ovvero nelle volte a padiglione esagonali o ottagonali (Vedi Santa Maria del Fiore a Firenze). Queste sono interessate da un tipo di dissesto che porta al distacco delle vele secondo modalità già illustrate da Giovanni Poleni in un suo trattato del XVIII sec. sul “*Comportamento delle*

cupole in muratura”, che costituisce uno dei primi esempi di modellazione cinematica finalizzato ad una trattazione analitica del problema.

Uno schema intuitivo, come lo sono in genere tutti i modelli cinematici affinati dall’esperienza costruttiva e dall’osservazione dei danni reali manifestati da simili strutture.

Il meccanismo studiato dal Poleni costituisce la versione spaziale di quello elementare che caratterizza il dissesto degli archi a tre cerniere.

Quanto illustrato permette di individuare un sistema di archi che nelle cupole poligonali, così come nelle volte a padiglione, costituisce l’organismo portante spaziale.

All’interno di ciascuna vela (o fuso) si genera in modo spontaneo un arco di scarico impostato sulle nervature, con la chiave collocata sull’asse della vela, capace di assorbire e distribuire in maniera simmetrica le forze trasmesse dalla “lanterna”, oltre ai pesi propri.

Nelle porzioni di vela sottese dagli archi si generano altri meccanismi secondari che ne assicurano l’equilibrio, affidandosi agli archi principali e agli stessi muri perimetrali d’imposta.

Il “ragno” che si ottiene dall’unione di archi generati all’interno di ciascuna vela saldati sulle nervature, costituisce l’essenza di una struttura portante che trova nella simmetria polare un fattore geometrico stabilizzante.

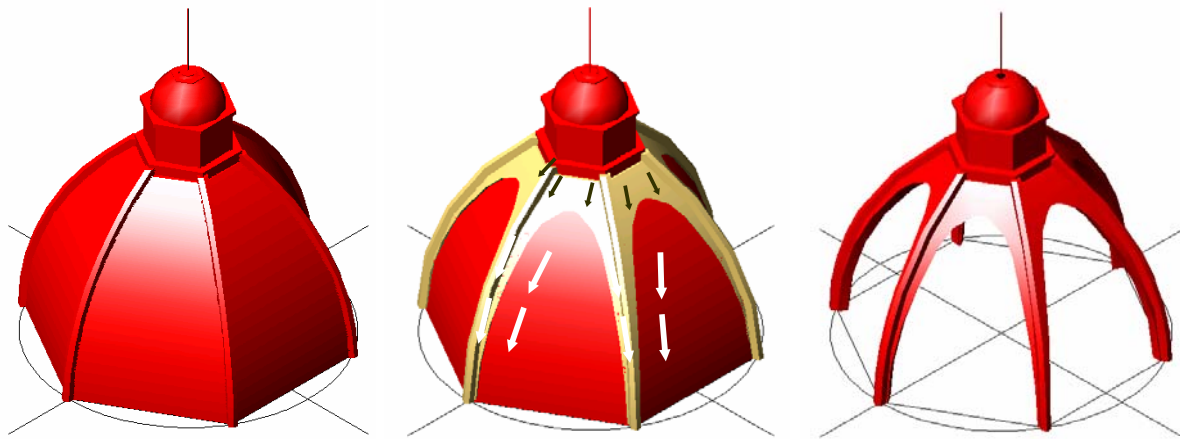


Figura 3.41. Cupola a base esagonale con meccanismo ad archi resistenti impostati sulle nervature.

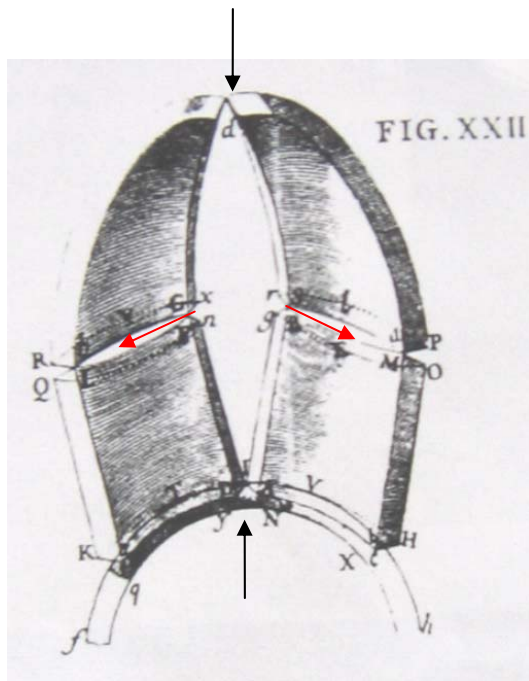


Figura 3.44. Giovanni Poleni:
“Comportamento delle cupole in muratura”
(XVIII sec.). Un primo esempio di
modellazione cinematica impostato per una
trattazione matematica.

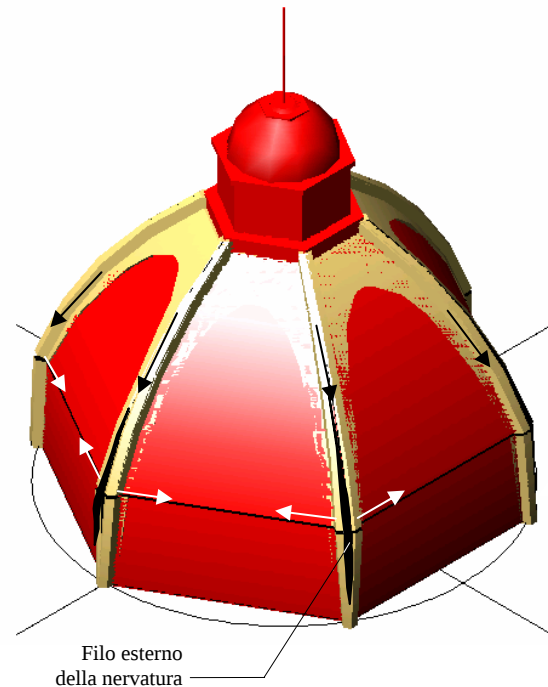


Figura 3.45. Il cinematismo di danno
coincidente con quello illustrato dal Poleni,
associato all’abbassamento del colmo con
rigonfiamento delle vele e delle nervature
all’altezza delle reni

Con l’analisi delle cupole poligonali si chiude il cerchio, nel senso che si è partiti dalla cupola circolare per delle considerazioni sulle geometrie e sul comportamento meccanico delle volte derivate, per giungere all’analisi di una configurazione a base poligonale a sei o otto vele, sostanzialmente identica nella concezione statica e altrettanto diffusa nell’architettura monumentale.

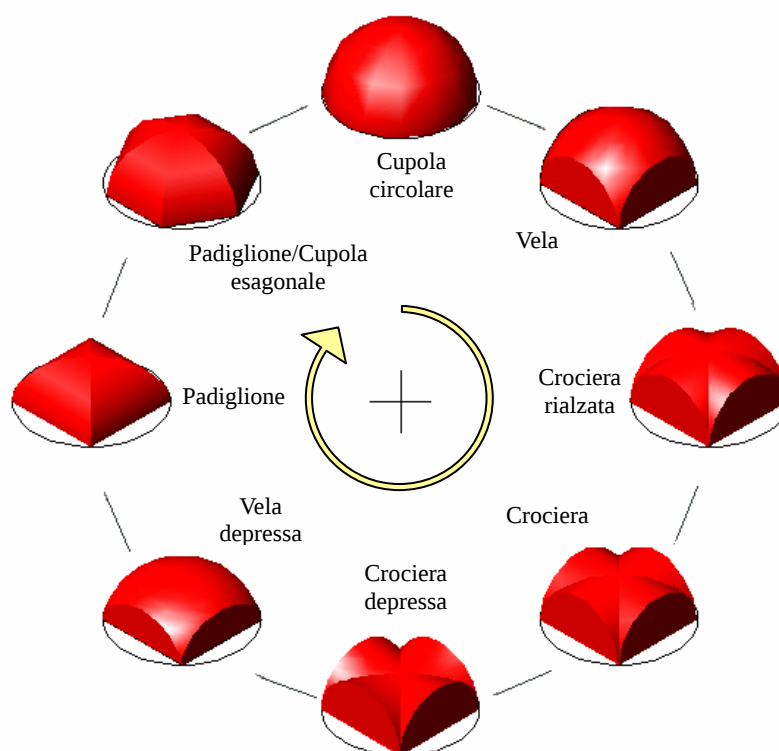


Figura 3.46. Sequenza geometrica tipologica di volte su base circolare, quadrata e poligonale.

La cupola poligonale appartiene alla famiglia delle volte a padiglione classiche, sebbene più elegante e armoniosa.

La sequenza illustrata in figura 3.46 conferma ancora la similitudine geometrica e comportamentale di volte che appaiono molto diverse nella forma, ma che in pratica sono frutto di una stessa concezione statica e strutturale.

L'analisi di alcune patologie fisiologiche che manifestano le volte semplici aiuta a comprendere i limiti del loro funzionamento meccanico e il modo in cui esso si modifica, anche in relazione alla diversa tecnica costruttiva.

3.2.4 Modificazione dei meccanismi resistenti

I meccanismi illustrati sono suscettibili di modificazioni, anche rilevanti, in funzione delle diverse condizioni al contorno che influiscono sulla configurazione dei vincoli, in funzione dei materiali e della tecnica costruttiva impiegata e anche in relazione alle stesse modalità esecutive.

Fra le varie tecniche costruttive sono da ritenere più adatte quelle che assecondano i meccanismi di funzionamento spontanei, rispetto a quelle che al contrario li contrastano, per indirizzare diversamente i flussi di compressione.

Si osserva, tuttavia, che non è possibile individuare a priori un meccanismo spontaneo assoluto, essendo comunque legato alla specifica configurazione dei vincoli; quella illustrata nei paragrafi precedenti mostra in ogni caso una tendenza spontanea che si può ragionevolmente prendere a riferimento per analisi più approfondite.

La prima causa di modifica dei meccanismi va messa in relazione alle variazioni di forma dell'ambiente, secondo un ordine di progressiva complessità.

Se si resta nell'ambito di cellule murarie isolate simmetriche le modificazioni del comportamento non sono rilevanti.

Un esempio rappresentativo di ciò che si verifica in seguito a variazioni della conformazione geometrica è offerto dalla volta a botte con teste di padiglione, ottenuta dalla trasformazione di un padiglione simmetrico, allungato lungo una delle direzioni principali.

Il meccanismo resistente che si instaura in questo caso si può estrapolare agevolmente da quello del padiglione classico; gli archi che appartengono ai fusi delle pareti corte (di testata) non subiscono modifiche rispetto allo schema base, mentre quelli delle vele laterali si distendono per assumere una forma ribassata e quindi meno rigida.

Gli archi rampanti trasversali tendono così a raccordarsi con quelli del fuso contrapposto, per generare archi trasversali a tutto sesto, tipici della configurazione a botte. Il loro funzionamento dipende dal rapporto di forma lunghezza/larghezza; più allungato è l'ambiente e tanto di più il comportamento si avvicina a quello della volta a botte, intesa come configurazione limite nella quale si annulla l'effetto degli archi longitudinali, mentre funziona solamente il sistema di archi trasversali paralleli affiancati.

Nelle volte a botte, pertanto, viene meno quel comportamento spaziale che contraddistingue le altre tipologie e che ne potenzia le capacità portanti.

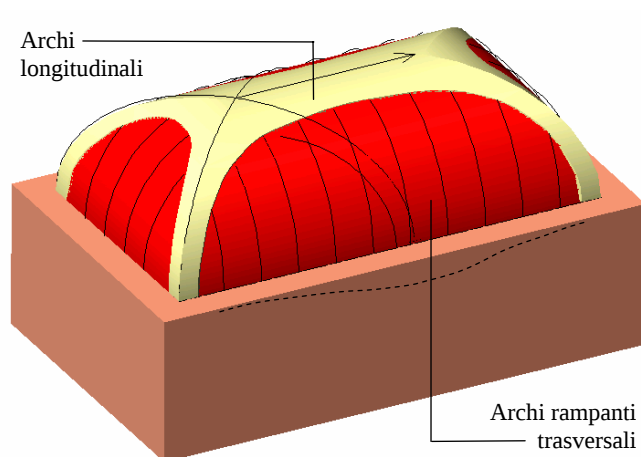


Figura 3.47. Meccanismo spaziale nelle volte a botte con teste di padiglione con deformazione della parete d'imposta longitudinale.

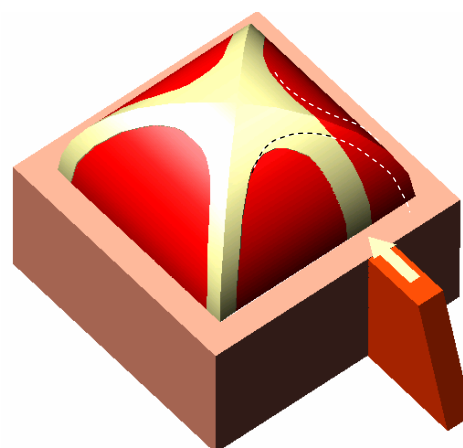


Figura 3.48. Modificazione del meccanismo resistente in presenza di elementi di contrasto.

Si potrebbero esaminare tanti casi più o meno simili, dove tuttavia resta valido il principio che permette in ogni situazione, comunque diversa dalle altre, di riconoscere in modo intuitivo il meccanismo resistente più probabile, come semplice estrapolazione del modello base preso a riferimento.

Il ragionamento non è molto diverso da quello che si deve seguire nel caso in cui a variare sono i vincoli piuttosto che la geometria.

Anche in questi casi è utile fare riferimento alla volta a padiglione, supponendo di inserire lungo il perimetro un elemento di contrasto molto rigido come un contrafforte, o l'imposta di un arco, oppure un muro di spina, in posizione generica.

La maggiore rigidezza offerta dal “corpo estraneo”, rispetto a quella dei cantonali, richiama i flussi di compressione verso questo punto, per cui il meccanismo si modifica, per quanto possibile, adattandosi alla nuova configurazione statica.

La situazione ipotizzata in fig.3.48 è rappresentativa di tutti i casi in cui la variazione dei vincoli è dovuta ad interazioni della cellula muraria con eventuali strutture adiacenti.

Un problema diverso si presenta quando la modificazione dei vincoli avviene per cause esterne, ad esempio in conseguenza di un cedimento fondale.

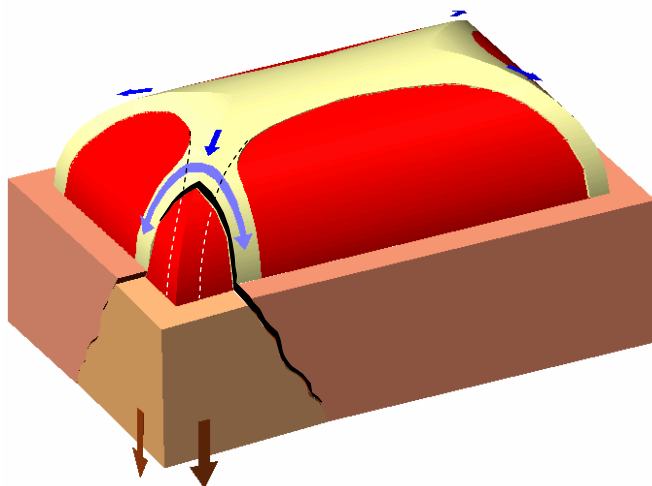


Figura 3.49. Modificazione del meccanismo resistente spaziale nelle volte a padiglione nell'ipotesi di cedimento fondale del muro d'angolo

Una situazione che si verifica, ad esempio, quando un punto di contrasto affidabile come può essere la struttura di un buon cantonale, perde la sua efficacia, per cui la volta ricerca dei meccanismi resistenti alternativi.

Accade così che i due archi rampanti prossimi alle lesioni di distacco si sostituiscono all'arco diagonale, per deviare gli sforzi sulla fondazione stabile, per cui non è difficile, intuire il nuovo andamento dei flussi di compressione, estrapolando il comportamento osservato nella struttura integra.

Se viene eliminata la causa del dissesto e si ripristina la configurazione primitiva, si può rigenerare anche il meccanismo resistente.

L'ampiezza della porzione di volta distaccata dipende dall'estensione del cedimento e dall'andamento delle lesioni che si formano nelle pareti laterali.

Se il cedimento interessa un tratto centrale della parete longitudinale il meccanismo resistente principale può non essere influenzato dal fenomeno. Ancora diversa è la situazione che si presenta nell'ipotesi di cedimento esteso, tale da coinvolgere l'intero muro longitudinale e un'ampia porzione della volta, che tuttavia ha la capacità di ritrovare l'equilibrio su una nuova configurazione che esclude la parte distaccata.

Una simile condizione di dissesto si può presentare anche nelle volte a crociera, che presentano notevole flessibilità e capacità di adattamento dei meccanismi resistenti, al punto da trovare equilibrio anche in condizioni di grave dissesto, come il collasso di un'ampia porzione di struttura.

Sono situazioni rare, ma che dimostrano un'affidabilità di queste strutture, superiore a quanto si possa immaginare.

Gli schemi grafici che seguono mettono a confronto il meccanismo resistente originale di una crociera con quello della stessa volta in una configurazione dissestata, che tuttavia conserva la stessa connotazione strutturale.

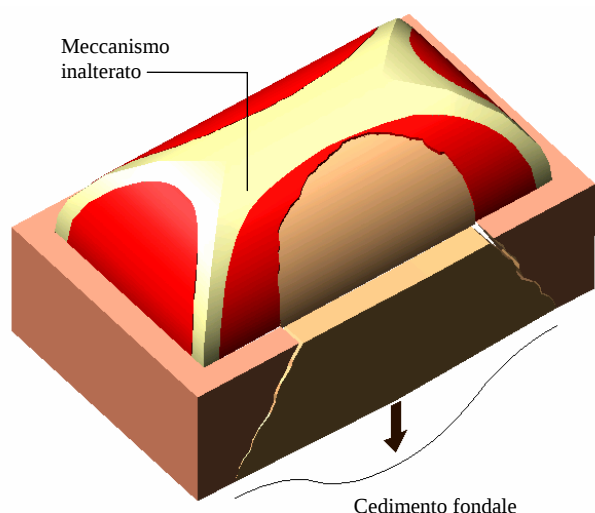


Figura 3.50. Modificazione, irrilevante, del meccanismo resistente spaziale nelle volte a botte con testa di padiglione nell'ipotesi di cedimento fondale localizzato.

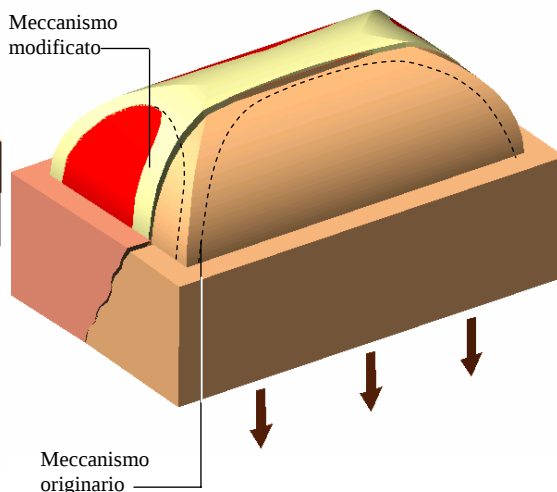


Figura 3.51. Modificazione del meccanismo resistente spaziale nelle volte a botte con testa di padiglione in presenza di cedimento fondale di un muro longitudinale e cantonali.

L'equilibrio delle volte a crociera in condizioni ordinarie è assicurato dal comportamento spaziale già illustrato in precedenza.

In questo modo ogni unghia trova equilibrio nel contrasto con quelle adiacenti, mentre esclude quella contrapposta sulla diagonale. Appare chiaro pertanto che il modello ad archi diagonali incrociati, utilizzato in alcuni casi come schema semplificato della struttura non è assolutamente da prendere a riferimento e risulta addirittura fuorviante ai fini dell'interpretazione del reale meccanismo resistente della crociera.

L'ipotesi di rimozione o di collasso di una o due unghie non impedisce alla volta di trovare una configurazione di equilibrio alternativa, che si realizza con la trasformazione del meccanismo ad archi simmetrici impostati sulle nervature, in un sistema di archi che assume la forma di un "treppiede", impostati sui tre punti di forza in grado di sostenerlo.

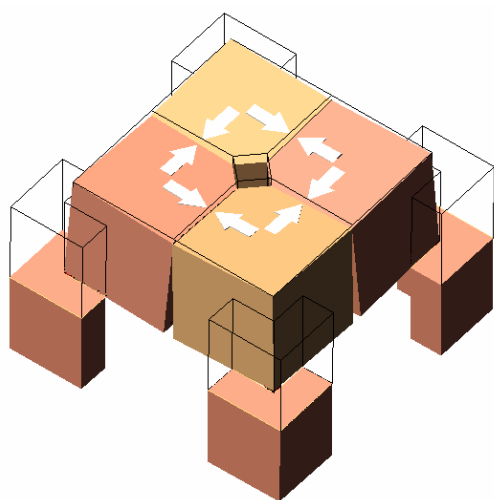


Figura 3.52. Modello a cubi contrapposti che illustra il funzionamento meccanico della volta a crociera

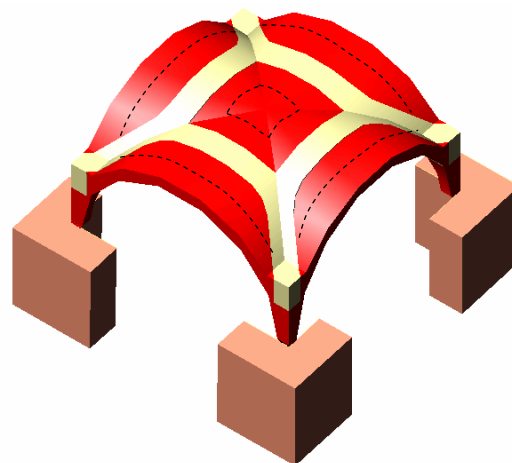


Figura 3.53. Schema del meccanismo resistente spaziale nelle volte a crociera

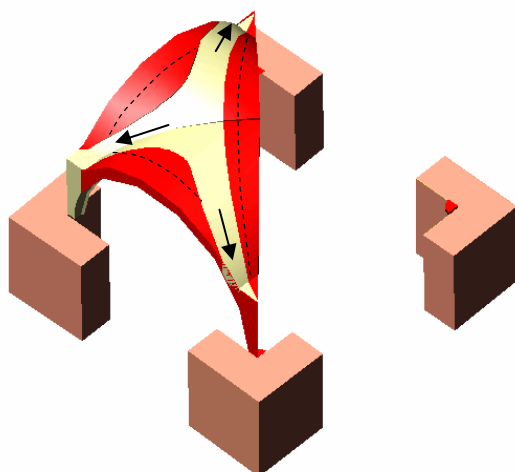


Figura 3.54. Configurazione modificata del meccanismo a “treppiede” su porzione di volta a crociera

Nella struttura dissestata si individua la porzione instabile nel cervello della volta, che non viene raggiunto dai flussi di compressione del nuovo meccanismo.

Nel paragrafo successivo vengono fornite alcune indicazioni sulla modificazione dei meccanismi resistenti anche in relazione alla tecnica costruttiva e al diverso sistema di tessitura dei blocchi.

3.2.5 Volte composte

Dallo studio preliminare sulle geometrie e sui dissesti delle volte si può prendere spunto per analizzare altre forme geometriche altrettanto diffuse nell’edilizia storica, sebbene classificate nella categoria delle volte composte, ottenute dalla combinazione di forme elementari.

Fra queste si distinguono le volte a padiglione con lunette e le cupole su vela con tamburo e lanterna.

Merita soffermarsi sull’analisi di queste tipologie, non solo per il pregio estetico che le contraddistingue, quanto per i suggerimenti che forniscono riguardo al comportamento statico.

Se si osservano con attenzione i dissesti delle volte a padiglione si può individuare l’anello debole di queste strutture nelle porzioni centrali delle vele, che tendono a distaccarsi lungo un profilo curvo e con le modalità illustrate nelle figure n. 3.32 e n. 3.33.

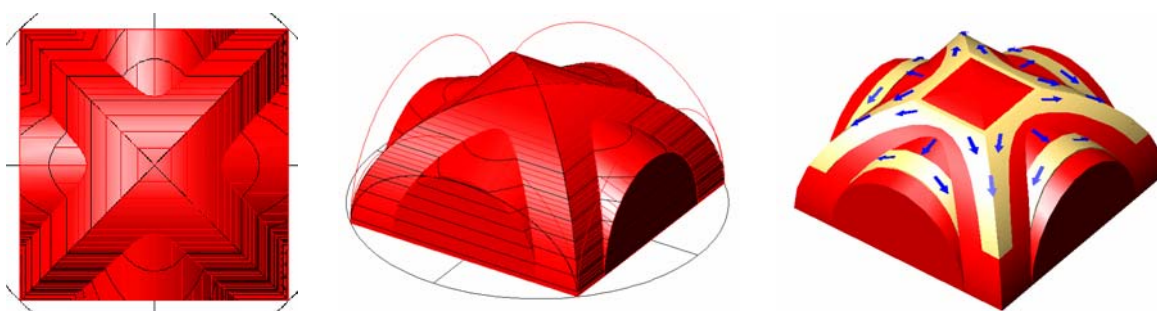


Figura 3.55. Caratteristiche geometriche e meccanismo resistente delle volte a padiglione con lunette perimetrali.

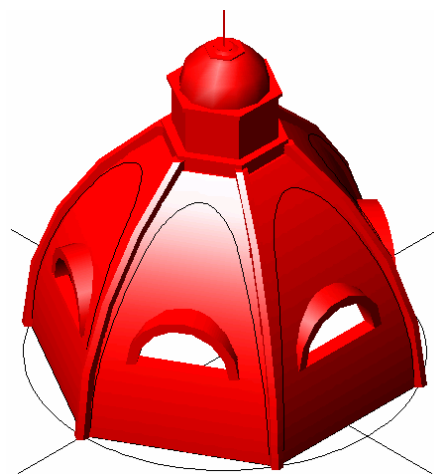


Figura 3.56. Esempio di cupola a base esagonale e profilo ogivale, con lunette d'aerazione e di alleggerimento della struttura lunette ricavate al centro delle vele (o fusi)

L'inserimento di lunette in sostituzione di queste porzioni di vela che manifestano tendenza al distacco costituisce una soluzione efficace sul piano statico per dare stabilità all'intera struttura.

Le lunette hanno il vantaggio di ridurre la massa della volta, liberano porzioni di parete dove si possono ricavare porte o finestre e nel complesso tendono a trasformare la volta a padiglione in una crociera, quando le lunette vanno eventualmente ad estendersi sulle intere pareti. Tuttavia non è questo il motivo principale per cui si costruiscono le lunette; queste servono soprattutto per assolvere funzioni strutturali, per migliorare la configurazione e le prestazioni antisismiche della volta, come si vedrà in seguito

Una soluzione che sfrutta lo stesso principio è quella utilizzata in alcuni tipi di cupole poligonali a profilo ogivale, caratterizzate da vele forate con elementi di varia forma, che oltre a far penetrare aria e luce all'interno dell'ambiente, alleggeriscono pure la struttura, senza intaccare in alcun modo la caratteristica forma a "ragno" che costituisce l'organismo strutturale portante descritto in precedenza.

Nella volta a vela con tamburo, cupola ed eventuale lanterna sommitale, la complessità geometrica è da ritenere frutto di una serie di esigenze costruttive legate alla sicurezza piuttosto che da ricercate forme estetiche.

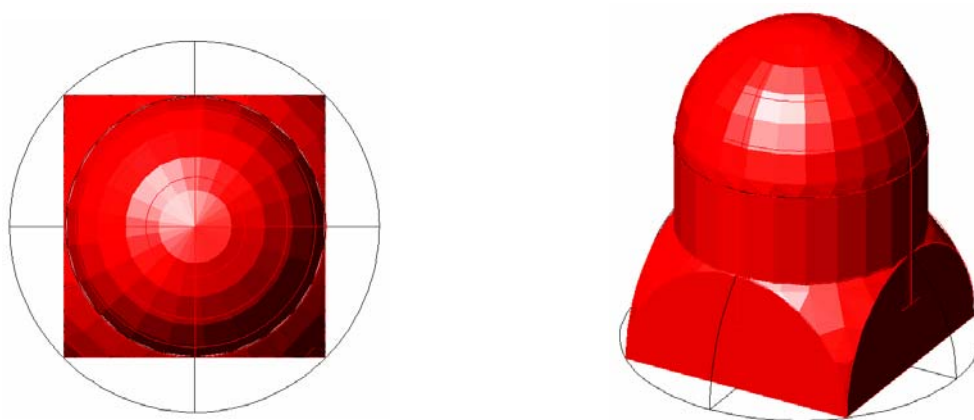


Figura 3.57. Volta a vela con tamburo e cupola

Il punto debole delle cupole emisferiche e delle volte a vela, infatti, è costituito dalla calotta centrale, che per effetto di modesti assestamenti tende ad appiattirsi fino a minacciare il collasso, anche a causa dell'instabilità.

Si pensi al Pantheon, con la sua straordinaria cupola forata al centro, per apprezzare una geniale soluzione costruttiva, che oltre a creare un effetto altamente suggestivo, ha permesso di eliminare a priori l'elemento più vulnerabile della struttura.

Nelle volte a vela l'eliminazione della calotta per l'inserimento del tamburo ha lo stesso scopo e comunque produce lo stesso effetto; il problema dell'instabilità si ripropone poi nella costruzione della cupola impostata sulla sommità del tamburo, al momento della chiusura della porzione centrale.

E' così che un altro artificio costituito dalla realizzazione della tipica lanterna sommitale con cupolotto centrale, viene adottato con la precisa finalità di risolvere il problema strutturale.

Si tratta quindi di soluzioni costruttive suggerite dalla ricerca della sicurezza statica piuttosto che da fattori estetici e che tuttavia si sono evolute sotto forma di caratteri stilistici architettonici di grande effetto.

Per comprendere a pieno la funzione strutturale delle lunette è necessario però riferirsi alle volte a padiglione, dalle quali deriva la famiglia delle volte a "schifo", cosiddette per il caratteristico profilo ribassato che assomiglia alla chiglia (*skif*) delle imbarcazioni.

Le volte a schifo con lunette coprono in genere ambienti di forma rettangolare e appaiono come un concerto di voltine ribassate, distribuite simmetricamente lungo il perimetro del vano, in numero di tre sul lato lungo e due sul lato corto.

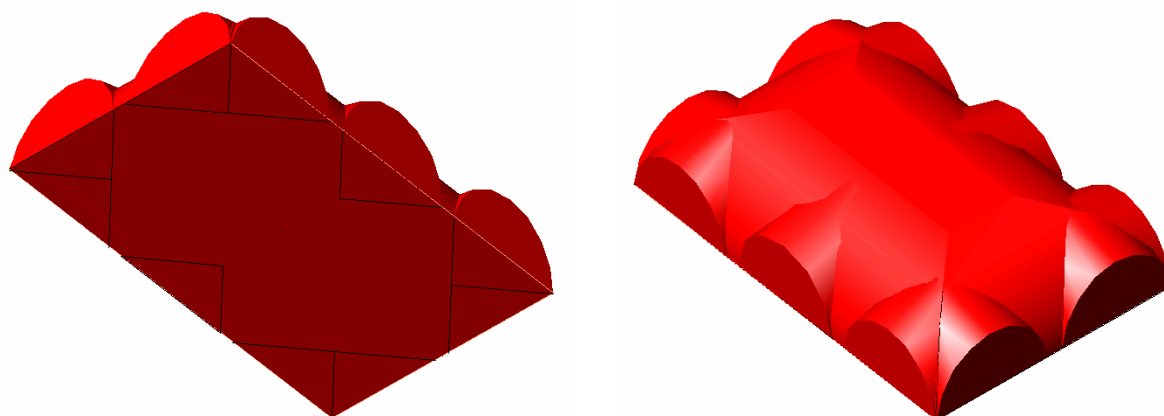


Figura 3.58. Modulo classico di volta a "schifo" con lunette rampanti su impianto rettangolare.

Il ruolo delle lunette per quanto importante nell'ambito del funzionamento meccanico della volta, assume rilevanza anche ai fini della risposta sismica dell'organismo edilizio in base alle interazioni che insorgono fra l'elemento strutturale e i muri d'imposta.

Inserite tra le reni ed il cervello della volta, le lunette si comportano come dei puntoni a contrasto delle reni; una funzione sottolineata peraltro dal profilo rampante delle generatrici, tangenti alla parte sommitale della volta.

Per apprezzare il contributo offerto dalle lunette alla risposta sismica si rimanda alla fig. 3.59 e alla fig. 3.60 e al confronto fra il comportamento della volta a botte classica e quello della volta con lunette.

E' necessario inoltre richiamare il concetto di "*spina attiva*" e "*spinta passiva*" dell'elemento strutturale, sostanzialmente identico a quello introdotto per lo studio della spinta delle terre.

In genere si pensa alle volte come elementi spingenti, che esercitano un'azione "attiva" contro i muri d'imposta e che per questo si aprono all'esterno, ma in condizioni sismiche si possono verificare oscillazioni in controfase, capaci di schiacciare la volta e di avvicinare le imposte. In queste condizioni la volta si oppone al movimento imposto dall'azione sismica e reagisce con una spinta passiva.

La spinta attiva e la spinta passiva corrispondono alla massima e minima curvatura della linea delle pressioni contenuta nella sagoma del nocciolo d'inerzia.

Ciò premesso si comprende come nelle volte a botte, se si trascura il contributo del rinfiango, che può simulare la funzione delle lunette nascoste sull'estradosso, la spinta attiva e la spinta passiva si equivalgono sostanzialmente.

I muri d'imposta possono così oscillare attorno alla posizione di equilibrio, mentre il cervello della volta si solleva e si abbassa con la stessa frequenza.

Un moto regolato da un cinematismo a cinque cerniere che si formano spontaneamente alle basi dei muri e all'interno della volta.

Nelle volte a botte con lunette non si verifica la stessa situazione.

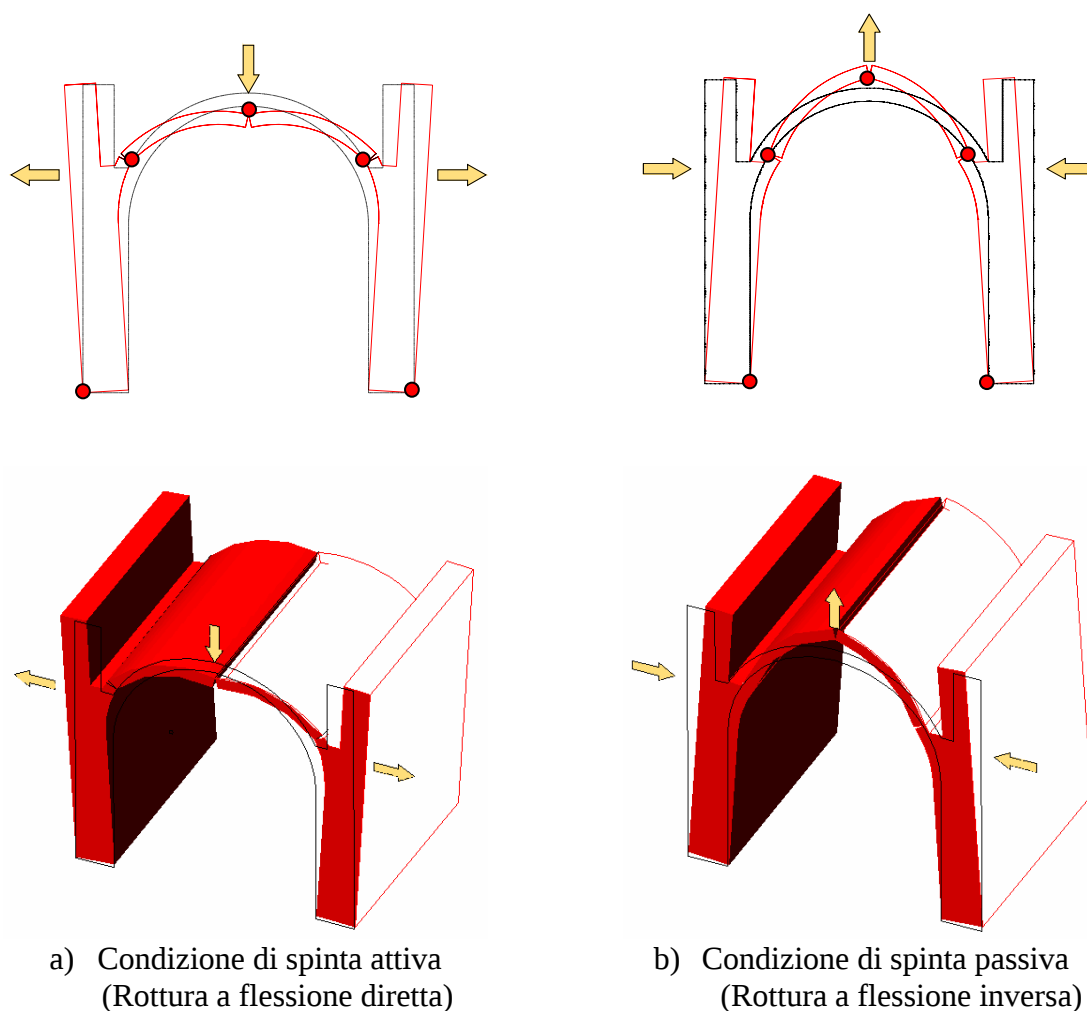


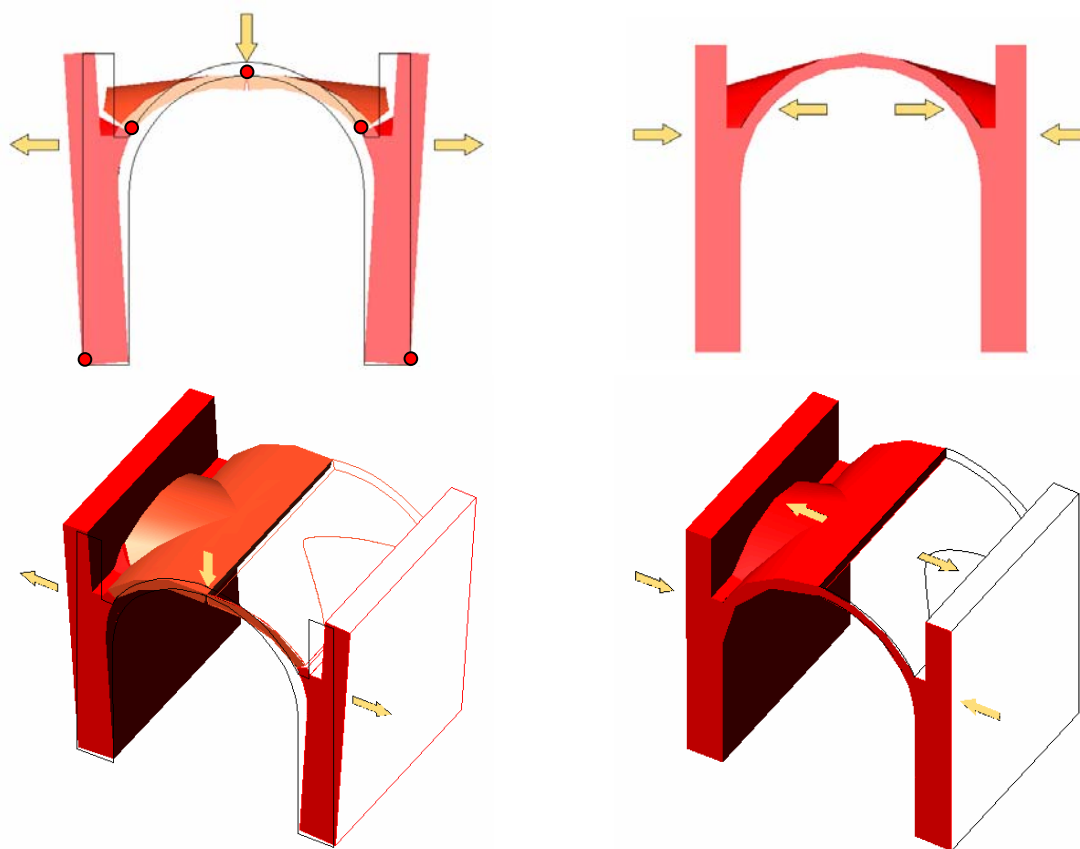
Figura 3.59. Comportamento delle volte a botte sotto l'azione di un sisma agente in direzione ortogonale ai muri d'imposta:

- (a) fase distensiva;
(b) fase compressiva, determinata da una oscillazione in controfase dei muri d'imposta

In verità il comportamento non cambia molto nei confronti della spinta attiva, nel senso che le pareti si aprono all'esterno con le stesse modalità illustrate per la volta a botte, mentre si formano le cerniere classiche alle reni, in chiave e alle imposte. La fase distensiva produce le tipiche lesioni alle reni, che in questo caso si propagano nella struttura delle lunette costrette a distaccarsi dalle pareti.

Il movimento opposto invece è impedito, per cui la fase compressiva trova il contrasto efficace delle lunette che bloccano il movimento relativo delle pareti, quindi la volta si comporta come un vincolo monolatero.

Si intuisce pertanto che se le lunette introducono un fattore stabilizzante per le volte, creando le condizioni per impedire l'avvicinamento delle imposte, l'inserimento di tiranti trasversali, nascosti sull'estradosso della volta o posti alle reni, realizza un vincolo bilatero in grado di bloccare qualsiasi movimento relativo fra la volta e le pareti.



Configurazione di dissesto per effetto della spinta attiva nella volta a botte con lunette

a) Azione di contrasto determinata dalle lunette a contatto delle pareti d'imposta

Figura 3.60. Il comportamento non varia in condizioni di spinta attiva, mentre si modifica sostanzialmente per la diversa capacità di contrasto della spinta passiva, per cui le lunette funzionano come dei puntoni che impediscono alle pareti di avvicinarsi.

L'esempio delle volte a botte in camera-canna irrigidite sull'estradosso con l'inserimento di puntoni in legno di contrasto atti a simulare la funzione delle lunette, conferma l'efficacia di questa soluzione che trova un'analogia nei frenelli utilizzati allo stesso scopo, con funzione sostitutiva del riempimento, con il vantaggio di alleggerire pure la volta.



Figura 3.61. Puntoni in legno su volta in camera-canna

3.3 TECNICHE COSTRUTTIVE TRADIZIONALI

Quanto illustrato nei paragrafi precedenti prescinde dalle tecniche costruttive impiegate. Nella realtà le cose sono diverse, nel senso che intervengono numerosi fattori a modificare il funzionamento meccanico e fra questi certamente il modo di costruire la volta e le caratteristiche dei materiali impiegati.

Volte in concreto, realizzate in pietra sbazzata o squadrate, oppure in laterizio ad una o due teste di mattoni, anche se presentano la stessa geometria, mostrano un comportamento sensibilmente diverso, che si può distinguere meglio quando si manifestano dei dissesti.

La diffusione degli sforzi nello spessore della volta è influenzato dal sistema di tessitura degli inerti, dalla consistenza delle malte e, a livello più generale, dalle condizioni al contorno della struttura.

Finora si è preso in esame un impianto generico di forma quadrata costituito da una singola cellula muraria, peraltro in condizioni di perfetta simmetria, secondo una configurazione poco frequente.

Nella realtà si presentano situazioni in cui le volte possono coprire locali d'angolo o ambienti interclusi, influenzate nel comportamento statico da un'azione di contenimento che produce effetti diversi sui lati delle pareti interne rispetto a quelle esposte.

Ogni situazione presenta delle specificità, tuttavia i principi generali illustrati in premessa valgono comunque e aiutano ad interpretare il funzionamento delle volte in qualsiasi condizione.

Per fare questo è necessario però avere un'ampia casistica di strutture da studiare sotto vari aspetti, dalla geometria dell'ambiente e della volta, all'interazione con le pareti d'imposta e con le strutture adiacenti.

Conoscere la tecnica costruttiva è fondamentale, ma non sufficiente per esprimere un giudizio di qualità complessivo, che resta legato soprattutto alla capacità delle maestranze e alla loro padronanza del mestiere. In passato i mastri muratori riuscivano a costruire volte complesse sulla base di poche indicazioni di carattere geometrico- strutturale, mentre oggi il ruolo di "mastro" istruttore spetta necessariamente a un Direttore dei Lavori preparato, capace di interpretare in modo critico le tecniche costruttive tradizionali.

A tal fine si rileva molto utile la manualistica di settore, per recuperare una pratica costruttiva che non è stata tramandata alle ultime generazioni, e per riscoprire delle tecniche spesso abbandonate, ma rivalutate nell'ottica di un recupero filologico dell'edilizia storica.

Per un approccio allo studio di alcune di queste strutture vengono riportati di seguito alcuni esempi di volte di tipo tradizionale, realizzate con materiali e tecniche diverse che hanno caratterizzato l'edilizia di determinati periodi storici, in cui sono prevalse le une o le altre in funzione della disponibilità dei materiali, della economicità e della funzionalità.

Sul modo di scegliere il profilo di volta che conviene all'ambiente da coprire e sulle tecniche di costruzione adatte a ciascun impiego, ottime casistiche e spiegazioni esaurienti si possono reperire nei trattati di architettura pratica come le diverse edizioni del "Breymann" e del "Valadier", pubblicati nel XIX e nel XX secolo, in cui lo sviluppo della scienza delle costruzioni offre supporto alla pratica costruttiva tramandata nei secoli.

Nell'Architettura Pratica, che Giuseppe Valadier pubblica a Roma, in cinque volumi, tra il 1828 ed il 1833, vi si afferma: "[...] una lunga pratica senza teoria, non è sufficiente a ben costruire le volte, [...]". Oggi si registra esattamente il contrario, nel senso che i manuali moderni hanno permesso di recuperare molte conoscenze teoriche sul modo di costruire le volte, sebbene non trovino riscontro nell'esercizio della pratica costruttiva.

Il Valadier, nel suo trattato, indica almeno dieci diverse soluzioni costruttive riguardanti sia le volte reali, sia quelle destinate alla sola funzione di controsoffittatura.

Nella categoria di maggiore efficacia, come anche di elevato impegno costruttivo rientrano le volte in pietra da taglio, quindi le volte di mattoni, che garantiscono comunque un ottimo accostamento dei blocchi con giunti di spessore regolare, mentre quelle in pietrame sbizzato e irregolare sembrano altrettanto solide, ma in realtà si dimostrano piuttosto instabili.

L'apparecchio in pietra sbizzato o pietrame è comunque molto diffuso per reperibilità, lavorabilità del materiale e facilità di apparecchio. Ne accredita l'uso l'esempio offerto dalla durabilità delle volte dell'antichità romana realizzate in pezzame di pietra cementato a pozzolana.

I mattoni, grazie alla forma regolare ed alla facile lavorabilità, permettono di costruire volte con geometrie piuttosto complesse.

A differenza delle pesanti volte in pietrame, quelle in laterizio consentono spessori più contenuti, con una vantaggiosa riduzione dei pesi e quindi delle spinte contro i muri d'imposta.

Gli spessori in chiave nelle volte di pietra raggiungono circa 1/10 della luce netta (L.B. Alberti suggerisce 1/15), mentre in quelle laterizie tali spessori possono essere dimezzati senza rischio di instabilità per le strutture. La forma e il grado di finitura dell'intradosso si caratterizzano in rapporto alla destinazione d'uso dei locali. Pertanto negli ambienti più ricchi si osserva una qualità architettonica che non si ritrova negli spazi utilitari dei fondi, dove apparecchio e finitura sono più sommari e sovente, sulla tessitura dei mattoni priva di intonaco, si rilevano residui delle canne dell'armatura.

L'uso del mattone si presta all'adozione di semplici geometrie a botte od a crociera, ma anche a forme più complesse che, specie in epoca rinascimentale e barocca, vedono privilegiati i profili a padiglione ribassato arricchiti con lunette perimetrali destinate ad ospitare i vani di accesso e aeroilluminanti.

Le luci ordinarie corrispondono alle dimensioni medie delle maglie murarie, dell'ordine di cinque o sei metri, ma si possono coprire luci molto più estese adottando spessori rinforzati di due e tre teste di mattone o disponendo semplici arcate di irrigidimento a vista all'intradosso o all'estradosso, nascoste nello spessore del riempimento.

Le spinte esercitate contro le imposte sono generalmente compatibili con la capacità di contrasto assicurata dalle pareti del piano terra grazie al peso trasmesso dalle strutture

sovrastanti. Le forze orizzontali applicate al primo livello vengono deviate agevolmente verso la fondazione, a differenza di quanto accade alle quote superiori, dove l'effetto stabilizzante decresce in proporzione alla massa residua sovrastante. Per questo i soffitti a volta presenti nei piani alti dei fabbricati sono realizzati di regola con realine di mattoni in foglio, oppure con la tecnica della camera-canna, destinati ad una prevalente una funzione estetica e decorativa.

3.3.1 Volte laterizie

La volta laterizia rappresentata in fig. 3.54, rilevata al piano terra di un edificio cinquecentesco, riassume le caratteristiche salienti di una tecnica costruttiva molto diffusa, facilmente adattabile ad ambienti di forma rettangolare.

La tecnica consiste in un apparecchio di mattoni a coltello disposti secondo le generatrici della superficie cilindrica, pertanto detta a "tessitura longitudinale".

I peducci di pietra sono posti ad interasse regolare su ciascun lato e segnano il passo strutturale delle lunette. Di regola a questi elementi compete una semplice funzione decorativa, essendo costituiti da lastre di pietra sottili applicate alla parete in fase di rifinitura; raramente i peducci sono ricavati da blocchi di maggiore dimensione e innestati nel muro per contribuire alla diffusione degli sforzi nella parete.

Lo spessore della volta costituisce un'altra caratteristica importante dell'elemento costruttivo, tuttavia non costituisce di per se un elemento determinante ai fini della qualità strutturale.

Nell'esemplare rilevato lo spessore è di una testa di mattone e la volta presenta un profilo ellittico ribassato; questa conformazione permette di contenere lo spessore del materiale di riempimento necessario per creare il piano di calpestio con una sensibile riduzione del peso proprio.

I mattoni, apparecchiati di coltello, sono disposti a giunti sfalsati su filari paralleli, interrotti a cadenze regolari dalla tessitura trasversale delle lunette.

La posa in opera dei mattoni avviene sopra una centina opportunamente sagomata e non richiede particolari accorgimenti, ad eccezione dei tagli necessari per creare delle solide nervature e quindi per garantire la continuità strutturale.

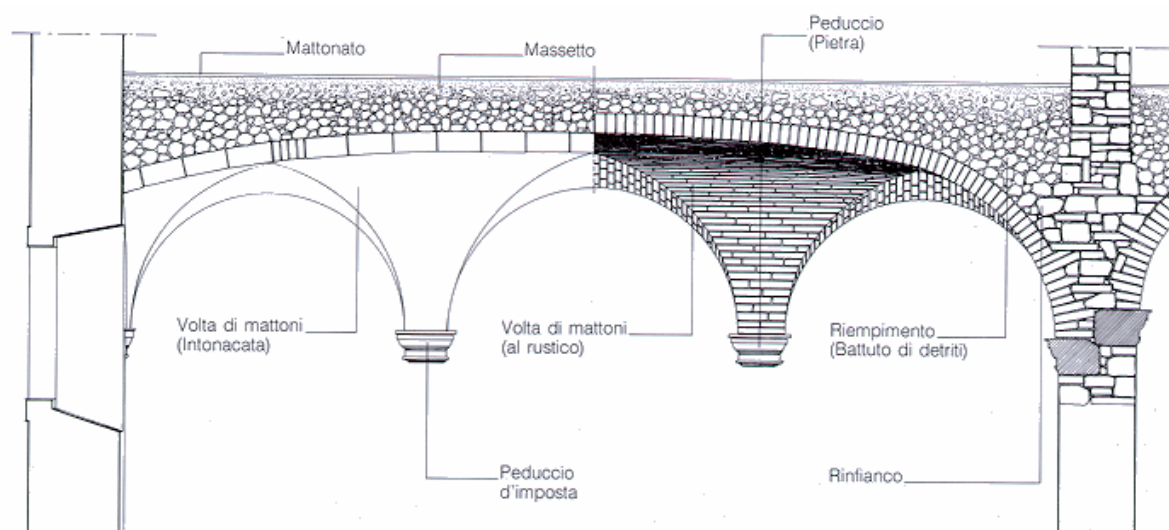


Figura 3.62. Volta a padiglione con lunette perimetrali - Sezione longitudinale.

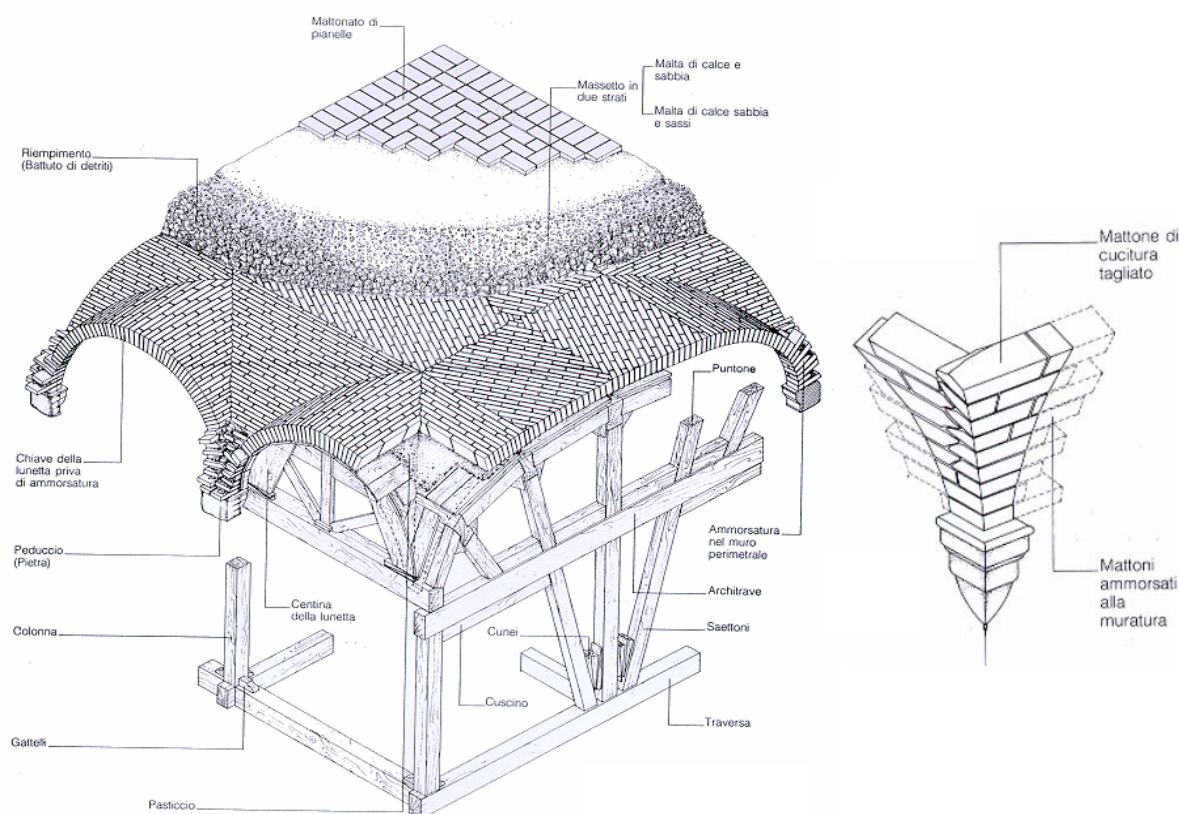


Figura 3.63. Volta a padiglione con lunette perimetrali.
Vista assonometria con particolare della nervatura².

All’imposta della nervatura i mattoni sono appoggiati l’uno sull’altro e uniti con le facce sovrapposte, mentre in chiave vengono accostati di testa, passando attraverso configurazioni intermedie che richiedono tagli complessi con angolazioni che variano in relazione alla quota raggiunta.

Tagliati una prima volta per aderire al profilo della centina, subiscono un secondo taglio per creare l’ingranamento con il filare ortogonale, secondo un procedimento che richiede tempo, conoscenza della tecnica e abilità pratica.

Un altro importante accorgimento tecnico che si deduce anche dalla rappresentazione assonometrica, consiste nell’assenza di ammorsature fra le lunette e le pareti perimetrali.

Questo è necessario per non creare impedimenti al naturale assestamento della volta nel momento del disarmo, quando l’abbassamento fisiologico del campo centrale e delle lunette causerebbe una immediata rottura dei mattoni innestati nel muro.

Questa poco nota particolarità costruttiva, conferisce alla volta il carattere di struttura “isostatica”, capace di adattarsi a diverse configurazioni geometriche senza determinare l’innescò di tensioni coattive.

La configurazione isostatica della volta è accentuata dai giunti fra i mattoni, realizzati con malta di calce di scarsa resistenza, in grado di simulare dei vincoli a cerniera.

Questa particolarità delle volte tradizionali è in netto contrasto con alcune tecniche di consolidamento di uso comune che, al contrario, tendono a rendere la struttura altamente iperstatica.

² G. Cangi, *Manuale del Recupero di Città di Castello*, a cura di F. Giovanetti, Roma (Edizioni DEI), 1992

Il riempimento dell'estradosso è costituito da calcinacci battuti, sopra i quali viene realizzato un massetto in malta di calce, sabbia grossa e detriti, mentre il mattonato di finitura è adagiato su uno strato di allettamento in malta di calce e sabbia passata al setaccio.

L'apparecchio del campo centrale nell'esemplare illustrato definisce una tessitura a rombo simmetrica rispetto agli assi mediani, con un apprezzabile risultato estetico, benché la superficie fosse destinata ad essere intonacata.

Ciò lascia supporre che la disposizione dei filari diagonali sia motivata soprattutto da esigenze statiche; probabilmente per indirizzare i flussi di compressione verso le imposte d'angolo.

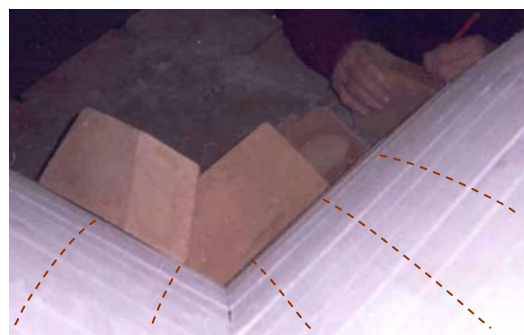
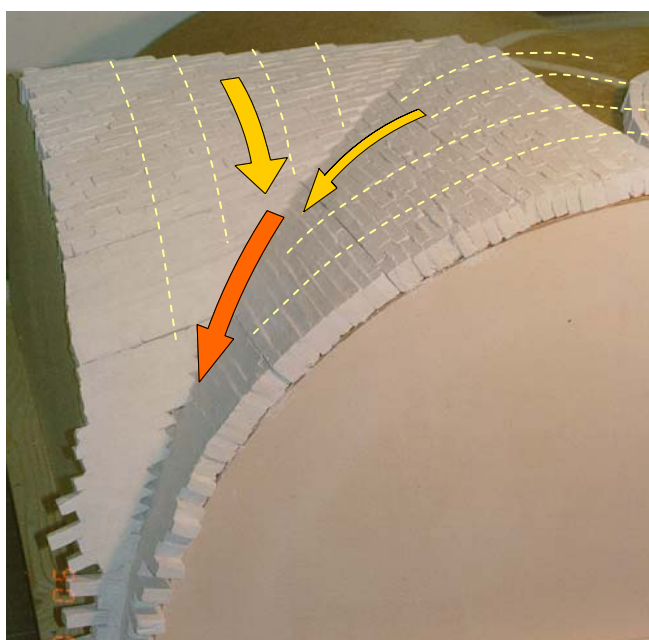
La costruzione della volta aveva inizio con la realizzazione dei tratti d'imposta fra i peducci e le reni, mediante l'impiego di forme di legno. Nella fase successiva si procedeva alla disposizione dell'armatura necessaria alla costruzione del campo centrale.

Questa consisteva in centine di legno del tipo illustrato nella vista assonometrica, rifinite superiormente con un impasto di argilla ed una stuoia di canne, modellati secondo la geometria desiderata.

Il disarmo doveva avvenire lentamente, in più giorni e con estrema cura, allentando i cunei di legno per mettere in tensione la volta. L'allentamento graduale permetteva così di controllare anche gli effetti indotti sui muri d'imposta.

Nelle volte, a prescindere dalla specifica configurazione geometrica, le nervature costituiscono i punti di forza del funzionamento meccanico spaziale, che le contraddistingue rispetto agli elementi bidimensionali come i solai. Tutti i meccanismi resistenti illustrati nei paragrafi precedenti fanno forza sulle nervature per assicurare l'equilibrio globale del sistema. Se mal realizzate, tuttavia, si possono rivelare come i punti più deboli della struttura, particolarmente vulnerabili e pericolosi, al punto da comprometterne l'equilibrio.

Eventuali carenze o difetti costruttivi delle nervature si manifestano in modo evidente sotto l'effetto delle sollecitazioni torsionali che si generano in condizioni sismiche, a causa dell'eccentricità fra il baricentro delle masse e quello delle rigidità.



Modello in scala di volta laterizia realizzato nell'ambito del Laboratorio Urbanistico per il Centro Storico di Città di Castello (G.Cangi, 1990) e fasi esecutive di un modello al vero realizzato presso il Centro di Formazione Professionale "G.O. Bufalini" di Città di Castello (PG), nell'ambito del *Corso per operatori del recupero edilizio* (G. Cangi, 1997)

Figura 3.64. Modelli di volta laterizia in scala e al vero realizzati con sistema di tessitura longitudinale.

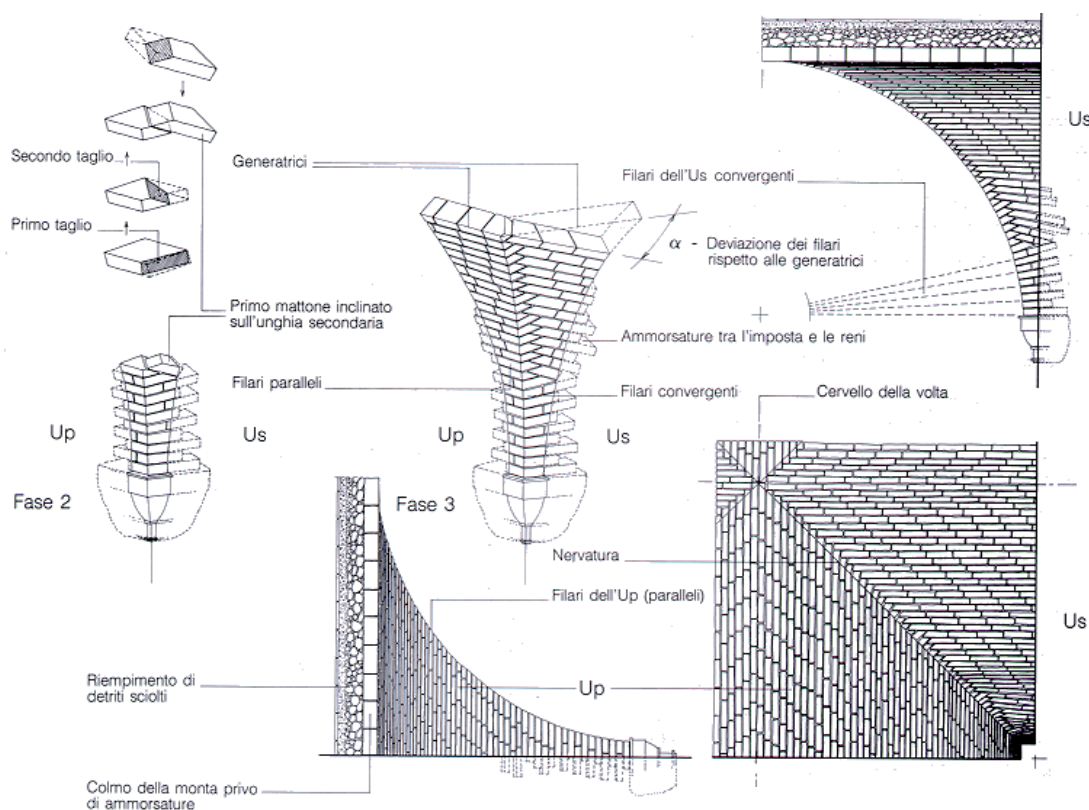


Figura 3.65. Volte a crociera con tessitura secondo le generatrici (longitudinale) - Stereotomia dei laterizi alle reni della nervatura.

Il problema deriva dall'impossibilità di scaricare gli sforzi di taglio lungo le nervature, come se le cerniere rappresentate dall'ingranamento dei mattoni si trasformassero in altrettanti carrelli, capaci di assorbire solo gli sforzi ortogonali al piano medio delle nervature e ciò influisce molto sulle prestazioni statiche dell'elemento costruttivo.

Quando gli ingranamenti funzionano si creano dei circuiti di diffusione delle tensioni tangenziali a tutto giro (fig.3.66b), mentre in assenza di connessioni ciascuno spicchio di volta offre una risposta indipendente (fig.3.66a).

Nelle cupole ogivali, caratterizzate da un maggiore rapporto fra lo sviluppo in altezza e il diametro della base, la torsione risulterebbe una sollecitazione particolarmente gravosa, se non fosse per il fatto che quasi mai si verifica, a causa della distribuzione simmetrica delle masse.

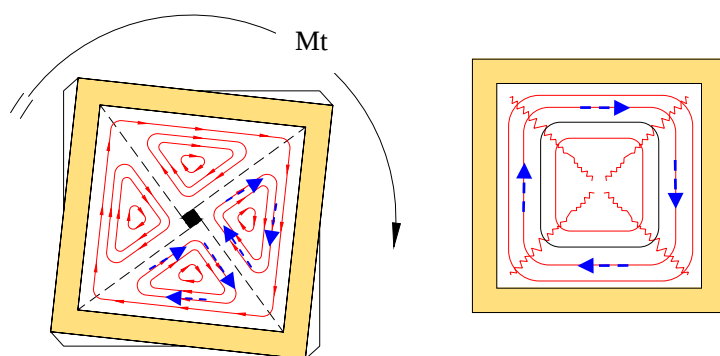


Figura 3.66. Flussi delle tensioni tangenziali indotti dalla torsione nelle volte a crociera con nervature non ingranate e ingranate



Figura 3.67. Imposta di volta laterizia a crociera con nervatura a mattoni ingranati a regola d'arte, realizzata presso il Centro di Formazione Professionale "G.O. Bufalini" dagli Allievi del Corso di riqualificazione per operatori del recupero edilizio svoltosi a Città di Castello (PG) nel 1997.
Docente di laboratorio:
Primo Granci

L'immagine di uno spremiagrumi sotto sforzo torsionale rende perfettamente l'idea sul tipo di sollecitazione cui sono sottoposte le nervature e ciò permette di apprezzare l'importanza delle "saldature" capaci di tenere uniti o meno gli spicchi della volta.

All'interno degli edifici, al contrario, la torsione costituisce una sollecitazione prevedibile e piuttosto frequente, molto gravosa per la tenuta delle nervature.

A causa di queste oggettive difficoltà esecutive molto spesso è stata preferita una tecnica alternativa già in uso nel medioevo, nota come "posa schianciana"; un apparecchio di più semplice realizzazione, ma non privo di alcune controindicazioni strutturali.

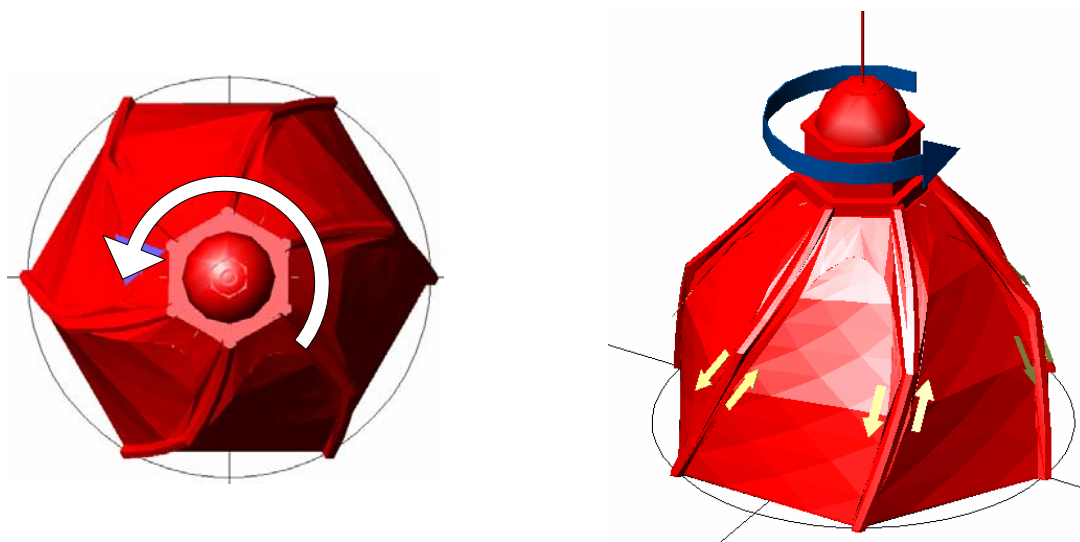


Figura 3.68. Effetto prodotto dalla torsione nelle cupole poligonali con scorrimento delle nervature.

La volta, sollecitata come uno "spremiagrumi", mostra una buona rigidezza solo se è ben saldata lungo le nervature



Figura 3.69. Chiesa di San Galgano (Siena)
Copertura della navata laterale:
volta laterizia a crociera con costolature
(Foto F. Massetti).



Figura 3.70. Chiesa di San Galgano (Siena) Copertura della navata laterale:
volta a crociera lapidea con costolature
(Foto F. Massetti)



Figura 3.71. Chiesa di San Galgano (Siena):
la costolatura laterizia ricopriva la nervatura
completamente priva di ammorsature.
(Foto F. Massetti)

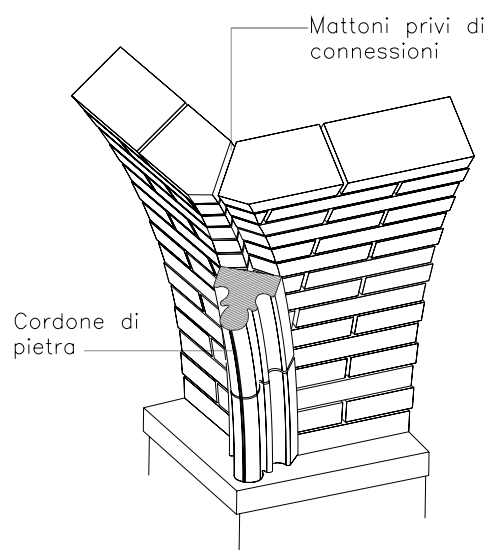


Figura 3.72. Costolatura di pietra in
edifici di pregio utilizzata per mascherare
l'assenza di ammorsature.

La tecnica a tessitura diagonale deriva proprio da una ricercata semplificazione nella costruzione delle nervature e da queste prende origine per estendersi all'intera superficie della volta, con filari di mattoni che disegnano linee diagonali.

I vantaggi rispetto alla tecnica tradizionale sono evidenti; i mattoni appoggiati in diagonale sulle nervature richiedono un solo taglio di adattamento all'angolo che formano le unghie alle diverse quote.

Nonostante la semplice modalità costruttiva la tecnica schianciana è meno diffusa di quella classica, per una minore affidabilità sul piano della stabilità.

La realizzazione dell'imposta è simile a quella della tecnica classica, ma al procedere della costruzione verso le reni emergono significative differenze nella disposizione dei mattoni, ancora più evidenti quando ci si avvicina al punto di chiave.

Il cervello della volta a tessitura diagonale chiude con la formazione di rombi che si restringono verso il centro, mentre con i mattoni disposti secondo le generatrici si forma una croce orientata secondo gli assi mediani della struttura.

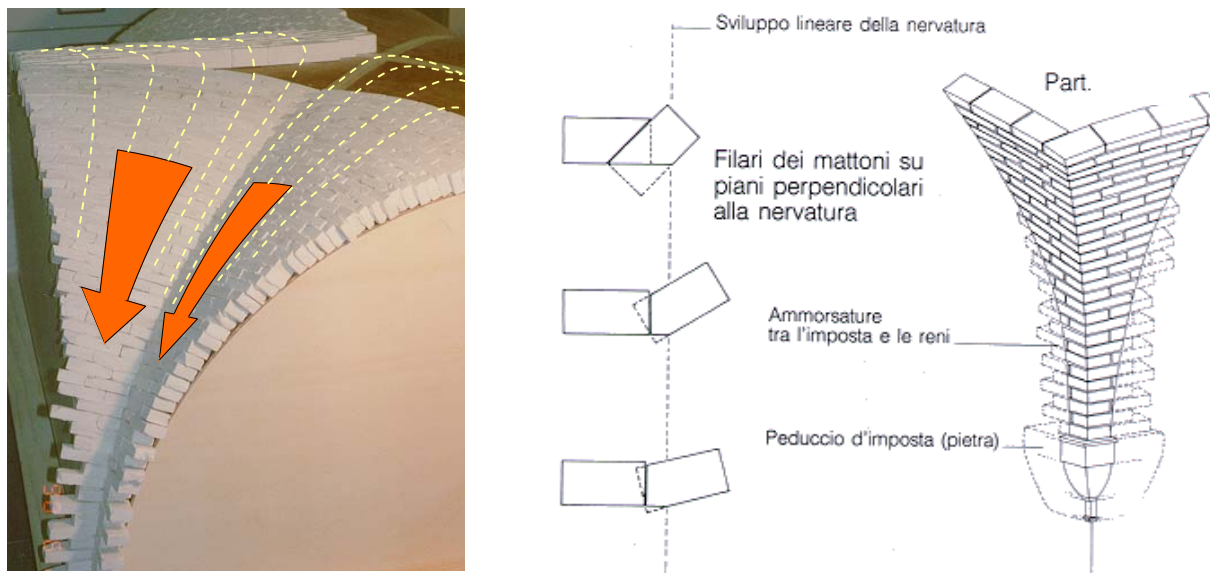


Figura 3.73. Modello in scala di volta a crociera con tessitura “schianciana” a filari diagonali raccordati, con particolare del pennacchio d’angolo (G.Cangì, 1990).

Il disegno dei filari di mattoni e dei giunti di malta che appaiono all'intradosso è molto diverso nei due casi, per cui dal solo aspetto esteriore si riesce a riconoscere senza dubbi la tecnica impiegata, quando l'intonaco non ricopre il paramento.

Quella estetica è tuttavia una questione marginale; l'equilibrio globale della struttura infatti non dipende dal tipo di tessitura, mentre vi sono delle differenze sensibili nella diffusione degli sforzi interni.

Nella configurazione classica i flussi di compressione seguono l'andamento degli archi impostati sulle nervature diagonali, secondo i meccanismi resistenti delle volte a crociera illustrati in precedenza (fig. 3.22). Nelle stesse crociere, realizzate con la tecnica schianciana, i flussi di compressione seguono percorsi ortogonali ai giunti e assumono una configurazione assimilabile al meccanismo resistente illustrato per le volte a padiglione, con gli archi inclinati verso il centro della volta (fig. 3.25).

I modelli in scala illustrati in figura 3.64 e in figura 3.73, con l'indicazione dei flussi di compressione, permettono di confrontare meglio i due tipi di tessitura, che in pratica influiscono molto sul comportamento meccanico, a conferma del fatto che il funzionamento è influenzato anche dai materiali e della tecnica di posa in opera, per quanto la tendenza risponda sostanzialmente ai modelli generali proposti in precedenza.

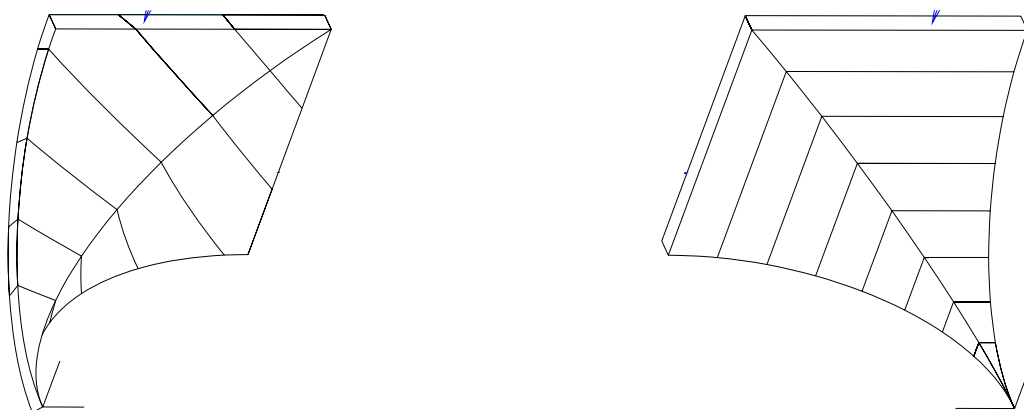


Figura 3.74. Orientamento dei filari di mattoni nei quarti di crociera realizzati con la tecnica “schianciana” e con la tecnica classica.

3.3.2 Volte in pietra.

Quanto descritto sul funzionamento delle volte laterizie e sulle problematiche poste dall’analisi di questi elementi strutturali, invita ad approfondire alcuni aspetti relativi alla costruzione delle volte in pietra da taglio e di quelle in pietrame sbozzato, che a differenza delle prime richiedono spessori maggiori per assicurare la stabilità del sistema.

Le volte in pietra sono molto più pesanti di quelle di mattoni, a causa di un maggiore peso specifico abbinato ad una geometria nel complesso più massiccia, inoltre non si prestano alla realizzazione di geometrie troppo articolate, se non attraverso lavorazioni complesse. In tal caso si trae notevole beneficio anche nel miglioramento delle prestazioni statiche.

Un esempio interessante è rappresentato dagli elementi delle nervature nelle volte a crociera in pietra da taglio, realizzate con un’alternanza di elementi ingranati che risolvono in modo efficace il problema delle connessioni già evidenziato per le volte laterizie.



Figura 3.75. Cucitura simmetrica della nervatura di volta a crociera in pietra da taglio



Figura 3.78. Architettura gotica francese nell'Isola di Cipro: esempi di volte in blocchi regolari di calcarenite - Kyrenia (Girne), Abbazia di Bellapais.

Le nervature si trasformano così in veri punti di forza della volta con un ruolo analogo a quello dei cantonali negli edifici.

Una conformazione dei conci di pietra rispondente alla geometria delle centine è indispensabile per montare l'elemento costruttivo con rapidità e precisione e per ridurre al minimo gli spessori dei giunti di malta.

Al contrario, l'impiego di pietra sbozzata e con forme arrotondate, trasferisce alla calce l'importante funzione di assicurare resistenza e stabilità; questo ruolo è tanto più importante quanto più si riducono le dimensioni delle pietre impiegate, fino a prevalere sulle stesse, quando la muratura assume le caratteristiche e la consistenza di un calcestruzzo, come nelle antiche volte romane.

La forma delle pietre non influisce solo sull'aspetto della volta, ma anche sul funzionamento statico e sulle modalità d'innescio ed evoluzione dei cinematismi di danno.

Nelle strutture laterizie le superfici di contrasto sono definite dalle facce regolari dei mattoni posti a contatto e le cerniere plastiche si formano nelle sezioni critiche in prossimità degli spigoli inferiore e superiore.

Con l'impiego di pietre arrotondate le sezioni resistenti non si individuano con precisione e le cerniere si generano in posizione arretrata rispetto al filo del paramento. Questo equivale ad una riduzione dello spessore efficace, ovvero, nella definizione di uno spessore virtuale da utilizzare per le verifiche statiche, tanto più ridotto quanto più arrotondate sono le pietre stesse.

Questa situazione determina un sensibile incremento degli stati tensionali, e introduce il rischio di instabilità in relazione al ridotto spessore virtuale della volta che influisce sulla snellezza dell'elemento strutturale.

La disgregazione della malta di sigillatura dei giunti e la conseguente espulsione del materiale produce un'ulteriore riduzione dello spessore virtuale che favorisce l'evoluzione del dissesto e quindi il collasso della struttura.

In realtà i fenomeni di instabilità delle volte in pietra non sono così frequenti, mentre il peso eccessivo e le spinte che ne derivano tendono a produrre dissesti amplificati rispetto a quelli determinati da strutture laterizie di simili dimensioni.



Figura 3.79. Famagosta (Cipro):
rovine della chiesa di S.Giorgio dei Greci.
Alleggerimento delle volte ottenuto
mediante l’inserimento di vasi (*testi*) fra il
materiale di riempimento.

3.3.3 Volte di mattoni in foglio.

Fino al Settecento inoltrato, la tecnica di voltare con mattoni apparecchiati a coltello è quella comunemente utilizzata, una tecnica che comporta gran quantità di laterizi e gran peso della struttura.

Un modo di costruire alternativo è quello delle volte di mattoni in foglio, introdotta dalla Francia a metà del 1700 e favorita dall’uso della malta contenente gesso, che facilita la posa in opera e permette una notevole riduzione dei tempi di realizzazione. Il tipo costruttivo prende piede e si diffonde sia nell’edilizia cittadina che nell’ambiente rurale.

I mattoni vengono appoggiati sulla centina con la faccia principale, in modo da risparmiare almeno due elementi su tre a parità di superficie coperta.

L’esile spessore dell’apparecchio laterizio non giova alla stabilità della struttura, pertanto in questi elementi costruttivi sono sempre inseriti degli archi di rinforzo, nascosti sull’estradosso o posti in vista all’intradosso, dove si dimostrano più efficaci.

Questo perché lo sbandamento dell’esile struttura laterizia verso l’alto è contrastato dal materiale di riempimento, mentre all’intradosso si confida sull’effetto forma garantito dagli archi di irrigidimento, grazie ai quali il sistema è in grado di sopportare sia i carichi statici, sia le sollecitazioni dinamiche determinate dal sisma.

Il rinfianco e il riempimento dell’estradosso contribuiscono a migliorare la stabilità globale a scapito di un modesto incremento della spinta, pertanto di regola non andrebbero rimossi.

Una soluzione accettabile consiste nel rimuovere il riempimento per sostituirlo con materiali alleggeriti, ma di buona resistenza meccanica, per assicurare una adeguata capacità di contrasto.

La geometria delle volte a crociera, in rapporto all’esilità della sezione resistente, garantisce maggiore stabilità di forma, per la reciproca azione di contrasto esercitata dalle unghie contrapposte.

La figura 3.80 illustra questo tipo di volta con un esempio realizzato alla fine del 1800 secondo la tecnica allora denominata delle “*volterrane*“, rilevato in un edificio di Città di Castello (PG). Il manto è realizzato in mattoni apparecchiati in foglio, quindi accoppiati per costa, murati con malta di gesso e disposti secondo le generatrici.

La struttura è costituita da cinque campate consecutive e impostata su pilastri di muratura appositamente realizzati contro le pareti laterali di un unico ambiente preesistente.

L'ingranamento dei laterizi lungo la nervatura diagonale è realizzato con la medesima tecnica di taglio illustrata per le volte di mattoni in coltello, ma più semplice da realizzare stante i minori spessori interessati. La chiusura in chiave si presta a soluzioni diverse e originali, in funzione dello spazio residuo fra gli ultimi filari. Questo genere di lavorazione può consentire l'uso di centine mobili associate alla rapida presa di malta a base di gesso e grazie al modesto peso della struttura.

Il tipo di volta appena descritto, opportunamente rinfiancato, è destinato a sostenere piani di calpestio, ed è stato rinforzato con archi di rincalzo e contrafforti.

Frequente è anche l'impiego eminentemente decorativo delle volte di mattoni in foglio che in tal caso, comunque rinfiancate fino alle reni, provvedono solo a sostenere se stesse e a qualificare architettonicamente l'ambiente coperto, mentre al sostegno del piano di calpestio superiore provvede un solaio ligneo nascosto alla vista.

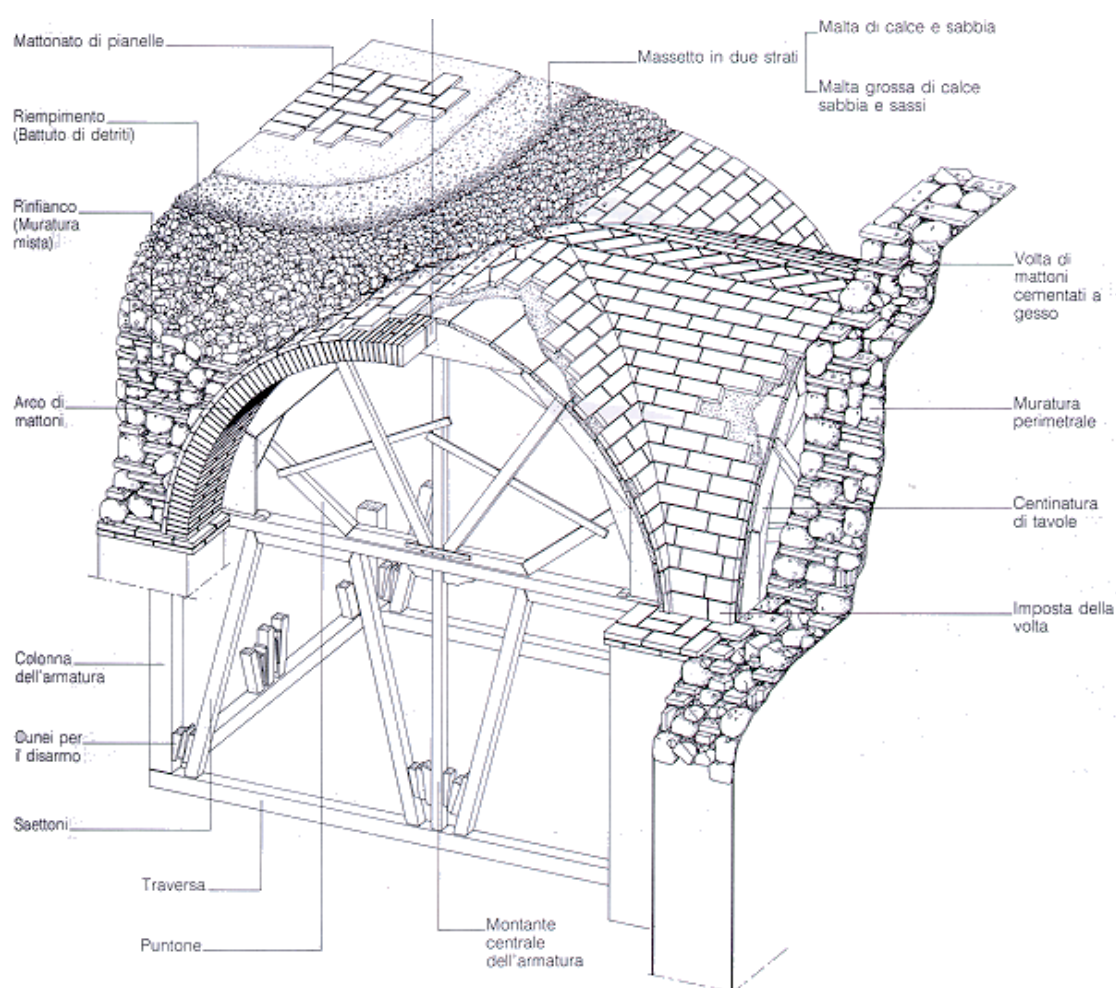


Figura 3.80. Volta di mattoni in foglio: rappresentazione assonometrica delle fasi costruttive e struttura delle centine.

3.3.4 False volte di canne intrecciate e intonacate.

Molto diffuso è il tipo di volta non portante, o falsa volta, realizzata con la tecnica della camera-canna (*camor-canna*). La geometria a padiglione è quella che meglio si addice a questa soluzione costruttiva, per la semplice configurazione delle centine in legno appoggiate sui muri perimetrali. Tuttavia sono frequenti esempi con profilo a crociera o a padiglione con lunette.

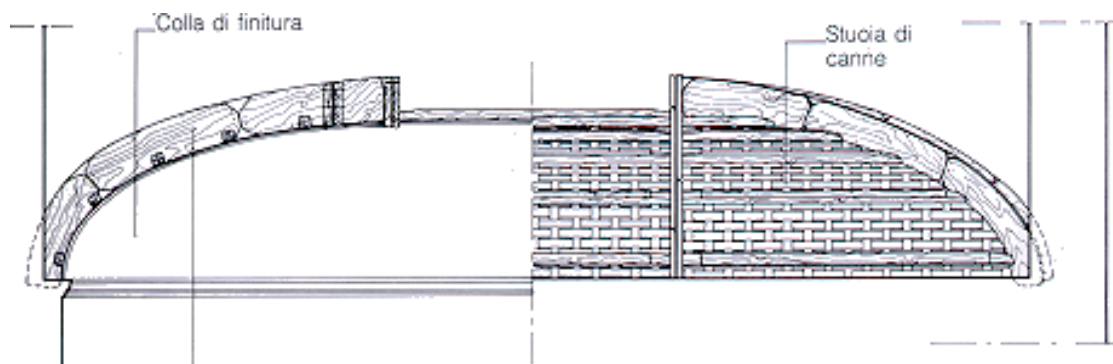


Figura 3.81. Prospetto/sezione di volta in camera-canna

Il tipo di struttura, leggera in confronto alle soluzioni in muratura, è particolarmente adatta per i piani alti degli edifici, dove esigenze statiche sconsigliano l'inserimento di elementi pesanti e spingenti.

Negli ambienti di maggiori dimensioni, per impedire il rilassamento delle strutture lignee, le centine sono appese alle travi del solaio portante superiore.

La centinatura è composta di tavole rustiche di castagno o pioppo, accoppiate a giunti sfalsati; sulla parte inferiore delle centine sono incastrati i correnti che completano l'ossatura portante.

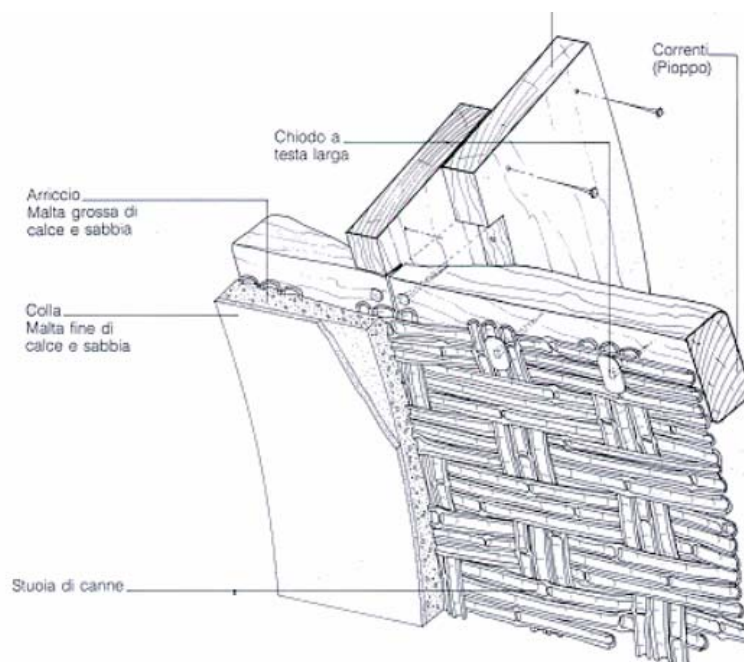


Figura 3.82. Particolare della stuoia di canne intrecciate fissata alle centine di legno e dell'intonaco di finitura a due o tre strati.

All'armatura lignea è fissata una stuoia di canne spaccate e intrecciate a trame larghe (ma lo stesso scopo si può ottenere con arbusti o ramaglia arborea), adatta a trattenere l'intonaco dato in due o più strati per regolarizzare la superficie d'intradosso, che spesso costituisce il supporto per affreschi e stucchi.

Quanto illustrato costituisce solo un repertorio indicativo di alcune fra le tipologie prevalenti di volte impiegate nell'edilizia storica e non ha certamente la pretesa di esaurire un argomento complesso che richiederebbe molti approfondimenti.

3.4 BIBLIOGRAFIA

Cangi G., *Manuale del recupero strutturale e antisismico*
Roma, Edizioni Dei Tipografia del Genio Civile, 2005

Giovanetti F., (a cura di) *Manuale del recupero di Città di Castello*
Roma, Edizioni Dei Tipografia del Genio Civile, 1992

Giovanetti F., Marconi P., *Manuale del recupero della città di Palermo*
Flaccovio Editore, 1994

Giovanetti F., Marconi P., *Manuale del recupero del comune di Roma*
Roma, Edizioni Dei Tipografia del Genio Civile, 1992

Giuffrè A., Carocci C., *Codice di Pratica per la sicurezza e la conservazione del centro storico di Palermo*. Laterza editore, 1999

Giuffrè A., *Lecture sulla meccanica delle murature storiche*
Edizione Kappa 1991

Mastrodicasa S., *Dissesti statici delle strutture edilizie*
Hoepli editore, 1993