

## DISSESTI DI ARCHI, VOLTE E CUPOLE

DOI: 10.17401/lexicon.s.3-cangi

Giovanni Cangi

Libero Professionista – Associato di Ricerca ISPC-CNR  
ing.giovanncangi@gmail.com

### Abstract

#### Disruption of Arches, Vaults and Domes

*Arches and vaults are among the building elements that most characterise historical buildings, in their various forms that evolve from simple rounded profiles into much more articulated forms. Added to these are domes, simple or compound, which constitute the highest artistic expression of form-resistant elements.*

*Studies on the mechanical functioning of these structures, as well as their static and seismic vulnerability, constitute a topic of great interest to which Building Science has always turned its attention. However, the most significant examples of these constructions are the result of intuition and practical experience rather than a theoretical approach. This brief paper invites us to approach the problem using a traditional approach, to draw attention to the fact that the thrusts generated spontaneously by these construction elements, when appropriately balanced, can constitute a factor of stability rather than a problem, thanks to the state of horizontal prestress that is established in the masonry masses. There are many examples of structures that rely on contrast to cope with horizontal seismic actions rather than restraint systems, which presuppose the use of tensile-resistant elements, which are not always available.*

*With regard to instabilities and the different modes of collapse of these architectural elements, we highlight the criteria for distinguishing the most dangerous phenomena, characterised by fragile and sudden failure, from those attributable to ductile behaviour, which present a more reassuring evolution in terms of safeguarding life and the structure itself.*

### Keywords

*Resistant Mechanisms, Structural Kinematics, Kinematic Chains, Active Thrust, Passive Reaction, Arches, Vaults, Domes.*

Archi e volte appartengono alla categoria delle strutture resistenti per forma, in grado di sfruttare al meglio le caratteristiche proprie della muratura, attraverso meccanismi di contrasto che ne assicurano l'equilibrio e per questo sono fra gli elementi costruttivi più diffusi nell'edilizia storica. Realizzati in muratura di pietra squadrata, di pietrame, laterizio o muratura mista, sono espressione di criteri costruttivi intuitivi, applicati dall'antichità fino in tempi recenti, quando hanno ceduto il passo ad altri modelli strutturali e alle moderne tecnologie. Si tratta di organismi strutturali delicati in quanto le spinte necessarie per sostenerli sono le stesse che ne favoriscono la propensione al dissesto, quindi i meccanismi resistenti devono collocarsi entro limiti ben definiti, per garantire contemporaneamente il sostegno dell'elemento e la stabilità della struttura di supporto, attraverso una reciproca interazione. Il prevalere della spinta sulla capacità di contrasto predispone la struttura al collasso, ma esiste un limite altrettanto importante espresso dalla capacità dell'elemento spingente di reagire alle azioni esterne.

Le spinte vengono considerate a prescindere come un fattore di rischio e gli elementi spingenti vulnerabili e pericolosi per natura. Ma l'esperienza dimostra che quando il sistema è opportunamente bilanciato si rivela affidabile anche nei confronti delle azioni sismiche, grazie allo stato di precompressione orizzontale assicurato dal confinamento delle masse murarie. Motivo per cui lo studio delle strutture spingenti va esteso in via generale alla meccanica delle murature, come

chiave di lettura utile ad interpretare in modo intuitivo la risposta di pareti investite da azioni sismiche complanari o ortogonali. Infatti, gli stessi meccanismi che regolano l'equilibrio di archi e volte si generano in modo spontaneo nelle masse murarie sotto l'effetto di azioni sismiche, per indirizzare i flussi tensionali in base alla configurazione geometrica e alle condizioni al contorno, senza manifestarsi materialmente, se non attraverso i quadri fessurativi e le deformazioni ad essi riconducibili. Argomento complesso quanto interessante, che tuttavia richiede una trattazione a parte per evitare un approccio superficiale.

Restando al tema è opportuno sottolineare che il controllo delle spinte attive costituisce solo uno dei problemi centrali nell'analisi degli archi e delle volte, soprattutto quando questi non si configurano come elementi dominanti nella compagine strutturale, bensì prigionieri di organismi complessi che li costringono a reagire ad azioni esterne. Sono i casi, ad esempio, di archi concatenati o di volte di diversa luce e configurazione impostate su ambienti contigui, dove si crea un reciproco conflitto che porta un elemento a prevalere su quello più debole, ma con conseguenze negative sull'intera struttura. Vi sono poi situazioni ancora più complesse da analizzare per l'impossibilità di determinare l'azione esterna e di conseguenza la risposta, affidata al buon funzionamento dell'elemento strutturale, quando abbastanza solido e realizzato a regola d'arte. Tuttavia, la condizione di maggiore pericolo per gli archi e così pure per le volte, si manifesta a causa del rilassa-

mento della struttura e in seguito all'allentamento delle spinte, piuttosto che per gli effetti della spinta attiva, che naturalmente va sempre contrastata in modo adeguato. A questa condizione l'elemento risponde con l'innesco di due potenziali meccanismi di difesa, alternativi e di diversa pericolosità. Il primo è di tipo duttile, caratterizzato da una rottura a flessione in chiave e alle reni [fig. 1]; l'altro è di tipo fragile, con rottura a taglio, che spinge l'arco a dividersi in due elementi distinti assimilabili a delle mensole, per cui assume una configurazione precaria. La conseguenza di questa pericolosa condizione di esercizio sta nello scorrimento dei conci, cui può seguire una rapida evoluzione al collasso [figg. 2-3].

Il vantaggio del meccanismo a flessione deriva dalla maggiore stabilità dell'arco, che si conserva anche per significativi spostamenti relativi delle imposte, quindi non produce conseguenze gravi e irreversibili. Nel secondo caso invece il fenomeno può degenerare anche a seguito di piccoli spostamenti. Emerge in questo modo il maggiore grado di vulnerabilità cui sono esposti gli archi di parete, confinati in una forma che ne favorisce la propensione al dissesto per rottura a taglio, quando la curva delle pressioni migra all'estradosso. Rischio più marcato nelle aperture di piccole dimensioni, dove è più probabile che gli archi restino appesi alla muratura per poi scollarsi all'improvviso.

Per certi aspetti il problema è assimilabile alla teoria sulla spinta delle terre contro i muri di sostegno in condizioni di spinta attiva, di spinta passiva o di assestamento del muro, che predispone la struttura al collasso. Lo stesso effetto che si osserva negli archi con lo scorrimento dei conci di chiave.

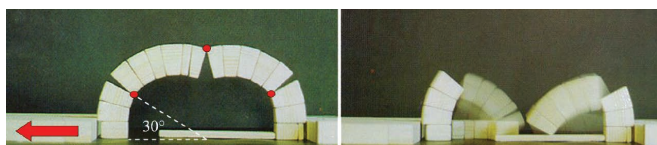


Fig. 1. Formazione spontanea di arco a tre cerniere con evoluzione al collasso: comportamento duttile.

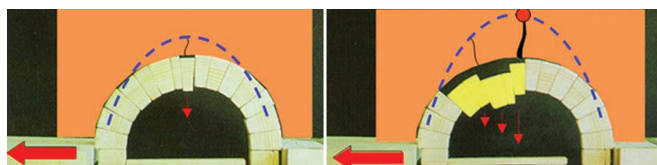


Fig. 2. Allentamento di un arco con migrazione della curva delle pressioni, riduzione della spinta e scorrimento dei conci di chiave.

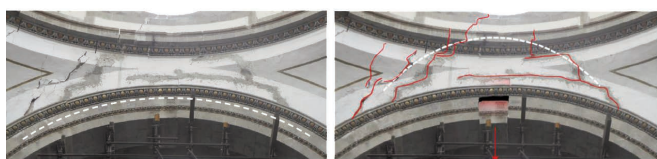


Fig. 3. Collasso del concio di chiave di un arco all'interno della chiesa di Santa Maria degli Angeli a Città del Messico, causato dalla migrazione della curva delle pressioni sotto l'effetto del sisma.

Questo comportamento è sempre imputabile a cause esterne, che producono assestamenti delle spalle e spostamenti relativi delle imposte, dovuti a cedimenti fondali o traslazioni dovute ad azioni sismiche, che scaricano l'effetto sulla struttura dell'arco. Esempi in tal senso si osservano in particolare nelle aree colpite da terremoti di forte intensità, dove è favorito questo tipo di danno assimilabile ad uno strappo della struttura muraria per cause esterne. Le stesse considerazioni si possono estendere alle volte che, libere di configurarsi secondo lo schema a tre cerniere, non dovrebbero presentare questo rischio.

Sicuramente il problema si può presentare a causa di inappropriati interventi di consolidamento, oggi peraltro sconsigliati dalla normativa tecnica vigente, ma in passato suggeriti, se non imposti. Fra questi la realizzazione di spesse cappe in cemento armato, destinate a modificare lo stato tensionale facendo migrare gli sforzi interni dalla muratura alla cappa, molto più rigida [fig. 4]. In queste condizioni l'apparecchio murario viene privato lentamente dello sforzo di compressione stabilizzante fino a rimanere appeso alla struttura in c.a., quasi come un elemento di finitura.

In realtà le volte, come gli archi, possono mostrare un comportamento duttile con formazione di catene cinematiche [fig. 7], oppure allentarsi fino a subire le conseguenze irrimediabili di uno strappo [fig. 9], con la differenza che, mentre l'arco allentato è destinato a crollare, le volte hanno la capacità di attivare meccanismi alternativi che le permettono di ricercare nuove condizioni di equilibrio.

Questo non accade facilmente nelle volte di mattoni in foglio, che si possono distaccare in mezzeria mantenendo un equilibrio precario cui segue quasi sempre il collasso [fig. 5]. I meccanismi spaziali in grado di generarsi nelle volte costituiscono pertanto una risorsa di resistenza, ma allo stesso tempo rendono l'analisi di queste strutture molto più complessa rispetto a quella degli archi, per cui è più difficile comprenderne il funzionamento. La chiave di lettura sta nell'interpretazione del quadro fessurativo, ove presente, per ricostruire il cinematicismo ad esso correlato. Processo che passa attraverso l'osservazione e l'analisi di casi reali, dove appare più evidente la relazione fra cause ed effetto.

Una situazione particolarmente significativa è quella che si osserva negli edifici costituiti da grandi aule come le chiese, coperte con volte a botte, interessate da elevate accelerazioni sismiche e dalla formazione di un quadro di dissesto amplificato e di più facile lettura [fig. 6]. Purtroppo questo è il fenomeno che si manifesta nella maggior parte dei casi, mentre nelle verifiche strutturali l'attenzione si concentra esclusivamente sul controllo della spinta attiva, considerato come l'unico problema di cui tenere conto; principio chiaramente sbagliato e fuorviante.

Bisogna quindi porsi il dubbio sull'affidabilità di certi modelli di analisi convenzionali che non tengono conto delle condizioni al contorno e che possono portare ad una errata valutazione della sicurezza. Con questo si intende affermare che volte identiche sono esposte a sollecitazioni e dissesti diversi in relazione alla posizione che occupano nella compagine strutturale. In alcune posizioni infatti queste assumono un

ruolo dominante, come elementi attivi, in altre invece si trovano prigioniere dell'organismo edilizio che le contiene e le costringe a reagire passivamente ad azioni esterne [fig. 8]. Le modalità di rottura a strappo illustrate per le semplici volte a botte si riscontrano, con effetti simili, anche nelle volte a padiglione lunettate. Lo strappo infatti si può manifestare per assestamento della parete d'imposta o con interessamento dei muri d'angolo [fig. 9]. Gli effetti rilevabili direttamente si possono limitare alla formazione di piccole lesioni di strappo che modificano in modo irrilevante la configurazione, mentre a modificarsi sostanzialmente è il meccanismo di equilibrio, per cui i flussi tensionali vengono deviati dai canali originari per ricercare nuovi punti di contrasto.

Gli interventi di riparazione e consolidamento in questi casi dovrebbero tendere ad un effettivo ripristino del meccanismo originario e non limitarsi a rimodellare la sagoma mediante una sommaria risarcitura delle lesioni. Ciò significa rigenerare la spinta trasversale, anche attraverso un'azione meccanica, per tornare a far funzionare gli archi trasversali come in origine, avendo cura prima di tutto di incrementare la capacità di contrasto, per evitare che il dissesto si riproponga con le stesse modalità. Ciò invita ad un approfondimento sulla funzione che compete alle lunette sulla stabilità delle volte, oltre al valore estetico che indubbiamente si guadagna con l'aggiunta di questi elementi. In realtà le lunette non si aggiungono, bensì si creano per sottrazione di volumi dalla configurazione

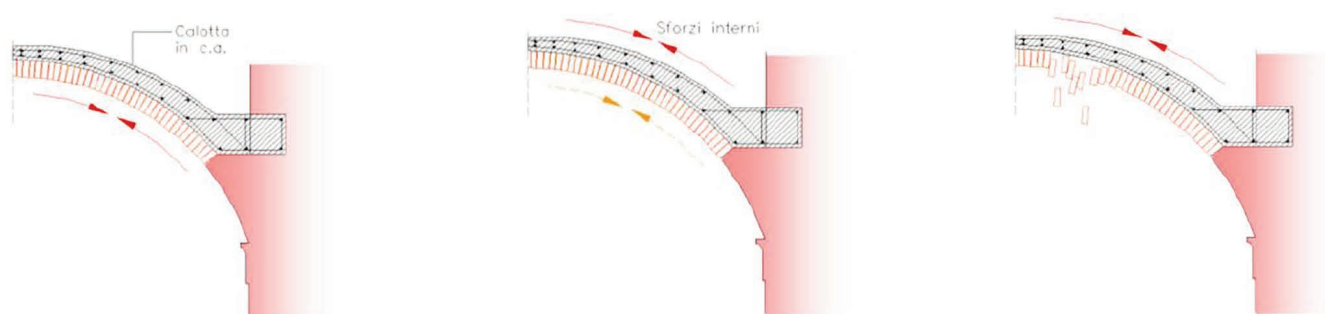


Fig. 4. Previsione al dissesto delle volte laterizie consolidate con cappe in cemento armato; chiaro esempio di intervento presentato come economico, sicuro e risolutivo, ma rivelatosi foriero di gravi conseguenze.

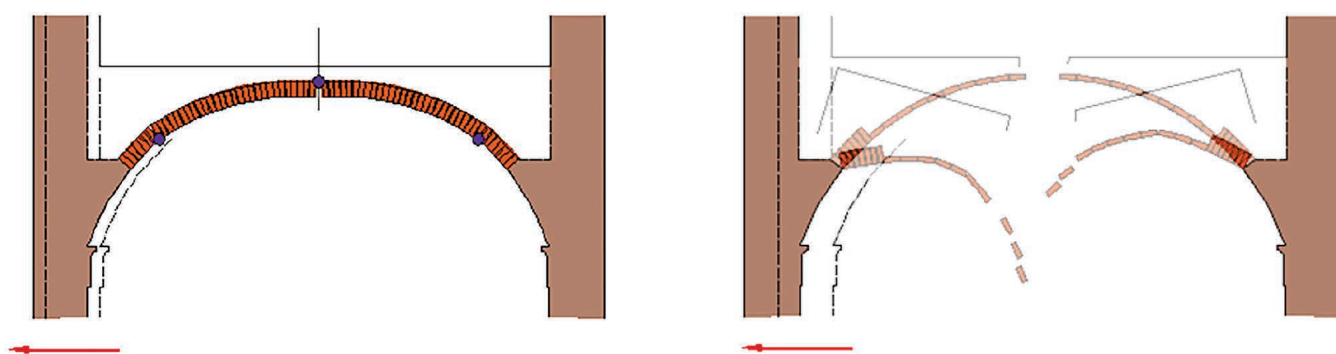


Fig. 5. Comportamento duttile di volte laterizie di mattoni a coltello con formazione di catena cinematica a tre cerniere e rottura a strappo, di tipo fragile, caratteristica delle volte di mattoni in foglio.



Fig. 6. Innesco ed evoluzione del cinematismo della volta a botte in una chiesa a navata unica con contrafforti laterali e d'angolo per effetto di azioni sismiche, con fenomeno di strappo e ribaltamento.

delle volte a botte o a padiglione; il primo effetto positivo consiste pertanto nella riduzione delle masse murarie e quindi delle spinte. Ma a costituire un vero vantaggio sul piano tecnico è la capacità di contrasto che le lunette introducono, potendo funzionare come puntoni posti ai lati delle volte a botte, che pertanto vengono stabilizzate nei confronti delle deformazioni indotte da carichi sbilanciati.

L'effetto stabilizzante si apprezza analizzando l'interazione fra le volte e i muti d'imposta sotto l'effetto di azioni sismiche, che impongono alle pareti oscillazioni in controfase associate ad una alternanza di stati di compressione e di trazione sull'orizzontamento. Questo accade normalmente nelle volte a botte, che si muovono ciclicamente attorno alla posizione di riposo; in presenza di lunette invece la volta può aprirsi sotto l'effetto della spinta attiva, ma trova il contrasto nelle lunette

nella fase di compressione. Con la disposizione di tiranti trasversali si crea pertanto un vincolo bilatero, in grado di contrastare anche l'allontanamento delle imposte. La complessa analisi di questi elementi strutturali è legata anche alla varietà di geometrie strutturali che, soprattutto nelle volte, rendono in apparenza ogni caso diverso dall'altro. In effetti è così, tuttavia è possibile inquadrare il problema secondo una visione che sottolinei le analogie di comportamento piuttosto che le differenze. Basta ricordare che i principi costruttivi sono gli stessi e che nelle diverse forme si sfrutta sostanzialmente lo stesso meccanismo resistente che si adatta in funzione della geometria, del sistema di vincolo, nonché della tecnica costruttiva e dei materiali impiegati. Limitandosi alla forma è possibile individuare una relazione geometrica che accomuna i diversi tipi di volte, per sottolineare l'appartenenza di questi

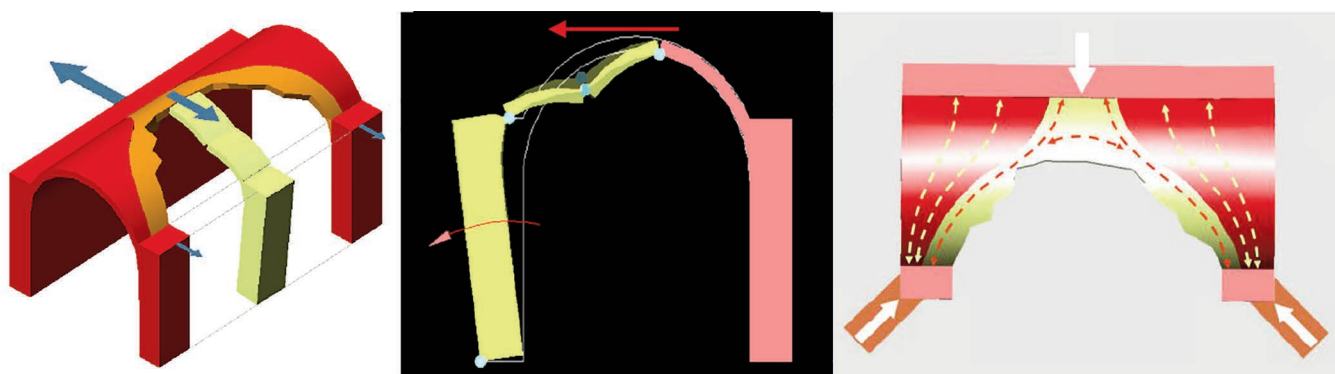


Fig. 7. Modalità di dissesto della volta a botte con formazione di catena cinematica.

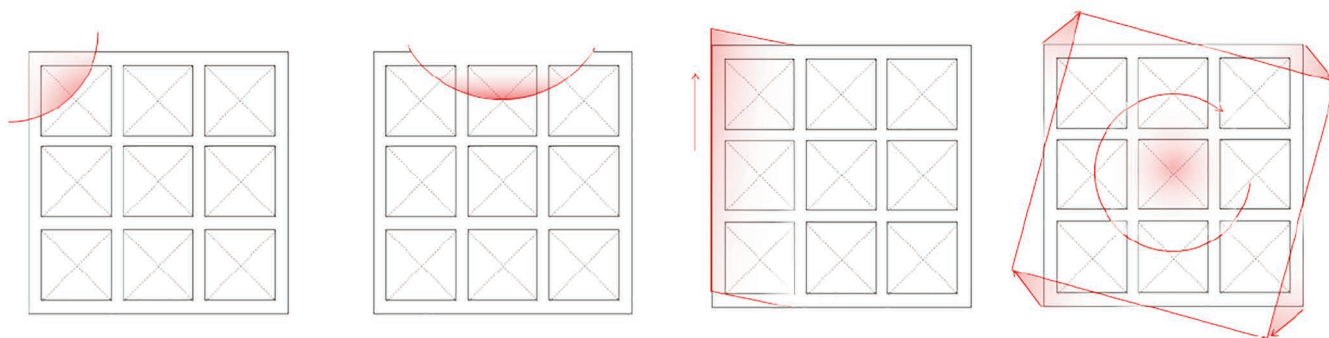


Fig. 8. Condizionamento della configurazione strutturale e delle condizioni al contorno nel funzionamento meccanico delle volte in relazione alla posizione che occupano all'interno dell'organismo edilizio.



Fig. 9. Effetti prodotti sulle lunette dall'assettamento di una parete d'imposta e con interessamento dei muri d'angolo.

elementi resistenti per forma ad una stessa famiglia architettonica, nei quali si intreccia un complesso sistema di archi potenziali che ne assicura l'equilibrio. Poterlo riconoscere è fondamentale per una semplificazione del problema e per favorire una lettura intuitiva e qualitativa del comportamento strutturale e dei dissesti che dovessero manifestarsi.

Questa schematizzazione geometrica [fig. 10] tende a dimostrare che è possibile fare riferimento ad un modello comune che, modificato nella forma e quindi nei meccanismi, permette di evidenziare la relazione che esiste fra alcune tipologie canoniche, riconoscibili nella cupola, nella vela, nella volta a crociera e in quella a padiglione, con altre forme ibride che si configurano come combinazioni o varianti delle stesse. Un modello che mette in relazione la volta a vela con la volta a piana, governate dallo stesso meccanismo strutturale, come accade per gli archi a tutto sesto nei confronti delle piattabande. Pure questo è un tema che richiederebbe una trattazione

più approfondita, ma in sintesi si può affermare che per ciascun tipo di volta è possibile individuare un sistema di archi principali e secondari dai quali dipende l'equilibrio d'insieme e pure la stabilità di ogni singola porzione. Un'analogia che si coglie perfettamente dal confronto fra le volte a crociera e le volte a padiglione; in particolare è la configurazione degli archi secondari ad evidenziare le maggiori differenze. Nelle crociere questi si impostano direttamente sulle nervature diagonali, mentre nelle volte a padiglione si dispongono lungo le mediane, per scaricarsi alla base sui muri perimetrali, con una configurazione rampante che genera le massime spinte al centro delle pareti [fig. 11].

La complessità del problema resta evidente, ma questi modelli aprono alla possibilità di studiare il comportamento delle volte attraverso la scomposizione in un sistema di archi equivalenti, che permette di cogliere in modo intuitivo le condizioni di equilibrio e le cause dei dissesti osservati. Lo stesso principio può essere esteso a configurazioni più complesse,

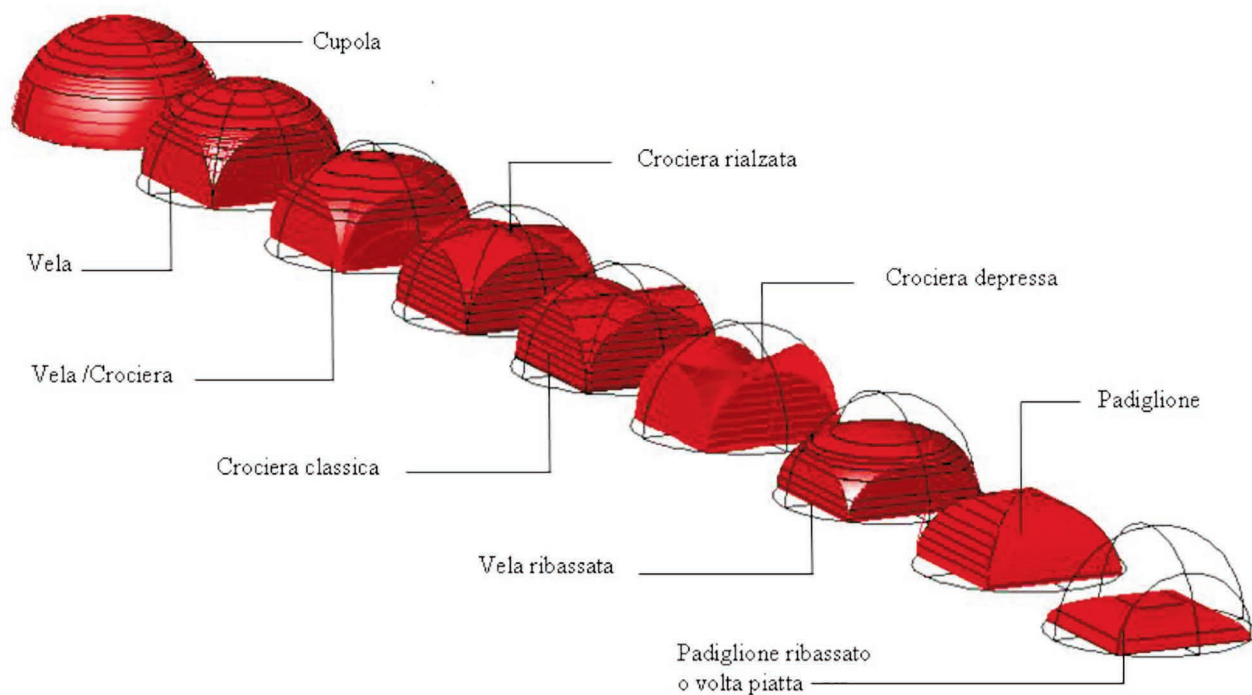


Fig. 10. Modelli di volte appartenenti alla stessa famiglia architettonica con sequenza geometrica che sottolinea l'evoluzione dalla cupola alla volta piana.

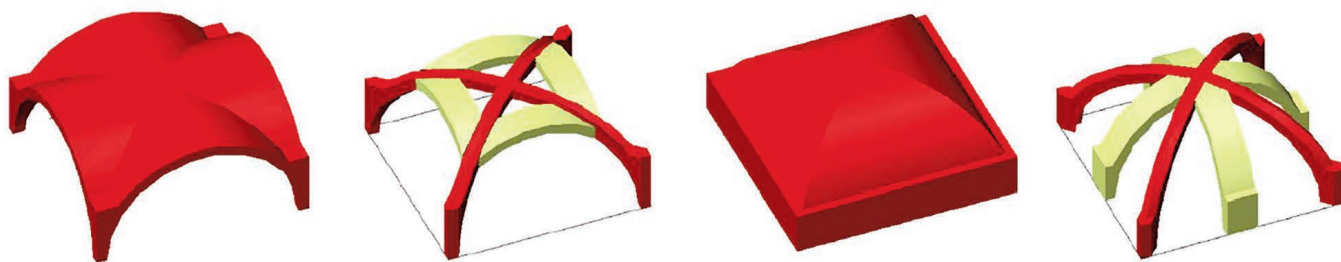


Fig. 11. Volta a crociera e volta a padiglione: geometrie e schemi degli archi di I e II ordine.

come le cupole, nelle quali i potenziali meccanismi spaziali si moltiplicano in relazione alla doppia curvatura che le caratterizza. Che le volte e le cupole si possano scomporre, o costruire, mediante un sistema di archi intrecciati lo dimostrano alcune originali soluzioni architettoniche, come quelle utilizzate nella moschea di Cordova e nella chiesa del Cristo de la Luz a Toledo. Espressioni straordinarie della tradizione costruttiva araba nella Spagna del X sec., replicate nella cupola barocca del Guarini in San Lorenzo a Torino.

La presenza di archi potenziali si manifesta nell'evoluzione al collasso delle cupole, quando la struttura ricerca possibili condizioni di equilibrio con la formazione di archi di scarico spontanei. Lo dimostrano molti casi reali e si trova conferma anche dallo studio di modelli in scala, realizzati con farina a secco e sottoposti a prove sismiche dinamiche, che mostrano le stesse fasi di disgregazione e collasso per effetto di azioni esterne [fig. 12]. Gli stessi modelli permettono di studiare il comportamento statico delle cupole poligonali, nelle quali l'intreccio di archi si può mettere in evidenza eliminando progressivamente varie porzioni della struttura senza compromettere l'equilibrio del sistema. Si dimostra così che se si tolgono i fusi della cupola, agli archi mediani rampanti subentrano le nervature diagonali [fig. 13] per assicurare l'equilibrio; nel caso poi dovesse cedere una delle nervature, lo stesso meccanismo si estenderebbe alla nervatura adiacente, in una configurazione dall'assetto sicuramente meno stabile.

Le nervature, pertanto, si caratterizzano quindi anche come degli elementi di riserva, pronti ad innescare meccanismi alternativi. Il "ragno" generato dall'unione degli archi che si

formano all'interno di ciascuna vela e impostati sulle nervature, costituisce l'essenza di una struttura portante che trova nella simmetria polare un fattore geometrico stabilizzante. La configurazione è simile a quella documentata per la cupola del Tempio di Minerva Medica a Roma, in equilibrio precario, con le nervature scarnite, ma rimasta in piedi fino al XIX sec. L'evoluzione della volta a padiglione poligonale alla cupola chiude il cerchio di questo ragionamento e conferma come in queste strutture spaziali ogni forma geometrica sia riconducibile ad un comune modello di analisi, che ne regola il funzionamento statico e la risposta sismica. Lo stesso che indirizza le scelte progettuali per la definizione di appropriati interventi di riparazione e rinforzo [fig. 14].

Quanto illustrato prescinde dalle tecniche costruttive, che tuttavia assumono rilevanza sul comportamento delle strutture spingenti, come il tipo e la qualità dei materiali impiegati. Vi sono poi delle regole importanti da rispettare nella costruzione e nel consolidamento delle volte dettate dall'esperienza e degli accorgimenti pratici che possono sfuggire anche agli addetti ai lavori. Riscoprire le tecniche originarie è fondamentale quindi per operare in modo filologico, utilizzando gli stessi materiali nel rispetto della tradizione e con criteri conservativi. La qualità costruttiva fa la differenza, sia in termini di sicurezza, sia per il valore intrinseco che conferisce al bene, considerato che in genere tutto viene ricoperto dall'intonaco, ma i difetti costruttivi sono destinati ad emergere prima o poi, e difficilmente possono essere corretti.

Fra gli aspetti da indagare con molta attenzione vi è l'apparecchio murario del campo centrale, spesso montato a



Fig. 12. Modello in scala di cupola poligonale di farina sottoposta ad azioni sismiche dinamiche, con fasi di collasso delle vele frontali e formazione spontanea di archi di riequilibrio, a confronto con il caso reale della cupola della chiesa di Nostra Signora degli Angeli a Città del Messico, colpita dal sisma del 17 set. 2017.

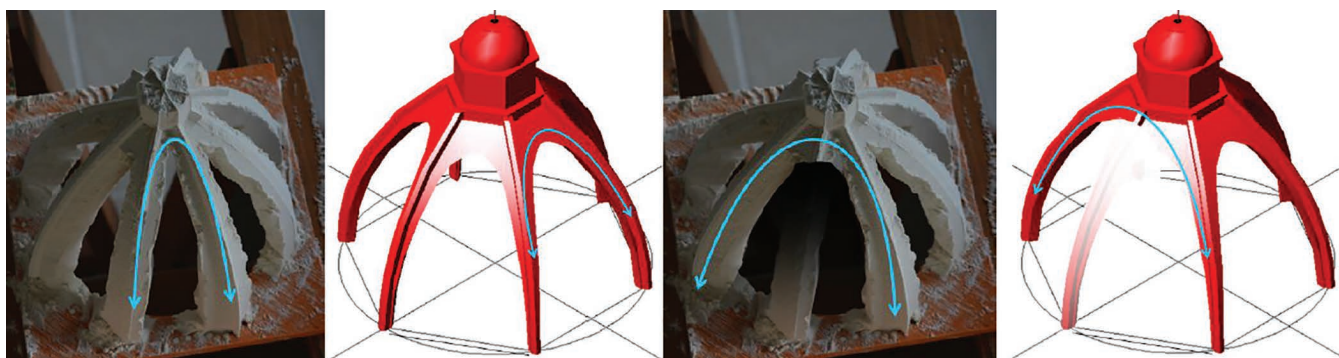


Fig. 13. Formazione di archi di scarico contrapposti nel modello in scala di cupola a base poligonale con evoluzione spontanea e progressiva per cedimento delle nervature.



---

14.01.2008 e Circ. 2 febb. 2009 n. 617 hanno ribaltato sostanzialmente l'approccio alla soluzione del problema, in base a quanto indicato al punto C8A.5.2 INTERVENTI SUGLI ARCHI E SULLE VOLTE, dove si afferma che

«Per assorbire le spinte di volte ed archi non deve essere esclusa a priori la possibilità di realizzare contrafforti o ringrossi murari. Questi presentano un certo impatto visivo sulla costruzione ma risul-

tano, peraltro, reversibili e coerenti con i criteri di conservazione. La loro efficacia è subordinata alla creazione di un buon ammorsamento con la parete esistente, da eseguirsi mediante connessioni discrete con elementi lapidei o in laterizio, ed alla possibilità di realizzare una fondazione adeguata».

Posizione confermata sostanzialmente dalle NTC 2018 attualmente in vigore.

---

### **Bibliografia**

F. GIOVANETTI, *Manuale del recupero di Città di Castello*, DEI, Roma 1992.

G. CANGI, *Manuale del recupero strutturale e antisismico*, DEI, Roma 2012.

G. CANGI, M. CARABONI, A DE MARIA, *Analisi strutturale per il recupero antisismico*, DEI, Roma 2010.

A. BORRI, L. BUSSI, *Archi e volte in zona sismica*, Doppiavoce, Napoli 2011.

---