Evoluzione e declinazioni nell'uso dell'"Arco Armato"

Prof. Ing. Lorenzo Jurina
Politecnico di Milano
Dipartimento di Architettura, Ingegneria delle Costruzioni e Ambiente Costruito (ABC)
Via G. Ponzio n.31, 20133 Milano - Italia

ABSTRACT

Le tipologie strutturali degli Archi e delle Volte sono state supportate per lunghi secoli da metodi di dimensionamento geometrici e/o empirici. Solo con la nascita della *statica* (XVII secolo) si è assistito ad una fase di elaborazione scientifica del tema. A partire dal XX secolo la progressiva **perdita di esperienza e di conoscenza** sul funzionamento delle strutture ad arco e la generale sfiducia verso le prestazioni delle murature storiche hanno favorito la diffusione di tecniche di consolidamento prese a prestito da quelle in uso nelle costruzioni moderne, con conseguenze negative dal punto di vista culturale e strutturale.

La crescita, avvenuta negli ultimi decenni, degli interventi di recupero sul costruito, la disponibilità di nuovi strumenti diagnostici e la maggiore attenzione alla sicurezza strutturale in previsione (oppure a seguito) di fenomeni sismici, hanno richiesto un approfondimento delle teorie e dei metodi di intervento su sistemi ad arco o a volta. Il recente quadro normativo italiano in materia di **riduzione del rischio sismico** sulle strutture storiche, (Linee Guida, O.P.C.M. del 9 febbraio 2011) ha costituito un importante avanzamento in relazione al consolidamento delle strutture storiche, tra le quali compaiono proprio archi e volte. Inserimento di catene, contrafforti, placcaggio estradossale, alleggerimento e regolazione dei rinfianchi, cucitura delle lesioni, sono alcuni tra gli interventi di consolidamento proposti, mentre vengono sconsigliate le tradizionali cappe in c.a.

La presente memoria illustra una tecnica alternativa a quelle più frequentemente proposte dalla prassi corrente : l'***"arco armato"***, con il quale è possibile soddisfare gli obiettivi (massima conservazione, minimo intervento, affiancamento e non sostituzione) nel consolidamento di archi e volte. Si ottiene efficacia strutturale sotto carichi verticali e orizzontali (per esempio sisma e vento), collaborazione e non sostituzione con la struttura muraria esistente, limitata invasività, leggerezza, oltre che reversibilità e facilità di manutenzione nel tempo.

L'"arco armato" prevede la stesura di cavi metallici posti in tensione parallelamente agli elementi curvi da consolidare, e ad essi opportunamente collegati, in modo da pre-comprimerli, così da renderli capaci di resistere a flessione.

Si vuole sottolineare in questo scritto la **versatilità** del metodo proposto nei confronti di differenti tipologie e geometrie di strutture. L'"arco armato" è risultato efficace sia sul singolo elemento bidimensionale (cerchio o arco), nelle sue diverse configurazioni geometriche, sia sulle strutture tridimensionali, quali volte, cupole e strutture con andamento curvilineo. Si tratta quindi di una soluzione adattabile, che può essere declinata in molti modi, in relazione all'oggetto specifico d'intervento, alle necessità e alle sue forme.

Si farà osservare come il principio della "cerchiatura" sia un archetipo presente e diffuso in molti campi delle costruzioni. La fabbricazione di botti così come la cerchiatura delle cupole storiche permettono di capire che il contenimento di elementi strutturali spingenti sia una soluzione di consolidamento applicata e valida da secoli.

Si illustreranno inoltre gli studi sperimentali sull'arco armato eseguiti, fin dagli anni '90, e l'evoluzione applicativa di questa tecnica, assieme alle varie alternative in cui può essere adottata.

1. Il funzionamento dell’arco armato

Il dissesto di un arco è legato alla incapacità dei singoli blocchi di lavorare a trazione e quindi alla limitata resistenza flessionale dell’arco stesso. Solo quando la risultante dei carichi che si trasferisce da concio a concio (*curva delle pressioni*) è prossima al baricentro, allora l’arco funziona correttamente. Quando la risultante si allontana dal baricentro si forma una fessura radiale lungo il giunto, vale a dire si manifesta una rotazione rigida tra due conci successivi. Quando tale fenomeno si presenta in quattro posizioni, allora si forma un meccanismo a **quattro cerniere**, a cui consegue il collasso dell’arco. Le cause possono essere legate a forti carichi verticali e orizzontali sull’arco (più dannosi se disposti asimmetricamente), oppure a cedimenti di fondazione o a spostamenti orizzontali dei muri d’imposta.

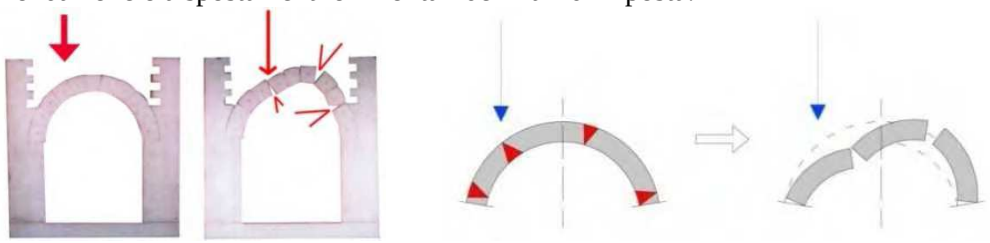


Figura 1. Formazione di meccanismo a quattro cerniere in un arco soggetto a carico concentrato asimmetrico.

La tecnica dell’”arco armato” cerca di opporsi alla formazione delle cerniere, che si aprono in modo alternato all’intradosso e all’estradosso, posizionando un cavo tesato su uno dei lati dell’arco o della volta.
Il cavo estradossale viene semplicemente appoggiato alla muratura, mentre quello intradossale deve essere puntualmente collegato ai singoli conci. Quando il cavo viene tesato il sistema diventa fin da subito attivo, ed è in grado di applicare all’arco un insieme di forze, con direzione radiale, capace di rendere più baricentrica *la curva delle pressioni* e, di conseguenza, capace di impedire o comunque di posticipare la formazione delle cerniere. Il cavo, qualunque sia la forma geometrica dell’arco, tende a ri-centrare la curva delle pressioni, avvicinandosi allo stato ideale di sola compressione tra concio e concio.

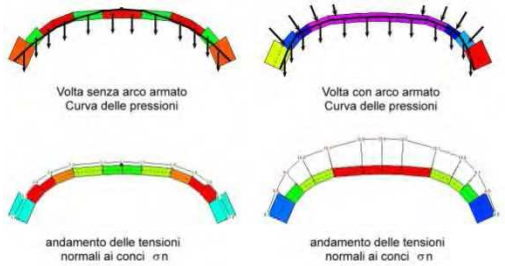


Figura 2. Curva delle pressioni e andamento delle tensioni in archi non consolidati ed in archi consolidati con arco armato.

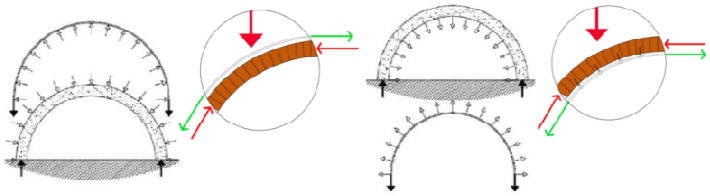


Figura 3. Funzionamento dell’”arco armato” con cavi estradossali e con cavi intradossali.

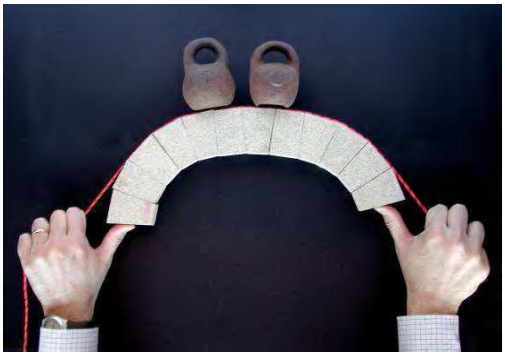


Figura 4. Schematizzazione dell'azione dell'"arco armato".

Il cavo può essere applicato sia estradossalmente che intradossalmente all’arco. Nel primo caso, per applicazioni all’**estradosso,** il cavo può essere post-tesato interponendo tra esso e la superficie della volta alcuni cunei uniformemente distribuiti, oppure, più semplicemente, utilizzando tenditori con filettatura destro-gira e sinistro-gira. In ogni caso è opportuno prevedere un sottile strato di ripartizione (generalmente

in malta fibrorinforzata) per l'appoggio dei cavi sulla volta, cercando anche di ridurre l'attrito allo scorrimento, per esempio inserendo il cavo all'interno di una guaina in teflon.
Nelle applicazioni all'**intradosso**, il fissaggio del cavo all'arco risulta più complicato (non essendo possibile il semplice appoggio) e richiede l'utilizzo di connettori capaci di assicurarlo alla muratura (golfari o elementi appositamente studiati). La messa in tiro avviene mediante tenditori con vite SX-DX, che accorciano la fune, oppure mediante l'accorciamento degli stessi connettori.
E' necessario ricordare che il consolidamento con la tecnica dell'"arco armato" non può prescindere dall'analisi delle condizioni di **stabilità dei piedritti**, i quali potrebbero essere a loro volta soggetti a cinematismi e alla formazione di cerniere (in sommità e alla base).
In altre parole l'arco è costituito non solo dalla sua porzione curva , ma anche dai due piedritti verticali. *L'applicazione dell'arco armato alla sola parte curva* nei casi in cui i piedritti non siano stabilizzati da una catena orizzontale, oppure da contrafforti, oppure da archi rampanti, oppure da una forte compressione esercitata dai piani superiori, *potrebbe addirittura risultare dannosa*.
In tali casi, peraltro frequenti, è indispensabile prolungare l'"arco armato" fino alla base dei piedritti o ad altre strutture ritenute stabili, consolidando così tutto il "sistema arco+piedritti".
Le sperimentazioni effettuate hanno dimostrato la **validità del metodo** su archi tracciati secondo diverse curve generatrici, circolari, policentriche, a tutto sesto o a sesto acuto, comprese le situazioni in cui l'arco è già parzialmente deformato o depresso e quindi compromesso dai punti di vista estetico e funzionale.
Questa efficacia è dovuta al fatto che l'intensità delle forze radiali trasmesse dal cavo (teso in maniera uniforme) è legata al raggio di curvatura locale: l'adattamento delle forze radiali trasmesse dal cavo a seconda della particolare geometria dell'arco è un fenomeno che si auto-governa, traducendosi in una distribuzione di pressioni radiali non necessariamente uniforme, ma tendente a conferire la migliore redistribuzione della forza assiale tra i conci.
Il cavo teso, infatti, può rimanere nella configurazione assegnata solo se il sistema di forze che lo interessa è equilibrato e se dà origine ad una curva delle pressioni coincidente col cavo stesso, il quale può solo lavorare a trazione.
L'arco murario ha la stessa geometria del cavo e le forze applicate dall'arco al cavo, per azione e reazione, sono uguali a quelle applicate dal cavo all'arco. *Ne consegue che se le forze applicate sul cavo lo sollecitano a **sola trazione**, allora le forze applicate sull'arco lo sollecitano a **sola compressione**.*
La tecnica dell'"arco armato" si propone, in definitiva, l'obiettivo di incrementare la resistenza della struttura quando il meccanismo di collasso è di tipo prevalentemente flessionale. Quando il meccanismo di collasso è a taglio, circostanza più rara, il metodo risulta meno efficace, ma si ottengono comunque effetti positivi legati all'incremento della compressione tra i conci e, di conseguenza, all'aumento della resistenza limite per attrito.

I tecnici che si occupano di strutture hanno a disposizione tre parametri "*geometria-materiali-carichi*" per definire il proprio progetto. Quando si opera su nuove costruzioni, la scelta di limitare i carichi, oppure di usare una geometria oppure materiali appropriati sono opzioni che consentono di ottenere strutture sicure.

I gradi di libertà sono molto più ridotti, invece, quando il tecnico deve operare sul costruito storico, in cui la geometria ed i materiali sono usualmente non modificabili, come manifestazione di *rispetto per l'esistente.*
Con la tecnica dell'"arco armato" anziché modificare la geometria della struttura per consentirle di sopportare i carichi esistenti, si percorre la via più discreta e rispettosa, ed anche più efficace, che comporta una **modifica dei carichi**, così da rendere ottimale la geometria esistente rispetto ai carichi stessi.
In questo modo l'operazione di consolidamento risulta sostanzialmente non invasiva.
L'efficacia di questo metodo è stata confermata da una serie di campagne sperimentali e da realizzazioni eseguite a partire dagli anni Novanta dello scrivente, coadiuvato da collaboratori e laureandi.
In particolare, le prove sono state eseguite su modelli in legno in scala ridotta e su modelli in laterizio a scala reale, con archi dalle diverse configurazioni geometriche (a tutto sesto, policentrico, ribassato, con lieve depressione centrale e con accentuata depressione centrale, a sesto acuto).

Figura 5. Esempi di sperimentazioni con archi in legno soggetti a carichi orizzontali.

Le campagne di prova hanno messo in evidenza sensibili **incrementi del carico di collasso** degli archi rispetto alla situazione non consolidata, sia in presenza di carichi verticali che orizzontali, per qualunque tipo di arco (compresi quelli depressi) e per qualunque punto di applicazione dal carico agente esterno.
Tali incrementi risultano confrontabili con quelli generati dall'uso di cappe in c.a., peraltro molto più impattanti, invasive e caratterizzate da un incremento delle masse in gioco non accettabile in zone sismiche.
Dagli studi emerge una relazione di **proporzionalità quasi lineare** che lega il carico di collasso alla forza di trazione imposta ai cavi d'armatura . Nelle figure seguenti si osserva che tra archi di diversa geometria varia solo il coefficiente angolare della retta che definisce tale legame. Vi è inoltre una pari efficacia nelle applicazioni all'estradosso e all'intradosso. Nel corso della campagna di prove sono state evidenziate alcune particolarità: a parità di condizioni, l'arco ribassato ha fornito, in media, le migliori risposte al collasso, mentre si confermano risultati ormai acquisiti, secondo cui la posizione più svantaggiosa per applicare un carico verticale concentrato è a ¼ circa della luce.

Figura 6. Campagne sperimentali su modelli in muratura soggetti a carichi verticali.

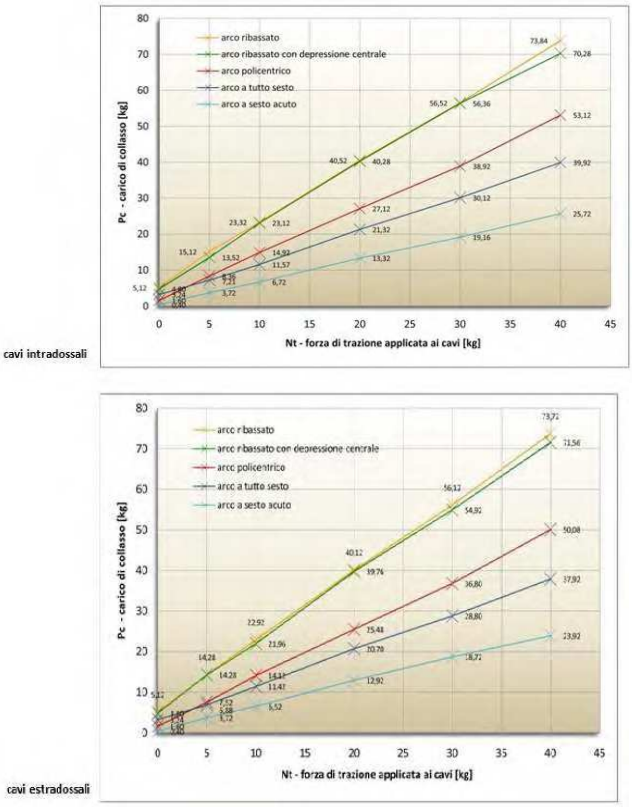


Figura 7. Risultati della campagne sperimentali che mostrano la proporzione lineare tra il tiro nel cavo nell'"arco armato" e il carico di collasso (carichi orizzontali). Tesi di Sara Bonfiglioli, Scuola di Architettura, Politecnico di Milano, A.A.2010-11, su modelli in legno predisposti dall'Arch.Maurizio Giglio.

2. Genesi dell'"arco armato"

Richiamiamo, qui di seguito, alcune applicazioni che utilizzano il principio di cerchiatura applicato ad elementi di geometria circolare. Si osserverà, nel seguito della memoria, come l'idea della cerchiatura possa

poi essere estesa a forme semicircolari, a superfici voltate e a solidi di rotazione, consentendo svariate applicazioni, o meglio, svariate *declinazioni*, dell'"arco armato".

2.1 Botti in legno:

Il sistema utilizzato per costruire le botti da vino costituisce un esempio, semplice ma calzante, di *cerchiatura.* Le doghe in legno sono tenute insieme e vengono compresse l'una contro l'altra tramite l'inserimento in pressione di cerchi in metallo (l'equivalente del cavo metallico nell'"arco armato"). Mentre nell'arco armato l'incremento di pressione tra i conci è ottenuto con una post tensione del cavo, la compressione circonferenziale imposta tra le doghe lignee deriva dall'operazione di battitura del cerchio metallico che viene inserito sempre più profondamente nel cuneo della botte, di forma tronco-conica.

Figura 8. Fasi di costruzione di botti in legno.

2.2 Stone Gate:

Questa scultura è stata recentemente presentata alla fiera MARMOMACC tenutasi a Verona nel settembre 2012, a cura di R.Galiotto (designer), Lithos Design (impresa esecutrice), L.Jurina (consulenza al progetto strutturale).

Stone Gate è una grande ruota di 380 cm di diametro e 30 cm di spessore, costituita dall'assemblaggio di 20 conci in marmo di Bardiglio, posati a secco e accostati, "forzati" tra loro da tre cavi circonferenziali in acciaio post-tesati, i quali impongono una compressione mutua tra concio e concio.

In questa moderna opera di design si sfrutta lo stesso principio della cerchiatura delle botti da vino, dove *le doghe in marmo* sono cerchiate da anelli in acciaio, tesati in tre posizioni a 120°.

Figura 9. Stone Gate, fiera MARMOMACC, Verona, Settembre 2012

2.3 Cerchiature di torri e ciminiere:

Sistemi di cerchiatura circolare, analoghi a quelli appena illustrati, si ritrovano negli interventi di consolidamento di torri e ciminiere. La tendenza delle murature a fessurarsi e a "spanciare" verso l'esterno è impedita dall'uso di anelli cerchianti, solitamente in metallo o in materiale fibrorinforzato. Le cerchiature, usualmente, vengono collocate all'esterno della ciminiera ma potrebbero anche essere collocate internamente: in questo caso è necessario realizzare un collegamento tra la muratura e gli anelli in acciaio mediante connettori metallici diffusi.

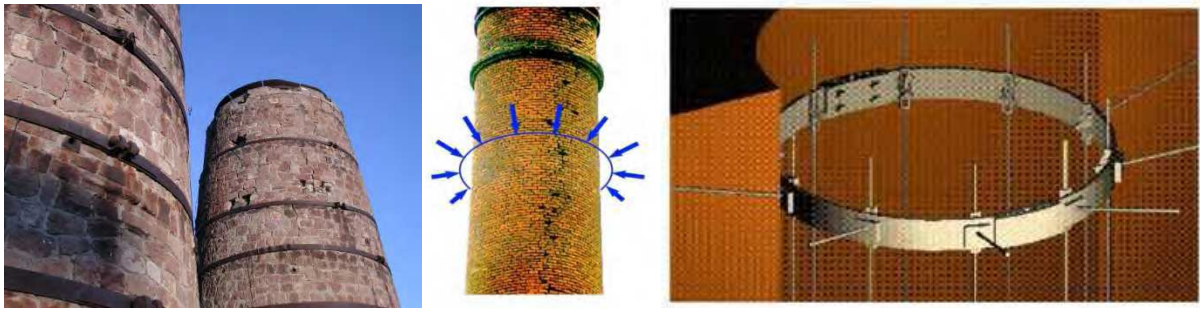


Figura 10. Esempi di cerchiatura interna ed esterna di ciminiere.

2.4 Alcuni antecedenti illustri: la cerchiatura delle cupole in muratura

L'idea di contenere le strutture murarie a generatrice curva si ritrova in grandi esempi della Storia dell'Architettura, quando illustri artisti e uomini di scienza oppure semplici capimastri pensarono, già in passato, di cerchiare cupole e tamburi con elementi resistenti a trazione per limitare le spinte esercitate dalle stesse verso l'esterno.

Filippo Brunelleschi realizzò, a partire dal 1420, le strutture della **cupola di Santa Maria del Fiore** cosciente delle spinte orizzontali che una struttura imponente come la cupola avrebbe esercitato durante e dopo l'esecuzione. Come è noto alcune importanti fessure (allora denominate "*screpoli*") ubicate nella mezzeria delle otto vele, si formarono in tempi immediatamente successivi alla costruzione.

Brunelleschi predispose un dispositivo di aiuto alla cupola, ossia una catena formata da travi in legno di castagno, con lo scopo di circoscrivere la cupola nelle zone dove le tensioni di trazione circonferenziali fossero eccessive. Non a caso la catena fu posizionata in prossimità del tamburo, dove già erano state realizzate la loggia e le "tribune morte" per limitare le spinte verso l'esterno.

La catena è ancorata ai costoloni in pietra di angolo, incastrata con cunei in quercia, Questo accorgimento ha il vantaggio di rendere collaboranti i costoloni principali e quelli intermedi, opponendosi alle spinte verso l'esterno. In aggiunta, un grosso tirante in ferro ancorato alla muratura del costolone di spigolo è reso solidale con la catena lignea da un perno sempre in ferro.

Brunelleschi pensò anche alla successiva fase di manutenzione e riparazione della cerchiatura: i componenti della catena, in caso di un loro deterioramento, potevano infatti essere sostituiti o riparati.

Figura 10. Rilievo dell'accesso ala cupola con indicazione delle fessure rilevate a cura di F.Fontana (1696).

Figura 11. Localizzazione delle catene in legno in sezione e modello

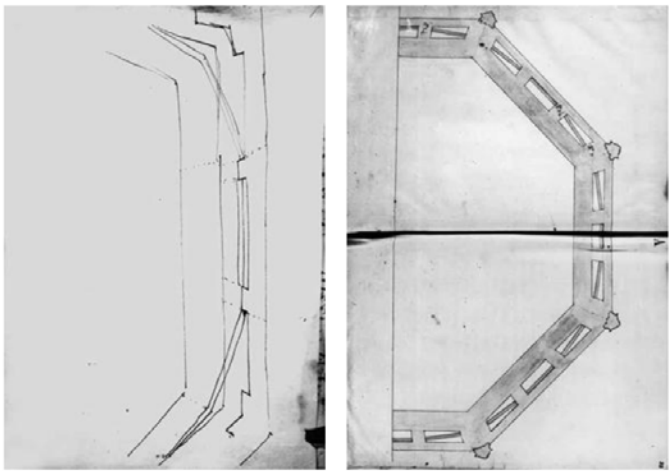
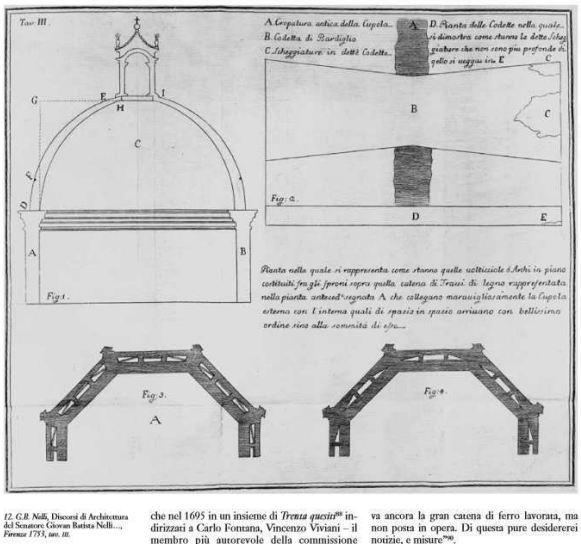


Figura 12. Andamento della catena lignea della cupola di Santa Maria del Fiore, Firenze, Biblioteca Nazionale Centrale, m.s. Galileiano 222, c.117r- Biblioteca Riccardiana, m.s. Riccardiano 2141, cc.19v-20r.



12. G.B. Nelli, Discorsi di Architettura del Senatore Giovan Battista Nelli..., Firenze 1753, tav. III.

che nel 1695 in un insieme di *Trenta quesiti*[88] indirizzati a Carlo Fontana, Vincenzo Viviani – il membro più autorevole della commissione va ancora la gran catena di ferro lavorata, ma non posta in opera. Di questa pure desidererei notizie, e misure"[90].

Figura 13. La catena lignea nella cupola di Santa Maria del Fiore, G.B. Nelli, Discorsi di Architettura del Senatore Giovan Battista Nelli, Firenze 1753, tav.III.

Nel Seicento, in un progetto di consolidamento della cupola, le cui lesioni apparivano amplificate, fu proposto un nuovo intervento di cerchiatura basato su quattro ordini di catene in ferro, a loro volta composte da spezzoni di catene angolari (8 parti per catena) o rettilinee (16 tratti per catena, due per ciascuna vela) collegate all'estremità da un occhiello. Le catene vennero progettate e ordinate dall'Opera del Duomo, ma non furono mai poste in opera. Nel dibattito relativo all'opportunità del loro inserimento, che si protrasse fino al Settecento, fu coinvolto anche Giovanni Poleni, il quale nel 1743-44 progettò e realizzò le cinque catene che ancor oggi cerchiano **la cupola di San Pietro in Vaticano.**

In questa grande cupola romana, alcuni anni dopo la fine della costruzione (1592), fu riscontrato un quadro fessurativo importante, che divenne oggetto di numerosi dibattiti protrattisi per lungo tempo. Nel 1742-43 papa Benedetto XIV affidò le verifiche di stabilità della cupola a diversi tecnici. Le fessure suggerivano che la volta si stesse separando in vari spicchi, in seguito all'incapacità della muratura di resistere alle trazioni che si propagano nelle fasce perimetrali inferiori, con conseguente abbassamento della lanterna e divaricazione del timpano. I contrafforti presenti e le due cerchiature in ferro posizionate durante la costruzione della volta (una delle quali fu trovata spezzata) non risultavano sufficienti a contrastare le spinte laterali.

Un primo studio fu commissionato ai "tre Matematici", T. Le Seur, F. Jacquier e R.G.Boscovich, i quali denunciarono un preoccupante stato di dissesto e suggerirono una modifica della geometria della struttura. Una nuova analisi venne poi affidata a G. Poleni, accompagnato dall'architetto della fabbrica L. Vanvitelli. Egli sviluppò un'analisi statica della cupola applicando la procedura proposta da di R.Hooke (1675), ed utilizzando una fune (catenaria) soggetta agli stessi carichi della cupola. Rovesciando il profilo della fune, (la cosiddetta "curva delle pressioni"), Poleni riscontrò che risultava compresa nello spessore della cupola, anche se si discostava notevolmente dall'asse baricentrico.
Per sopperire ai problemi riscontrati, Poleni propose, accanto ad una sarcitura delle fessure e ad un ripristino murario con la tecnica dello "scuci-cuci", una cerchiatura con cinque catene in ferro fucinato (una sesta fu aggiunta successivamente da Vanvitelli nel 1748).
Le cerchiature sono ancor oggi in opera e la cupola è in condizioni di sicurezza per merito di un sistema di consolidamento mirato, leggero e allo stesso tempo efficace.

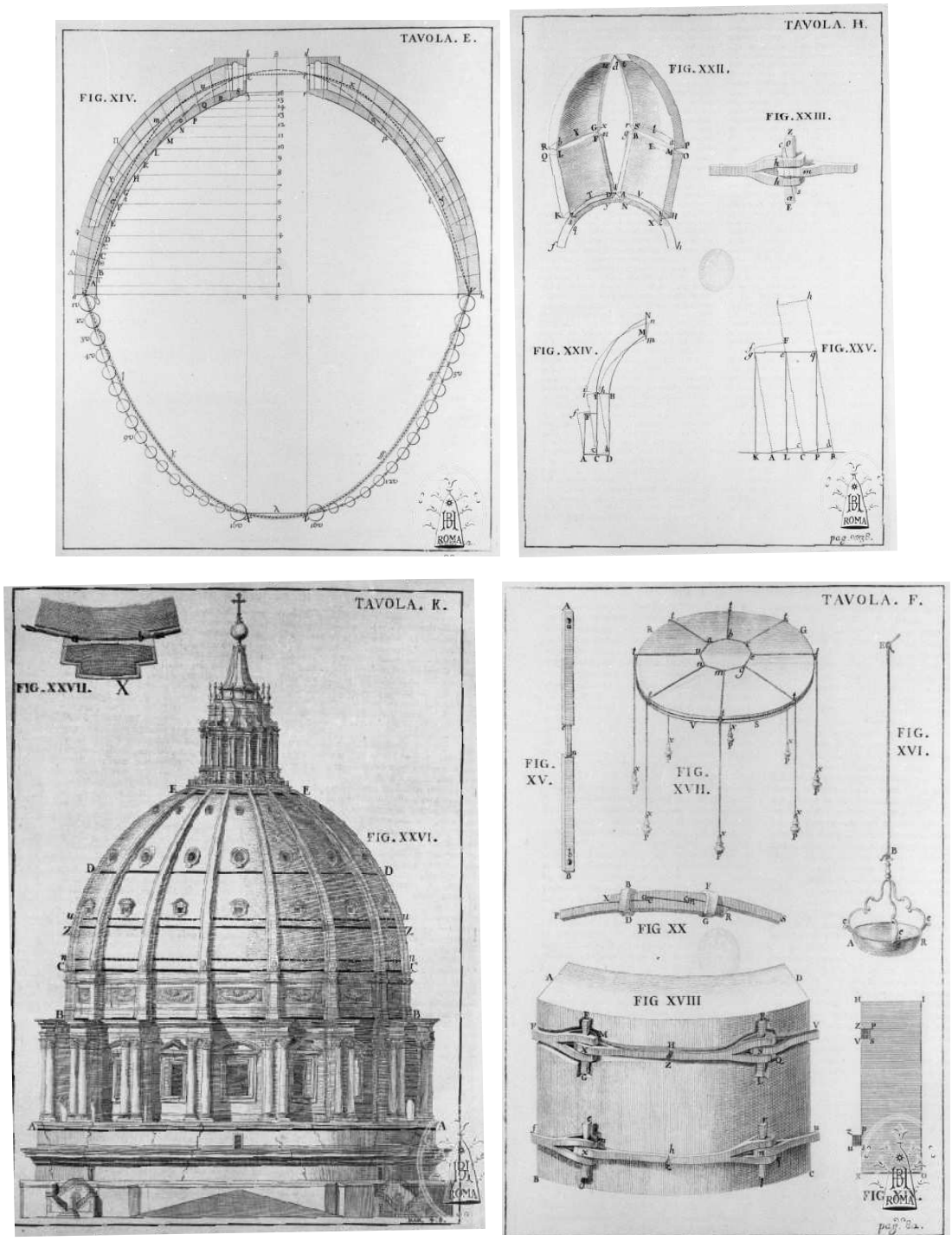


Figura 14. Studi di Giovanni Poleni sulla cerchiatura della cupola di San Pietro in Roma, (G. Poleni. Memorie istoriche della Gran Cupola del Tempio Vaticano e de' danni di essa, e de' ristoramenti loro, divise in libri cinque, Padova, 1748).

2.5 Santuario della Santa Casa di Loreto a Tresivio (SO)

La cerchiatura delle cupole può essere operata anche dall'interno. E' il caso della Santa Casa di Loreto a Tresivio, in cui la cupola ottagonale è stata cerchiata alla base per contenere le spinte esercitate verso l'esterno. La cerchiatura è stata posizionata internamente alla cupola, al di sopra della cornice del tamburo, in modo tale da non risultare visibile all'occhio dell'osservatore; essa è stata realizzata mediante otto spezzoni di tiranti Dywidag connessi ai vertici dell'ottagono alla muratura perimetrale con connettori dotati di capochiave esterno. Proprio in prossimità degli angoli sono stati posizionati anche i tenditori cha hanno permesso il tensionamento dei tiranti. Il sistema presenta i vantaggi di una invasività molto ridotta, e di una facilità di manutenzione e ritesaggio.

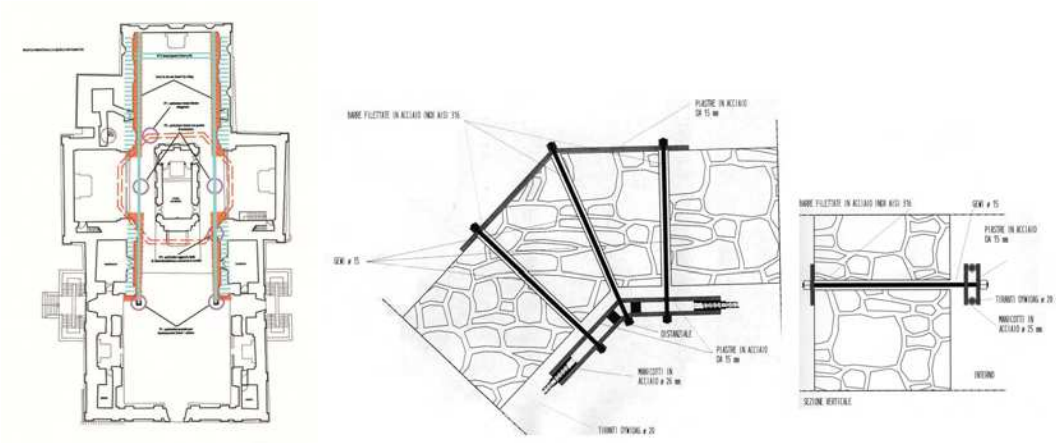


Figura 15. Pianta e dettaglio delle cerchiature della cupola ottagonale della Santa Casa di Loreto a Tresivio.

Figura 16. Cerchiature interne alla cupola ottagonale della Santa Casa di Loreto a Tresivio.

2.6 Chiesa di Santa Caterina a Lucca *(arco armato "a ragnatela")*

L'intervento sulla cupola della Chiesa di Santa Caterina a Lucca costituisce una estensione dell'utilizzo dell'"arco armato". Si tratta infatti di una cupola a pianta ellittica, con un oculo centrale al vertice, che è stata oggetto di un approfondito calcolo agli elementi finiti, il quale ha permesso di individuare una situazione molto gravosa nella zona di imposta della cupola, sul lato intradossale, soprattutto sotto carico sismico.

Figura 17. Vista interna ed esterna della cupola della Chiesa di Santa Caterina a Lucca.

Operando sul modello FEM, allo stato di fatto della cupola, sono state ipotizzate diverse soluzioni di consolidamento che hanno previsto la posa di cavi disposti anche lungo i meridiani, e non solo lungo i paralleli, così da contenere la cupola con una sorta di maglia a graticcio ortogonale, *una ragnatela*, opportunamente tesata.

La forma ellittica, la presenza delle costolature e la presenza dell'oculo ha reso la scelta della geometria finale dei cavi più complicata di quella relativa ad una semplice cupola sferica, ma il risultato finale, in corso di esecuzione, è particolarmente soddisfacente.
La soluzione adottata (cerchiatura perimetrale su vari livelli e archi armati meridiani in corrispondenza delle costole, entrambi con una trazione iniziale di 20 KN) permette una adeguata riduzione degli sforzi nella cupola a fronte di una semplicità di posizionamento delle varie componenti che costituiscono l'intervento.
In sintesi, sono stati adottati 3 livelli di cerchiatura dei paralleli e 16 cavi radiali sulle costole, che vanno dal livello del riempimento fino a quello di appoggio del solaio di camminamento, all'estradosso della cupola.

I risultati ottenuti in questa soluzione hanno portato ad una riduzione della zona tesa, che passa dal 69% al 24%, ed una consistente riduzione della risultante delle trazioni membranali, che passa da 34,5 KN/m a 7,7 KN/ , nelle zone più sollecitate.

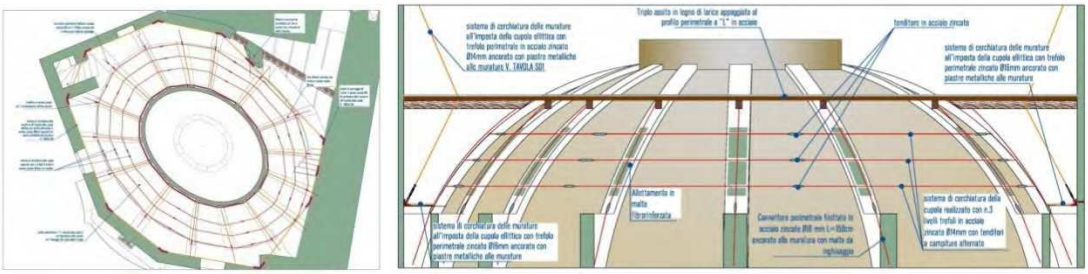


Figura 18. Schema di realizzazione della cerchiatura della cupola di Santa Caterina con cavi disposti sia lungo i meridiani che lungo i paralleli.

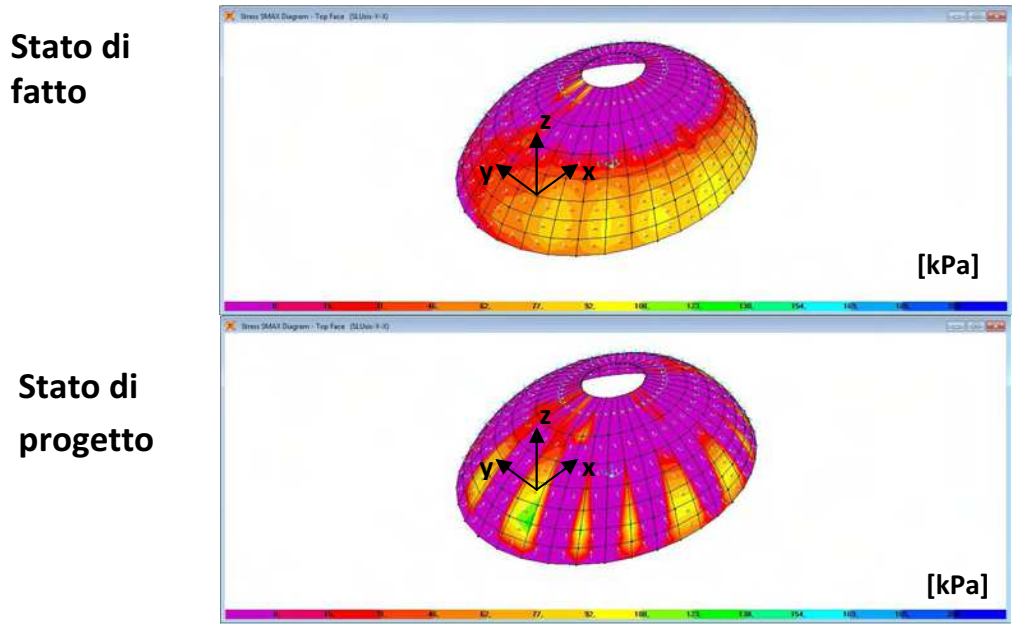


Figura 19. Tensioni principali massime all'estradosso della cupola per sisma (–Y – 0,3X) – confronto tra SdF e SdP con cavi metallici posti al di sopra delle 16 costole e 3 livelli di cerchiatura. In viola le zone soggette a compressione.

E' stata valutata anche una diversa disposizione dei cavi che non segue più l'ordinamento ortogonale dei meridiani e paralleli, ma adotta una orditura a cavi eccentrici, passando ripetutamente *a lato dell'oculo* posto in sommità.
Si sono prese a modello alcune cupole che presentano nervature all'intradosso, come ad esempio la Chiesa di San Lorenzo a Torino, in cui appaiono costoloni incrociati per incrementare sia la resistenza a compressione della cupola che la sua rigidezza.
I risultati di tale distribuzione a cavi incrociati, eccentrici rispetto al vertice della cupola, sono promettenti.