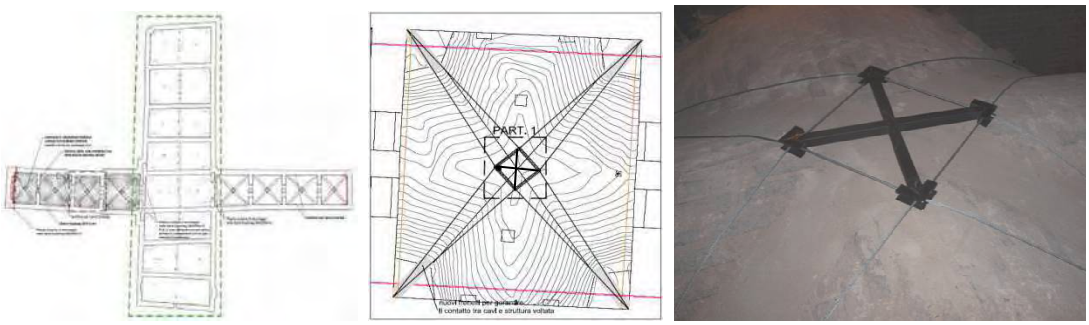



Figura 10: Arco armato realizzato con cavi incrociati “a stella” al di sopra delle cupole dei transetti.

### 2.7.7 Castello di Masino, Caravino, TO *(arco armato “depresso”)*

Il consolidamento ha riguardato la volta a botte policentrica della “Galleria dei Poeti” (XVI sec.), un ambiente lungo quasi 35 metri e largo poco meno di 5. Una lesione passante in chiave, disposta longitudinalmente, e numerose fessurazioni laterali, accompagnate da una depressione del campo centrale della volta superiore ai 15 centimetri, erano i sintomi più chiari dell’insufficiente azione di contrasto svolta dalla parete confinante con l’esterno.
Dopo aver sigillato le lesioni, sono state applicate fasce in fibra di carbonio, annegate in una matrice di malta idraulica (tecnologia ‘X-Mesh’) con giacitura diagonale e incrociata, in grado di resistere efficacemente agli sforzi di trazione; esse si configurano come un presidio di tipo passivo. Per contrastare le azioni che sono causa della depressione, invece, si è scelto di ricorrere a una serie di interventi attivi, ossia 9 archi armati estradossali, disposti ortogonalmente alla direttrice della volta.
La geometria del cavo segue esattamente quella l’arco in muratura, *anche nella zona depressa centrale*, la quale, in virtù delle forze esercitate dai tiranti, viene indotta a lavorare come un arco con concavità opposta rispetto a quella della volta stessa. Una serie di cavi paralleli alle due falde del tetto si occupano di impedire alle imposte delle volte di divaricarsi ulteriormente.

Figura 30. Interventi realizzati al castello di Masino e prove sperimentali su modello ligneo di arco depresso.

### 2.7.8 Salone delle Grottesche, Castello della Manta (CN) *(arco armato "incrociato")*

L'intervento con *archi armati incrociati* ha riguardato il "Salone delle Grottesche" del Castello della Manta, un ambiente largo 8 metri e lungo 14, sormontato da una volta a schifo lunettata e affrescata, la cui situazione di dissesto era preoccupante: si osservavano due lesioni diagonali passanti in corrispondenza delle linee d'intersezione tra i fusi, tali da coinvolgere anche lo specchio, accompagnate da microfessurazioni diffuse. Si evidenziava, ancora una volta, lo scarso contenimento esercitato sulle pareti di imposta. In particolare la volta, priva di incatenamenti all'intradosso, poteva contare solo su alcune nervature di irrigidimento in muratura, mentre erano presenti ferri diagonali, ormai gravemente inflessi, annegati nella muratura estradossale in prossimità delle imposte e connessi alle travi lignee del solaio soprastante.
Il ricorso alla tecnica dell'"arco armato" ha previsto la messa in opera di 4+2 cavi, in corrispondenza di ciascuna delle nervature esistenti. I cavi, in acciaio inox (Ø 16 mm), dotati di redance, morsetti e tenditori, sono stati contenuti entro una guaina protettiva in teflon, e ancorati alla muratura per mezzo di barre in acciaio inox filettate ad aderenza migliorata. Tra i cavi e le nervature è stato interposto uno strato di malta di calce idraulica naturale fibrorinforzata, con funzione di ripartizione dei carichi. Trascorso un congruo periodo di tempo, i cavi sono stati sottoposti ad accorciamento; la coazione imposta ha provocato una trazione nel cavo e una compressione benefica nella volta, utile per scongiurare ulteriori dissesti.

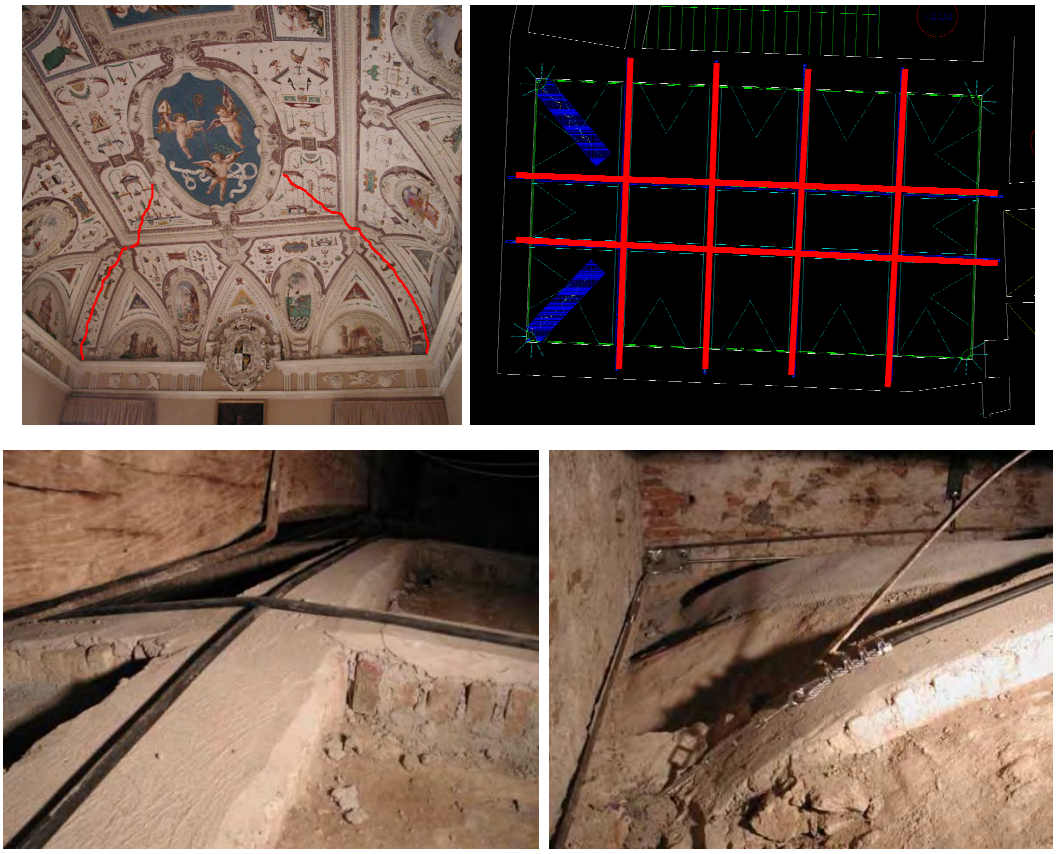


Figura 31. Interventi realizzati al di sopra del Salone delle Grottesche, Castello della Manta.

### 2.7.9 Chiesa della Beata Vergine Assunta di Casaloldo, MN *(arco armato "deviato")*

L'intervento sulle volte a botte della chiesa parrocchiale ripropone la tecnica dell'"arco armato" finalizzata al contenimento della volta a botte unghiata e alla limitazione degli sforzi di trazione nella muratura. In questo caso i cavi non sono stati semplicemente posizionati in parallelo sulle botti, ma sono stati deviati, collegandoli tra loro nella parte centrale con tenditori in acciaio, principalmente per non interferire con le lunette finestrate esistenti. In questo modo è stato possibile estendere più uniformemente l'efficacia dell'"arco armato" in direzione longitudinale alla volta.

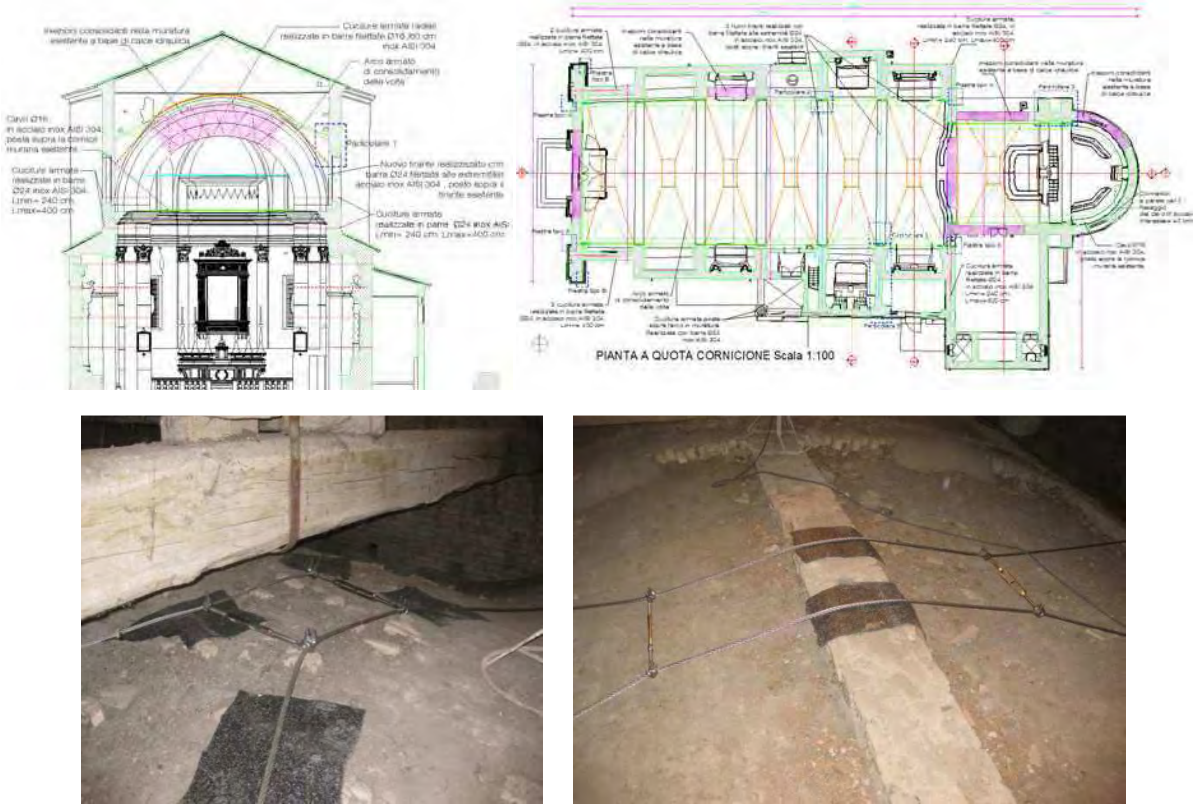
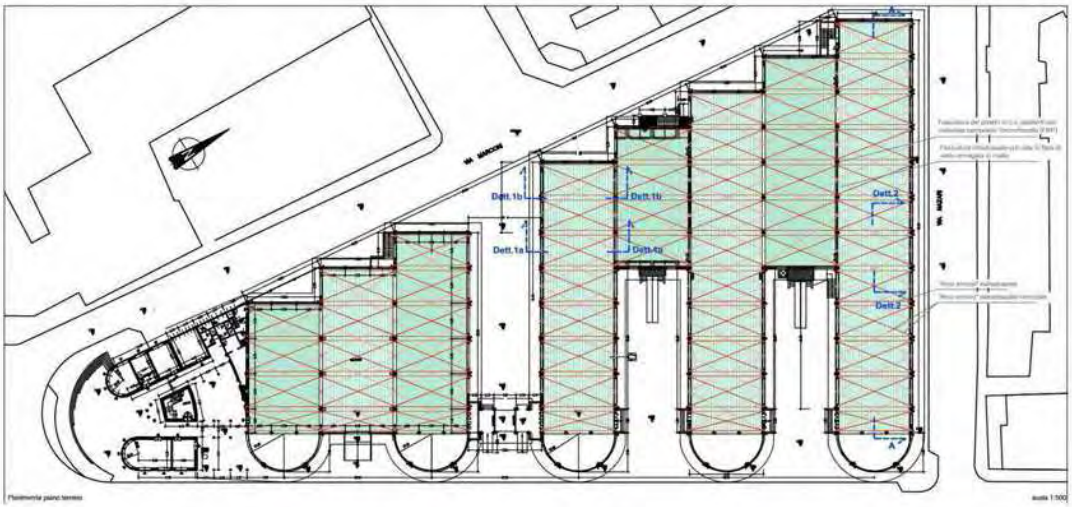



Figura 32. “Arco armato” con geometria sagomata, adottato nella chiesa della Beata Vergine Assunta di Casaloldo.

### 2.7.10 Mercato Coperto di Novara *(arco armato “a diagonali”)*

Ancora sul tema del confinamento delle volte, vogliamo commentare la soluzione proposta per il consolidamento della copertura in laterocemento, irrigidite da archi reticolari in c.a., del Mercato Coperto di Novara, una struttura molto leggera, con spessori esili, appoggiata su pilastri e priva di pareti a taglio.
Il disegno dell’”arco armato” qui adottato crea una maglia di *cavi diagonali* in grado di incrementare la resistenza ai carichi verticali e di controventare l’intera copertura, in caso di eventi sismici.



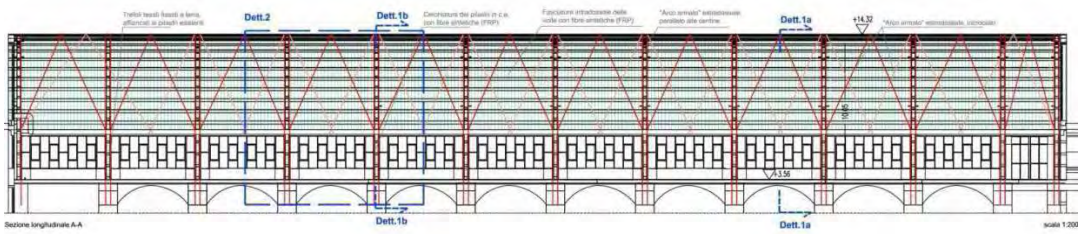



Figura 33. Pianta e sezione della struttura di copertura del Mercato di Novara consolidata con Arco Armato a diagonali

In termini più specifici, è stato previsto di inserire alcune nervature diagonali, al disotto dei cavi, realizzate con cordoli in c.a. di dimensione 20x18 cm, in modo da ottenere bielle rigide, capaci di trasferire anche le sollecitazioni di compressione, riducendo le possibilità di rottura per compressione delle sottostanti fragili tavelle in laterizio.
Il comportamento della copertura e degli archi collegati tra loro dai cavi diagonali è molto simile a quello di una trave reticolare, in cui i cavi post-tesati costituiscono le diagonali tese, mentre i cordoli in c.a quelle compresse.

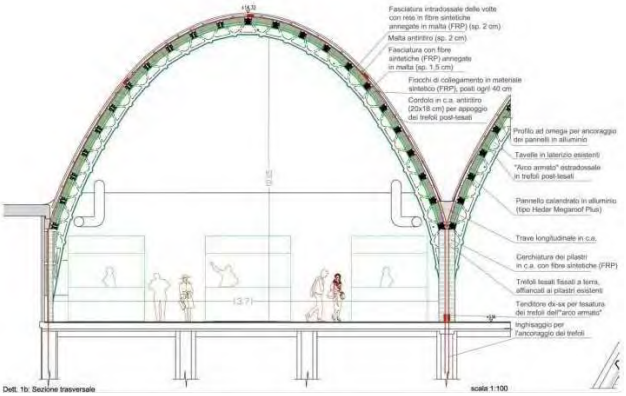


Figura 34. Sezioni trasversali del mercato coperto di Novara
Figura 35. Hangar di Pier Luigi Nervi a Orvieto, 1935

L'uso di costolature diagonali come risposta alle sollecitazioni sia verticali che orizzontali è una tecnica adottata in grandi opere del passato, come la copertura dell'Hangar di Pier Luigi Nervi a Orvieto, 1935, a cui ci siamo ispirati.

Il benefico effetto di controventatura dell'"arco armato" non si limita alla copertura, ma viene esteso al livello sottostante. La coppia di cavi che converge in corrispondenza del pilastro di appoggio degli arconi di irrigidimento ed appoggio, infatti, viene prolungata in verticale fino a terra, correndo in aderenza al pilastro stesso, fino ad ancorarsi al solaio di calpestio.
Ciò consente di trasferire a terra il taglio applicato in sommità dai carichi sismici.

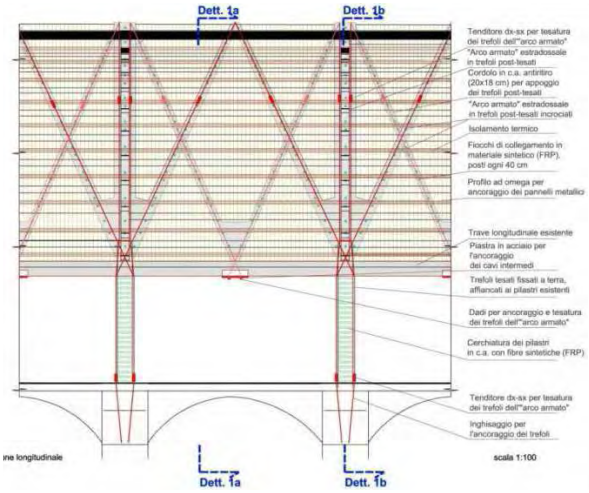



Figura 36. Particolare della sezione longitudinale del Mercato coperto di Novara.

Da calcoli agli elementi finiti si è ottenuto che, sotto carichi sismici, gli spostamenti della copertura diminuiscono del 39% in direzione trasversale e del 55% in direzione parallela alle navate, e analogamente diminuiscono le sollecitazioni, portando ad un miglioramento strutturale notevole, con l'adozione di interventi leggeri e rispettosi.

## 3. Il consolidamento di strutture a rudere

### 3.1 Cattedrale di Ani, Turchia *(arco armato "doppio")*

La tecnica di cerchiatura rappresentata dall'arco armato estradossale e/o intradossale ha sempre bisogno di una zona in cui i cavi possano ancorarsi ed ha bisogno che esista un impedimento alla mutua divaricazione delle imposte dell'arco. A prima vista parrebbe difficile applicare tale tecnica a strutture a rudere, come quelle rappresentate in figura, in cui mancano le zone di ancoraggio.
Si è proposto una ulteriore declinazione della tecnica dell'arco armato, in cui, invece di un cavo, si adottano due cavi (un *arco armato "doppio"*), di cui uno all'estradosso ed uno all'intradosso, collegati tra loro da connettori.
L'effetto meccanico dei due cavi paralleli, i quali si agganciano ad una piastra comune posta alle estremità dell'arco, è assimilabile a quello di un unico cavo baricentrico che, quando viene tesato, comprime tra loro i vari conci. Il modellino di arco in scala ridotta, qui sotto riprodotto, consente di osservare che l'arco è in grado di resistere a flessione anche in assenza di appoggi alle estremità.
Nel caso dei resti del Santuario di S.Amenaprgitch, ad Ani in Turchia, l'abside potrebbe essere consolidata mediante cerchiature orizzontali delle murature. Un doppio cavo in acciaio potrebbe circondare l'abside e, dopo essere stato posto in tensione, ne consentirebbe il contenimento a fronte di ulteriori carichi sismici.
La medesima tecnica sarebbe applicabile anche in direzione verticale, collegando le zone in aggetto della semi cupola collassata alle pareti verticali, e, scendendo ancora, alle fondazioni. Si tratta di una proposta di intervento reversibile, particolarmente adatta ad interventi di messa in sicurezza d'urgenza.

Figura 37. Resti del santuario di S. Amenaprgitch, S. Salvatore, ad Ani, Turchia. La città fu distrutta da un forte terremoto nel 1319.

## 4. Conclusioni

La specifica capacità dei cavi in acciaio di lavorare *a sola trazione*, coniugata alla specifica capacità delle murature di lavorare *a sola compressione*, dà luogo a soluzioni di consolidamento efficaci che migliorano notevolmente il comportamento flessionale delle superfici murarie curve, ossia archi volte e cupole.
Il sistema, denominato "arco armato", è flessibile e si adatta a molte e diverse geometrie, con risultati formali accettabili e con le caratteristiche di necessità, leggerezza, scarsa invasività e possibile rimovibilità che vengono richieste alle moderne scelte del restauro conservativo in ambito strutturale.

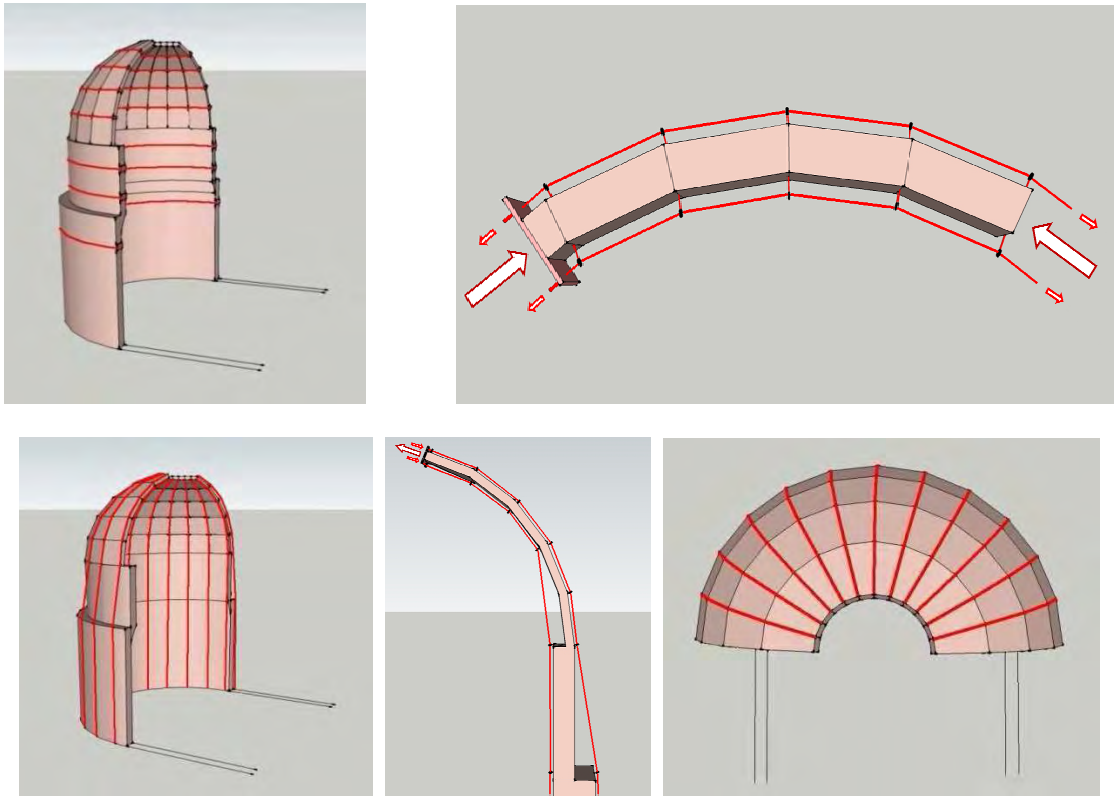


Figura 38. Schema di intervento sull’abside del Santuario di S.Amenaprgitch, ad Ani in Turchia.

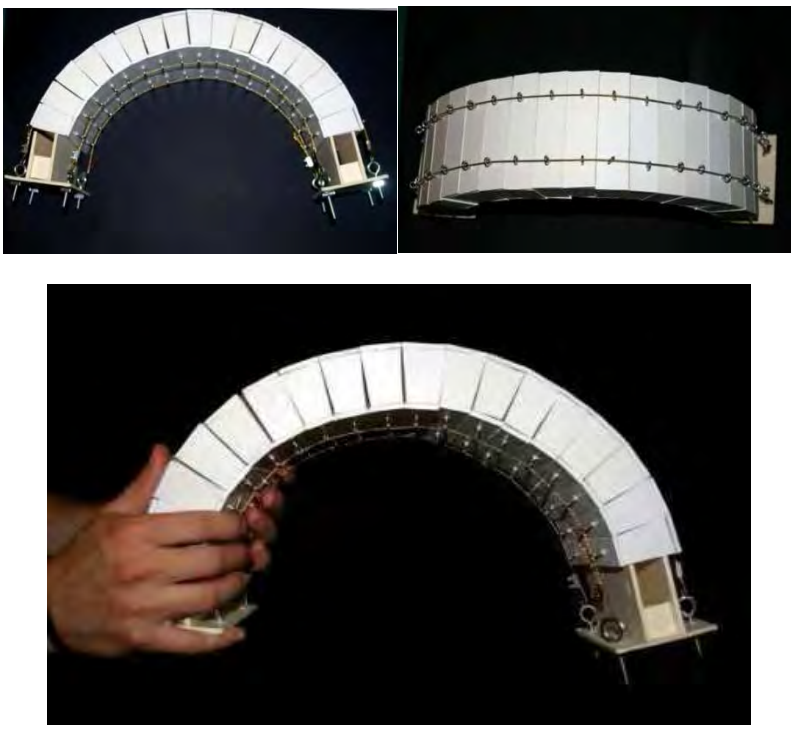


Figura 39. Modello in scala ridotta dell’”arco armato doppio”, con cavo intradossale ed estradossale.

## 5. Ringraziamenti

Ringrazio Alice Filaretti per la raccolta e la elaborazione delle immagini, Maurizio Giglio e Sara Bonfiglioli per la campagna sperimentale di prove su modello, Edoardo Radaelli e Camilla de Capitani, per la preparazione del modello di “arco armato doppio”.

## 6. Riferimenti bibliografici

L. Jurina – *Strutture in elevazione* – in “Almanacco dell’Architetto” (da un’idea di Renzo Piano), Proctor Edizioni, Bologna, 2012, pp. 84-249.
L. Jurina – *Tecniche di consolidamento dei monumenti: una panoramica attuale* – Atti di IF-CRASC ’12, V Convegno su Crolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento, Pisa, 15/17 Novembre 2012.
L. Jurina, M. Fasser, E. Rizzi, M. Mazzoleni, F. Zorloni, A. Bassoli – *Interventi di consolidamento statico e sismico del Duomo di Cremona* – in Cattedrale di Cremona: i restauri degli ultimi vent’anni (1992-2011), Skira, 2012, pag. 295-303.
L. Jurina – *Arco armato come soluzione adeguata al consolidamento sismico* – Convegno “Wonder masonry 2011”, Firenze, 10/11 Novembre 2011.
L. Jurina, A.Bassoli – *Cerchiature: tecniche tradizionali e innovative,* Ingegneri, n.5, anno II, Maggioli Editore, 2010, pp. 6-7.
L. Jurina – *Prove a collasso su archi in muratura consolidati con la tecnica dell’arco armato: risultati di una sperimentazione* – Atti di IF-CRASC ’09, IV Convegno su Crolli, Affidabilità Strutturale, Consolidamento, Napoli, 2/4 Dicembre 2009.
L. Jurina – *Una tecnica di consolidamento attivo per archi e volte in muratura* – Int. Symp. On Seismic Performance of Built Heritage in Small Historic Centers, Assisi, Italia, 1999.
F.P. Di Teodoro,“*Giovanni Poleni, Domenico Maria Manni e le catene per la cupola di Santa Maria del Fiore: per la storia delle fratture e dei previsti risarcimenti alla “grande macchina” di Filippo Brunelleschi”*, Annali di Architettura, 23-2011, C.I. studi di Architettura Andrea Palladio di Vicenza, 2011.
M. Como - *Sulla storia del restauro statico della cupola di S. Pietro Roma eseguito da Poleni e Vanvitelli*, in "Storia dell'ingegneria", atti del 2º convegno, Napoli, 7-8-9 aprile 2008, pp. 981-990.
J. Heyman – *The stone skeleton. Structural Engineering of Masonry Architecture,* – Cambridge University Press, Cambridge, 1982.

Siti web:

www.jurina.it
www.filippodiserbrunellesco.org
www.cisapalladio.org
www.museoomero.it