

SVILUPPI NELLA SPERIMENTAZIONE DELLA TECNICA DELL’“ARCO ARMATO”

Lorenzo Jurina¹, Maurizio Giglio², Sara Bonfigliuoli³

¹ Politecnico di Milano- dip. ABC, lorenzo.jurina@polimi.it

² Architetto libero professionista, Milano

³ Architetto libero professionista, Monza Brianza

ABSTRACT

In the consolidation of masonry arches and vaults the best design choice is the one that allow to obtain a compression behaviour between the masonry blocks, possibly without changing the actual geometry and limiting the addition of mass. Structural solutions that are effective and, at the same time, compatible with the historical material are therefore to be preferred to invasive solutions, that sometimes could even be harmful. Among the various possibility, the so called "RAM - Reinforced Arch Method" can be applied. This technique consists in changing the loads on the structure, adapting them to the existing geometry, through the placement and the post-tensioning of steel cables, either at the extrados of the arch or at the intrados. RAM is a reversible, active system that has been widely tested and used as reinforcement with respect to vertical loads. Recent developments of the method are oriented to verify the effectiveness of this system also against horizontal actions, such as seismic ones. In this paper the results of a recent experimental campaign conducted on about 500 small scale physical models of arches are discussed. The specimens simulate several arches having different geometries, subjected to horizontal loads and "consolidated" with RAM, under different tensions applied to the consolidation cables.

Some recent and innovative applications of this technique are illustrated, such as the elliptical dome of the church of Santa Caterina in Lucca and the ruins of the Armenian Sanctuary of S.Amenaprgitch in Ani (Turkey).

Parole chiave/Key-words:

Reinforced Arch Method, Compatibility, Reversibility, Seismic loads

Introduzione

Nell'ambito del consolidamento di edifici in muratura è frequente dover intervenire su situazioni di dissesto che interessano strutture ad arco. Il dissesto di un arco è generalmente legato alla incapacità della muratura 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.

Se la risultante si allontana dal baricentro, toccando il lembi all'estradosso o all'intradosso dell'arco, si crea una fessura lungo il giunto, vale a dire si manifesta una rotazione rigida tra due conci successivi. Quando tale fenomeno fessurativo si presenta in quattro posizioni, con fessure alternate, allora si ha la formazione di un meccanismo a quattro cerniere, a cui consegue il collasso dell'arco.

Consolidamento di archi e volte con la tecnica “arco armato”

Da alcuni anni è stata proposta da uno degli autori una tecnica di consolidamento denominata *Arco Armato*: un intervento leggero, reversibile e praticamente privo di masse aggiunte, con il quale ci si oppone alla formazione delle cerniere che si aprono in modo alternato all'intradosso e all'estradosso. Il metodo consiste nella posa di un cavo tesato su almeno uno dei lembi dell'arco o della volta, in modo da pre-comprimere i conci, così da renderli capaci di resistere a flessione [Figura 1]. Il cavo estradosso viene semplicemente appoggiato alla muratura, mentre quello intradosso deve essere puntualmente collegato ai singoli conci [1].

Quando il cavo viene tesato, il sistema diventa attivo ed è in grado di applicare all'arco un sistema di forze radiali, che ricentrano la curva delle pressioni e, di conseguenza, impediscono, o comunque posticipano, la formazione delle cerniere. Ci si avvicina così allo stato ideale di *compressione pura* tra concio e concio.

La tecnica dell'Arco Armato è stata ampiamente sperimentata e analizzata, individuando la risposta a collasso del sistema arco+cavo soggetto a carichi verticali, all'aumentare del tiro imposto al cavo d'acciaio [Figura 2]. Le prove effettuate hanno dimostrato la validità del metodo su archi tracciati secondo molteplici curve generatrici (tra cui circolari, ribassate, policentriche, a tutto sesto e a sesto acuto), comprese le situazioni strutturalmente meno favorevoli in cui l'arco è parzialmente *depresso* e quindi compromesso anche dai punti di vista estetico e funzionale [2].

L'efficacia strutturale del sistema dipende dall'intensità delle forze radiali trasmesse dal cavo (teso in maniera uniforme) alla muratura. L'adattamento delle forze radiali trasmesse dal cavo è un processo che si auto-governa e che si traduce in una distribuzione di pressioni il quale dipende dal raggio di curvatura locale (non necessariamente uniforme) ed è in grado di modificare la posizione e l'intensità della forza assiale che i conci mutuamente si trasmettono.

Il cavo tesato, infatti, può rimanere nella configurazione assegnata solamente se il

sistema di forze che lo interessa è equilibrato e se dà origine ad una curva delle pressioni *coincidente col cavo stesso*. Il cavo pertanto lavora a sola trazione. Le forze applicate dall'arco al cavo, per azione e reazione, sono uguali ed opposte a quelle applicate dal cavo all'arco. Di conseguenza, dato che l'arco in muratura ha *la stessa geometria* del cavo, le forze applicate all'arco lo sollecitano a sola compressione.

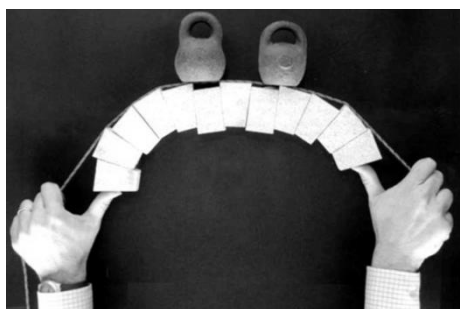


Figura 1 – Schema di funzionamento dell'“arco armato”



Figura 2 – Sperimentazioni condotte su modelli in muratura

Recentemente, dopo una corposa sperimentazione con carichi verticali [2], è stata condotta una nuova campagna sperimentale, con lo scopo di verificare l'efficacia della tecnica RAM in presenza di forze orizzontali, come quelle *sismiche* [3]. La sperimentazione è stata eseguita su modelli in legno, di luce 120 cm, che riproducono molteplici geometrie di arco, ed a cui sono state applicate sollecitazioni orizzontali [Figura 3 e 4]. Per ciascuna diversa geometria sono state sperimentati tre configurazioni: l'arco privo di rinforzi, l'arco consolidato con cavi solo all'estradosso e l'arco consolidato con cavi solo all'intradosso.

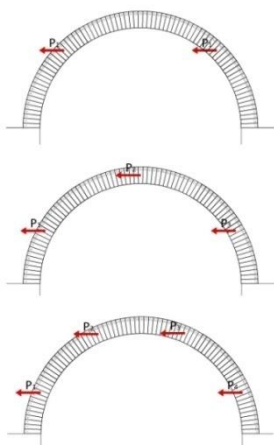


Figura 3 – Schemi di applicazione del carico ai modelli

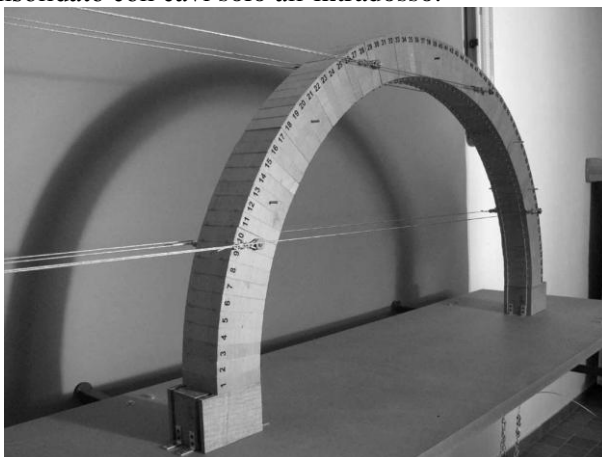


Figura 4 – Modello con carichi orizzontali applicati in 4 punti

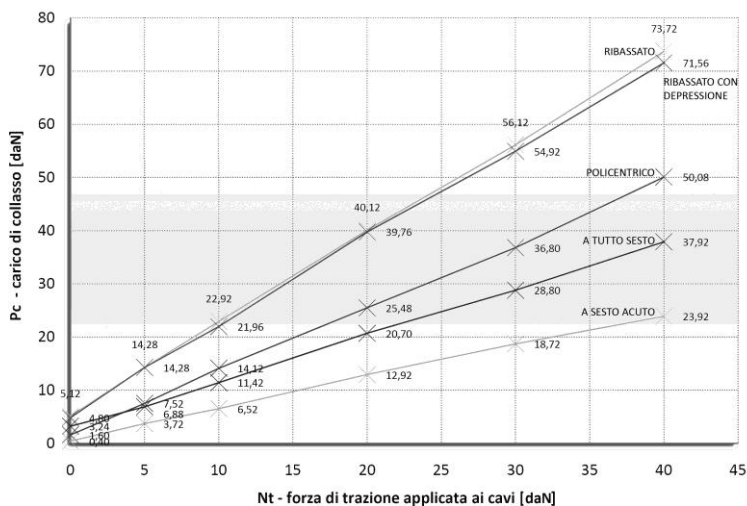


Figura 5 - Grafico con cavi all'estradosso: carico di collasso P_c in funzione della forza di trazione N_t applicata ai cavi d'armatura. Confronto tra varie geometrie di arco

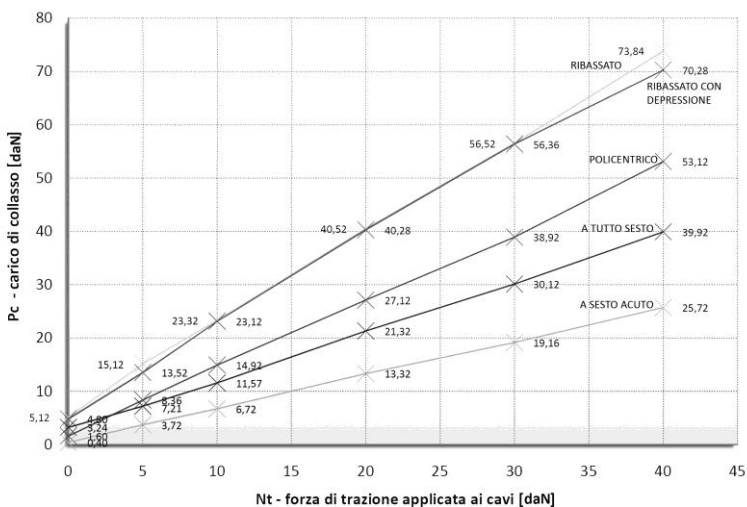


Figura 6- Grafico con cavi all'intradosso: carico di collasso P_c in funzione della forza di trazione N_t applicata ai cavi d'armatura. Confronto tra varie geometrie di arco

I risultati ottenuti hanno confermato la validità del metodo di consolidamento in presenza sia di carichi verticali che di carichi orizzontali. L'impiego della tecnica dell'Arco Armato ha portato a notevoli incrementi di resistenza a rottura rispetto alla situazione originaria (cioè in assenza di rinforzo), come si osserva nei grafici.

La validità della tecnica si estende a tutti i modelli sottoposti a test, a prescindere dal profilo geometrico, comprese le strutture già parzialmente deformate (è il caso del già citato arco depresso centralmente).

Un risultato decisamente interessante, leggibile nei grafici di figura 5 e 6, consiste nella *relazione di tipo lineare* tra il carico di collasso sotto azione orizzontale (P_c) e l'entità della forza di trazione imposta ai cavi d'armatura (N_t).

Confrontando i risultati ottenuti su modelli consolidati all'estradosso e su modelli consolidati all'intradosso, si ottiene che, a parità di tiro del cavo, il miglioramento è praticamente analogo, validando entrambe le modalità di applicazione.

Nuove modalità di utilizzo e di posa per la tecnica dell'arco armato

Il sistema dell'Arco Armato può essere applicato con efficacia anche su volte e cupole, che rappresentano l'estensione naturale dell'arco nello spazio.

La necessità di trasferire efficacemente i carichi cerchianti su un'area (della volta o della cupola) che sia la più estesa possibile, agendo mediante elementi monodimensionali (i cavi), ha portato a proporre differenti disposizioni dell'Arco Armato.

Nel caso delle *volte a crociera*, ad esempio, i tiranti sono resi solidali alle imposte murarie di appoggio delle volte mediante lunghe barre in acciaio inghisate, usualmente in acciaio inox. I cavi esercitano un'azione confinante sulla volta a crociera, migliorandone la risposta alle azioni agenti, sia verticali che orizzontali, e contrastando le fessurazioni che portano alla formazione di un meccanismo. Nelle prime applicazioni il trefolo veniva disposto solo lungo le diagonali principali delle volte; nel consolidamento delle volte a crociera delle navate del Duomo di Cremona e nel Duomo di Colorno è stato realizzato un sistema innovativo di posa, al fine di incrementare l'area di influenza e dunque l'efficacia dell'Arco Armato.

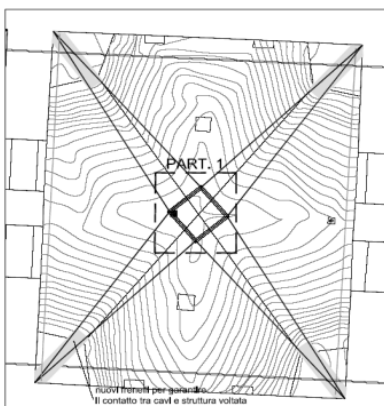


Figura 7 – Consolidamento di volte a crociera con cavi incrociati “a stella”



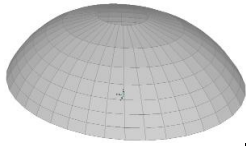
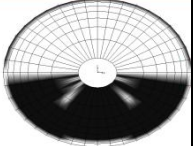
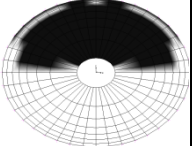
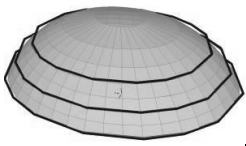
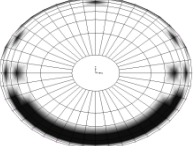
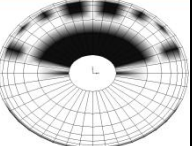
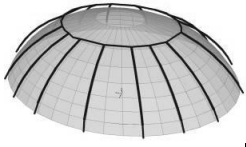
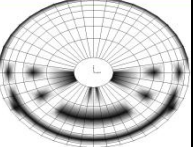
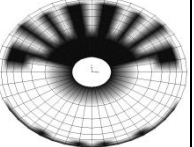
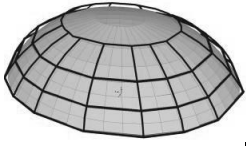
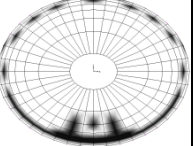
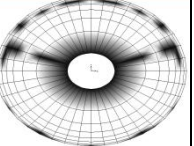
Figura 8 – Arco armato con distanziatori “a stella” nel Duomo di Cremona

I trefoli in acciaio estradosali partono dal medesimo punto all'imposta ma *si divaricano* risalendo lungo la curvatura della volta per poi incrociarsi in corrispondenza della chiave, dove un distanziatore "a stella" distribuisce in modo più uniforme le sollecitazioni [Figura 7 e 8].

Anche nella chiesa di Santa Caterina a Lucca, esempio notevole di architettura del tardo-barocco toscano, è stato sperimentato un particolare ed innovativo sistema di cerchiatura per il consolidamento 3D della *cupola ellittica*. [4]

L'analisi strutturale è stata condotta attraverso un modello preliminare semplificato agli elementi finiti rivolto allo studio della risposta sotto l'azione sismica. Sono state simulate sia le condizioni allo stato di fatto, sia molteplici proposte di consolidamento dalla quale è scaturita la scelta progettuale più adatta.

Tabella 1 – Cupola di S.Caterina_Lucca: Confronto tra le tensioni allo stato di fatto e le tensioni ottenute utilizzando 3 diversi sistemi di consolidamento, sotto azione sismica. Modellazione preliminare della sola cupola soggetta a sisma

	Sforzo massimo a trazione	Area a trazione INTRADOSSO	Area a trazione ESTRADOSSO	Δ lungo x \perp sisma	Δ lungo y // sisma
Stato di fatto	 0,18 MPa	 66%	 75%	100 %	100 %
Cavi lungo i paralleli	 0,10 MPa	 42%	 55%	90 %	92 %
Cavi meridiani	 0,06 MPa	 38%	 42%	86 %	75 %
Cavi lungo i paralleli + Cavi meridiani	 0,05 MPa	 34%	 33%	76 %	66 %

E' stata pertanto condotta una analisi che prende in esame la sola cupola, come se questa fosse un elemento indipendente e vincolato a terra. Tale semplificazione

permette di confrontare i soli contributi di ciascuno dei sistemi di consolidamento simulati, depurati dalle interferenze dovute alla geometria globale dell'edificio. Il carico sismico applicato ha ovviamente tenuto conto delle diverse combinazioni previste dalla vigente normativa.

Il **primo** sistema di consolidamento introdotto nel modello, per far fronte alle sollecitazioni sismiche, prevede l'uso di anelli di cerchiatura lungo i "paralleli", disposti su tre livelli, tesati a 10kN. Questo sistema è diffuso da secoli nel rinforzo di cupole grazie ai noti benefici in termini di riduzione degli sforzi di trazione.

Un **secondo** sistema inserito nella modellazione si ispira alla tecnica dell'*arco armato* e prevede cavi radiali estradosali in corrispondenza delle costole di nervatura, ossia lungo i "meridiani", tesati a 10 kN. Il consolidamento viene realizzato con la posa di trefoli in acciaio adiacenti alla superficie voltata ed ancorati efficacemente alla muratura di imposta e al solaio di sottotetto (in prossimità della chiave della cupola), prima di essere sottoposti a trazione mediante tenditori.

Il **terzo** sistema combina le due modalità appena descritte, ovvero la cerchiatura ad anelli paralleli e l'uso di cavi meridiani, lungo le costole.

In Tabella 1 sono riportati i principali esiti di questo studio preliminare.

E' possibile apprezzare la drastica riduzione delle aree soggette a trazione (sollecitazione nei confronti della quale la muratura è particolarmente vulnerabile), assieme alla diminuzione degli sforzi massimi e degli spostamenti in chiave.

In una seconda fase di verifica numerica si è analizzata la risposta sismica della cupola simulando l'intera geometria dell'edificio ed introducendo anche in queste analisi i tre sistemi di consolidamento già illustrati nel modello semplificato.

La situazione più gravosa, allo stato di fatto *non consolidato*, si ottiene all'intradosso della cupola, dove le zone soggette a trazione coprono una superficie molto estesa (il 69% della superficie intradosale). All'estradosso la situazione è altrettanto critica, con il 56% della superficie soggetta a trazione.

Il *primo sistema di consolidamento*, costituito da anelli di cerchiatura lungo i "paralleli", porta ad una considerevole riduzione delle aree soggette a trazione (si passa dal 69% al 35% della superficie intradosale della cupola soggetta a trazione), e contemporaneamente si ottiene una sensibile riduzione anche dello sforzo massimo di trazione calcolato (da 0,48 Mpa a 0,33 MPa).

I risultati ottenuti con il *secondo sistema di consolidamento*, in cui si applicano cavi radiali estradosali in corrispondenza delle costole di nervatura, portano ad una modesta riduzione in termini di superficie soggetta a trazione. (Si passa dal 69 % al 59% della superficie intradosale della cupola soggetta a trazione) . Di converso, si ottiene invece una notevole riduzione degli sforzi massimi di trazione (si passa infatti da 0,48 MPa a 0,24 MPa).

Sono stati poi combinati i due sistemi (anelli di cerchiatura lungo i “paralleli” e cavi radiali “meridiani” sulle costole) nel *terzo sistema di consolidamento*. I risultati ottenuti sono particolarmente interessanti. La superficie intradossale soggetta a fenomeni di trazione diminuisce drasticamente (dal 69% al 25%) ed anche i picchi di sforzo si riducono in modo notevole (si passa da 0,48 MPa a 0,21 MPa).

I risultati delle sperimentazioni numeriche (sia utilizzando il modello semplificato che il modello completo), mettono in evidenza il fatto che, accanto alle tradizionali cerchiature lungo i paralleli, i cavi lungo i meridiani (ossia gli *archi armati*) svolgono un ruolo determinante in termini di riduzione delle sollecitazioni originate dall’azione sismica

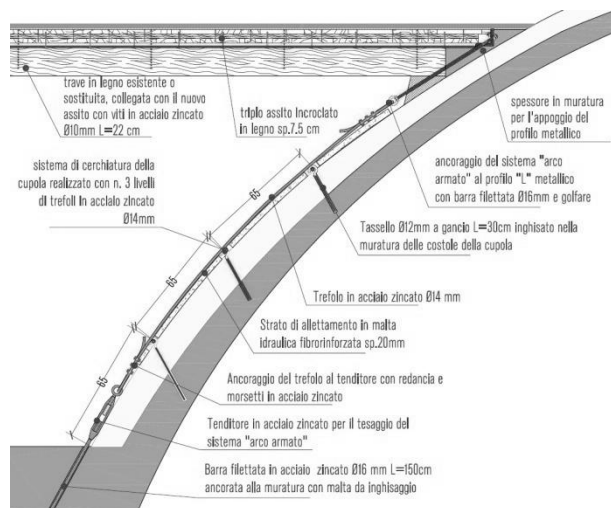


Figura 9 – Intervento di rinforzo della cupola ellittica con trefoli di cerchiatura “paralleli” e trefoli “meridiani” sulle costole



Figura 10 – Realizzazione dell’intervento di consolidamento della cupola di Santa Caterina a Lucca

La tecnica di cerchiatura dall’arco armato estradossale e/o intradossale secondo le modalità finora descritte ha sempre bisogno di un “punto d’appoggio” ossia di una zona fissa alla quale i cavi possano ancorarsi. A prima vista appare difficile applicare tale tecnica a strutture in cui mancano le zone di ancoraggio, come accade ad esempio in alcuni edifici a rudere.

Il Santuario armeno di S.Amenaprgitch, ubicato ad Ani, oggi in territorio turco, è un edificio in muratura a pianta centrale, coperto con una cupola emisferica. Questo edificio è crollato per metà, lasciando intatta solo una porzione di struttura, che risulta particolarmente vulnerabile a qualunque azione esterna, soprattutto trattandosi di una zona fortemente sismica. [5]

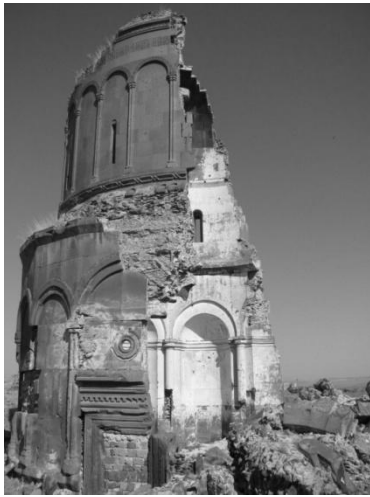


Figura 11 – Il Santuario di S.Amenaprgitch



Figura 12 - Il Santuario di S.Amenaprgitch

L'intervento proposto ha l'obiettivo di mettere in sicurezza l'edificio, evitando di nascondere le porzioni residue dietro ad invasivi ponteggi o puntellazioni, ed adottando un intervento che fosse leggero e reversibile ed allo stesso tempo economico.

Per questa specifica situazione è stata studiata una *ulteriore declinazione* della tecnica dell'arco armato: invece di utilizzare cavi posizionati solo all'estradosso oppure solo all'intradosso, vengono adottati contemporaneamente due cavi, uno all'estradosso ed uno all'intradosso, realizzando così un "*doppio arco armato*".

Il cavo all'estradosso viene semplicemente appoggiato, mentre il cavo all'intradosso deve essere ancorato puntualmente ai conci in muratura. I due cavi paralleli, anziché ancorarsi separatamente alle imposte (che qui non esistono) vengono agganciati ad una *piastra* posta alle estremità dell'arco. Il funzionamento della coppia di trefoli risulta così assimilabile a quello di un unico cavo baricentrico che, quando viene tesato, comprime tra loro i vari conci.

Questa proposta, illustrata dal modello fisico in Figura 13, verrà auspicabilmente applicata al caso di Anì. E' stata verificata l'efficacia del sistema con una modellazione ad elementi finiti, simulando sia la condizione non consolidata, sia tre distinte soluzioni di consolidamento che adottano il "doppio arco armato.

Esse consistono in:

1. cerchiature con doppi cavi paralleli orizzontali;
2. cerchiature con doppi cavi meridiani;
3. cerchiature con doppi cavi paralleli orizzontali e con doppi cavi meridiani.

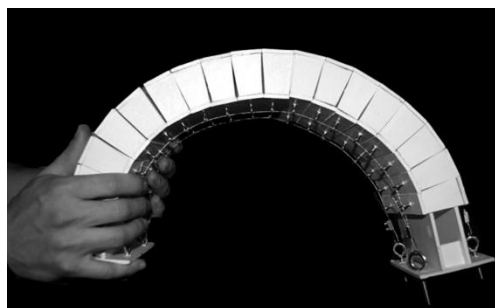


Figura 13 – Modello con simulazione del “doppio arco armato”

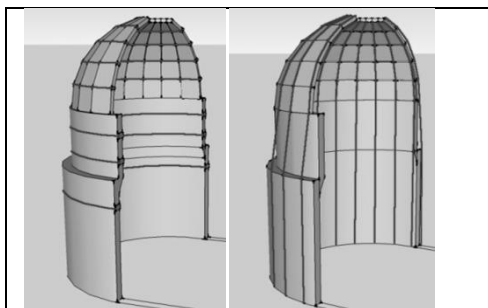


Figura 14 – Applicazione di “doppio arco armato” al Santuario di S.Amenaprgitch

L’analisi ha fornito risultati estremamente soddisfacenti in termini di efficacia del sistema “doppio arco armato”.

In Tabella 2 sono riportati i principali risultati della modellazione, di cui si evidenziano le consistenti riduzioni in termini di superficie soggetta a trazione.

Tabella 2 Santuario di S.Amenaprgitch ad Ani: Confronto tra l’estensione delle aree tese allo stato di fatto e quella ottenuta utilizzando 3 sistemi di consolidamento, sotto azione sismica.

	STATO DI FATTO	Cavi lungo i paralleli		Cavi lungo i meridiani		Cavi lungo i paralleli e lungo i meridiani	
Superficie tesa all’estradosso	44%	36%	– 18%	29%	– 35%	24%	– 45%
Superficie tesa all’intradosso	56%	43%	– 22%	33%	– 41%	31%	– 45%

Riferimenti bibliografici:

[1] Jurina L., *Cerchiatura di strutture murarie: tecniche tradizionali e innovative*, Ingenio n. 16, Ottobre 2013.

[2] Giglio S.M., *Consolidamento di archi e volte in muratura mediante la tecnica dell’arco armato. Approccio sperimentale*, Tesi di Laurea, rel. Lorenzo Jurina, Politecnico di Milano A.A. 2007-2008

[3] Bonfigliuoli S., *Consolidamento strutturale e antisismico di archi e volte in muratura: una sperimentazione sulla tecnica dell’arco armato*, Tesi di Laurea, rel. Lorenzo Jurina, Politecnico di Milano A.A. 2010-2011

[4] Jurina L., Stolfi G., Lambusier L., Mogenicato V.E., *Il riuso dell’antico “stenditoio” della chiesa di S. Caterina in Lucca*, 2° REUSO, Firenze 6-8 novembre 2014, Vol.1 pag. 283-290, Alinea editrice, ISBN 978-88-6055-829-9

[5] Jurina L., *New proposal for static consolidation of a damaged monument in Ani*, atti del convegno International Conference Cultural heritage Preservation, 4, 5, 6 Giugno 2014, Yerevan, Armenia.