



Figura 20. San Lorenzo, Torino, Italia (1667-1690), Guarino Guarini.

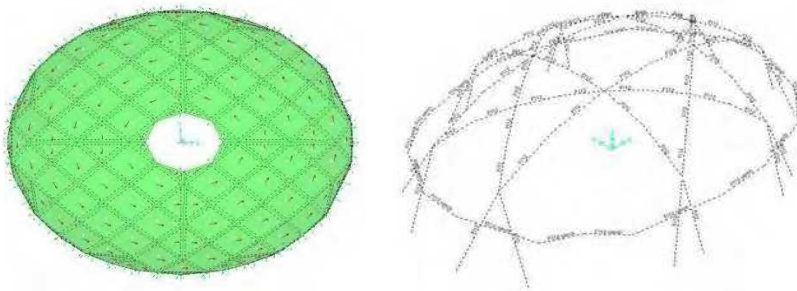


Figura 21. Mesh degli elementi shell della cupola e disposizione degli archi armati estradossali, incrociati.

## 2.7 Consolidamento di Archi e Volte con la tecnica dell'arco armato

Abbandoniamo ora le strutture di geometria circolare e concentriamo l'attenzione sulle **strutture semicircolari**, ossia archi e volte, nelle quali si potranno osservare diverse applicazioni della tecnica dell'”arco armato”. Per indurre una adeguata tensione nei cavi di cerchiatura assumono grande importanza i dispositivi di serraggio e di ancoraggio alle imposte, che, nelle strutture circolari, si limitavano alla chiusura degli anelli circolarziali.

### 2.7.1 Ponte Romanico sul fiume Uso, Sogliano al Rubicone (FC)



Figura 22. Immagini del ponte sul fiume Uso prima e durante i lavori di consolidamento con l'uso di 3 cavi inox.

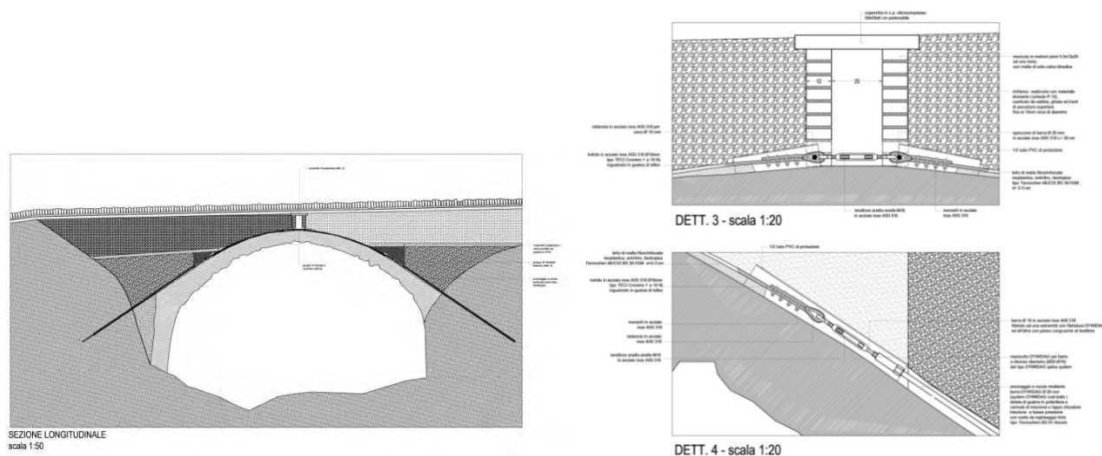


Figura 23. Sezione longitudinale del ponte consolidato e dettagli d'ancoraggio dei cavi.

L'intervento di consolidamento ha interessato il ponte in muratura che collega le due sponde del fiume Uso in prossimità del borgo medioevale di Monteffi (Sogliano al Rubicone (FC)). Il ponte in pietra ad unica arcata (larghezza 2 metri, luce 10 metri) prima dell'intervento risultava lacunoso in gran parte delle spalle laterali e nell'arcata. Dopo una prima messa in sicurezza della struttura, con il ripristino del tessuto murario e la stilatura dei giunti, iniezioni consolidanti, scuci-cuci e reintegrazioni parziali, è stata utilizzata la tecnica dell'"arco armato" estradossale, combinata con l'uso di catene trasversali (*diatoni*) in barre di acciaio inox.

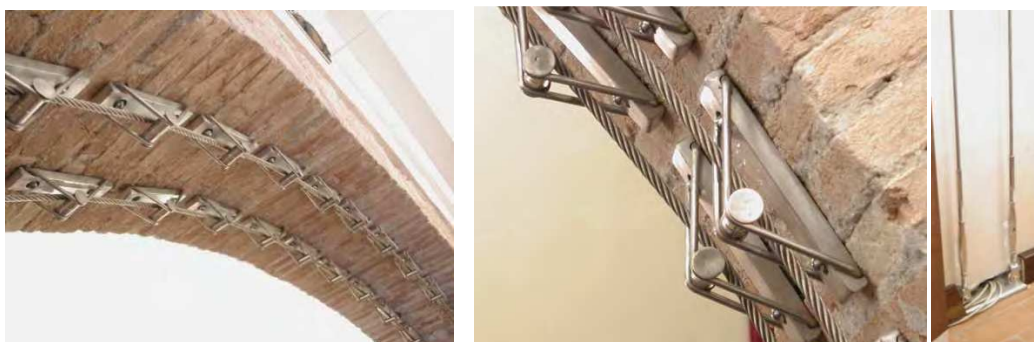
I 3 trefoli inox dell'"arco armato" sono stati posti all'estradosso dell'arcata, dopo averla vuotata dallo strato di rinfianco. I trefoli sono stati collocati all'interno di una guaina in teflon, su uno strato di ripartizione in malta cementizia polimerica fibrorinforzata.

I trefoli sono stati poi ancorati alle spalle del ponte e al substrato resistente mediante micropali in acciaio, inclinati, di lunghezza 8 metri. Prima di procedere con la posa del nuovo strato di riempimento e finitura si è avuto cura di rendere accessibili i dispositivi di tesatura e ri-tesatura (tenditori in acciaio inox) mediante appositi pozzetti di ispezione.

Le verifiche numeriche effettuate consentono di dimostrare la grande resistenza ottenuta dal ponte anche quando venga sottoposto a carichi sismici in direzione trasversale al ponte stesso.

### 2.7.2 Sala Consiliare dell'ex Convento San Cristoforo di Lodi (arco armato "intradossale")

Nell'ex Convento di San Cristoforo in Lodi, oggi sede della Provincia di Lodi, la tecnica è stata declinata al caso di un arco con soprastante parete, sul quale, pertanto, non si poteva agire dall'estradosso. E' stata quindi scelta un'applicazione agendo dall'intradosso, dove i cavi sono stati mantenuti prossimi alla superficie dell'arco mediante staffe a "V" in acciaio inox collegate con lunghi tasselli metallici alla muratura. I cavi dell'arco armato sono stati prolungati fino a terra e ancorati al solaio di pavimento per garantire la stabilità globale della struttura ad arco.



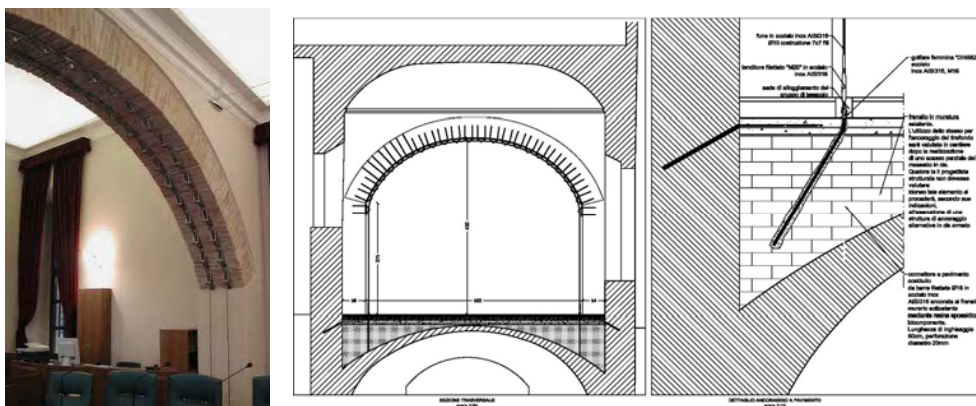


Figura 24. Immagini e dettagli dell’arco armato” intradossale realizzato nell’ex convento di San Cristoforo, in Lodi.

### 2.7.3 Villa Borromeo a Senago, MI (arco armato “intradossale”)

Anche in questa applicazione di consolidamento di volte murarie non è stato possibile rimuovere il pavimento soprastante, particolarmente prezioso. Le volte presentavano diversi avvallamenti e depressioni, cosicché si è reso necessario intervenire in due fasi. Inizialmente si è provveduto al ripristino della curvatura originaria degli elementi forzando la superficie voltata con puntelli telescopici e praticando alcune bucaure nella muratura, attraverso le quali si è effettuato un parziale svuotamento del materiale di riempimento soprastante; la compattezza del sottofondo è stata quindi ripristinata mediante iniezioni di malta. Successivamente è stato realizzato un sistema di “archi armati” intradossali. Per consentire ai cavi di aderire alla superficie intradossale sono stati adoperati dei golfari provvisti di speciali grilli dotati di piccole carrucole in teflon. Anche in questa applicazione i cavi sono stati condotti sino al piano del pavimento e sono stati post-tesi mediante tenditori.



Figura 25. Consolidamento delle volte di Villa Borromeo a Senago (MI) con “arco armato” intradossale.



Figura 26. Molte sono le analogie tra l’”arco armato” e un apparecchio ortodontistico

#### 2.7.4 Arsenale della Cittadella di Pisa (arco armato “a festoni”)

Le strutture superstiti dell’Arsenale della Cittadella di Pisa sono costituite da archi in muratura disposti secondo due direzioni perpendicolari, che sostenevano le gallerie in cui anticamente venivano costruite oppure riparate le navi. In occasione di un concorso per il recupero dell’Arsenale e la sua conversione in museo, è stato proposto un sistema di consolidamento strutturale basato sull’utilizzo dell’”arco armato” nelle due direzioni spaziali. Potrebbe essere definito una sorta di *arco armato a festoni*.

I cavi in acciaio inox confinano esternamente gli archi fino alle imposte, dove attraversano lo spessore murario per estendersi lungo i piedritti, ancorandosi alla base di ciascuna colonna. La cerchiatura dell’intero sistema funziona così come un **portale tridimensionale** che garantisce la stabilità di tutte le strutture, nei confronti di carichi verticali e orizzontali (sisma).

I tiranti corrono lungo lo sviluppo verticale di ciascuna colonna sui quattro lati esercitando un’azione assiale che si trasferisce alla muratura provocando una compressione in ciascuna colonna. Tale azione impedisce eventuali spostamenti relativi e/o fessurazioni, favorendo un comportamento di tipo “monolitico” dell’intera colonna.

L’estremità dei cavi viene ancorata alla base di ciascuna colonna, con connettori filettati annegati in un nuovo vespaio strutturale sottostante, realizzando così un sistema di **mutua connessione** tra fondazione, colonne in elevazione ed archi. Si è potuto dimostrare che il sistema proposto porta ad un adeguamento sismico (e non solo ad un miglioramento) in base alle vigenti norme italiane NTC2008.

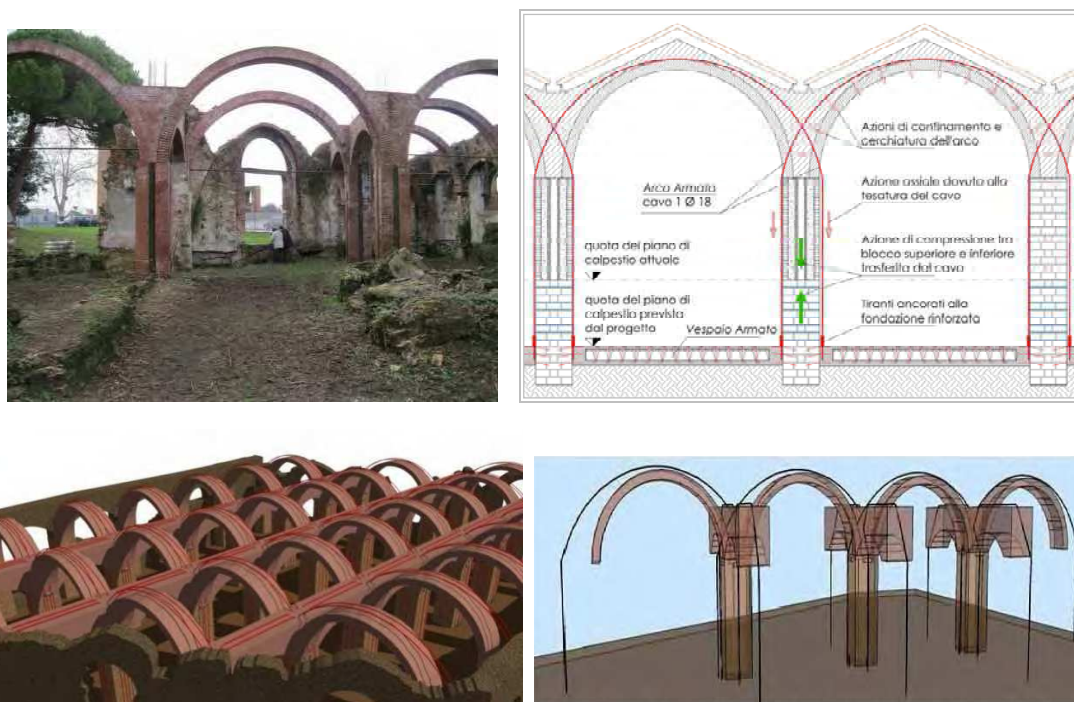


Figura 27. Stato di fatto e progetto di consolidamento con “archi armati a festoni” della Cittadella di Pisa.

#### 2.7.5 Chiesa di Padre Pio, S. Giovanni Rotondo (FG), 1994-2004, R.Piano (arco armato “baricentrico”)

Nella progettazione delle strutture della Chiesa di Padre Pio a San Giovanni Rotondo, l’architetto Renzo Piano ha fatto ricorso all’utilizzo di archi in blocchi prefabbricati di pietra, sfruttando appieno le caratteristiche strutturali della materia, ben resistente a carichi di compressione. Per mantenere gli archi in condizioni di stabilità anche sotto sollecitazioni sismiche, sono stati inseriti possenti cavi d’acciaio post tesi attraverso fori baricentrici, appositamente realizzati al loro interno. Si tratta di un *arco armato baricentrico*. Per creare i 21 archi (ampi fino a 50 metri ed alti fino a 16) sono occorsi circa 1.300 blocchi di pietra realizzati con diversi angoli di taglio, differenti dimensioni (fino a 3 metri di lunghezza) e diverse inclinazioni di foratura.

Si tratta, in altre parole, di una precompressione dell'arco, realizzata in una struttura di nuova costruzione, dove i cavi baricentrici incrementano l'azione assiale, limitando l'effetto negativo dei momenti flettenti.



Figura 28. Gli archi della Chiesa di Padre Pio a San Giovanni Rotondo (FG). Dettaglio dei blocchi in pietra perforati prima del montaggio.

### 2.7.6 Duomo di Cremona (*arco armato "sagomato a V"*)

L'intervento, che rappresenta una parte in un più ampio progetto di consolidamento strutturale e antisismico del Duomo di Cremona (XI secolo), propone una particolare declinazione della tecnica oggetto del presente articolo.

L'analisi della risposta strutturale del Duomo ai carichi sismici, condotta mediante una modellazione tridimensionale a elementi finiti, aveva messo in evidenza una eccessiva concentrazione di sforzi alla base delle murature delle navate (centrale e laterali), una pericolosa fessurazione delle volte a crociera (legata al divaricarsi dei pilastri di appoggio), nonché una difficoltà globale della struttura a mantenere un comportamento scatolare. E' stato quindi necessario studiare un intervento capace di coinvolgere non solo le strutture voltate, ma anche i piedritti, contrastandone i potenziali meccanismi di collasso. Tra i più pericolosi cinematismi individuati vi è stata la spinta laterale della navata centrale.

La morfologia della fabbrica impediva di agire intradossalmente con l'inserimento di catene a vista, a livello delle imposte, in quanto avrebbero interagito con le preziose volte affrescate, mentre offriva, al di sopra della navata centrale e degli estesi matronei laterali, un ampio volume disponibile all'interno del quale poter

operare. E' stato quindi proposto un sistema innovativo, che costituisce una variazione rispetto al tradizionale arco armato, il quale consente di sostituire le catene di contrasto ( che *tirano* le imposte della volta una verso l'altra) mediante un sistema di cavi posti esternamente alla navata ( che *spingono* le imposte una verso l'altra).

In primo luogo sono state collocate nel sottotetto sette travi reticolari metalliche binate, denominate "travi a boomerang" per la loro forma arcuata, affiancate agli arconi della navata centrale per offrire un parziale contrasto alle spinte laterali indotte dalle volte stesse; i boomerang sono poi stati collegati tra loro da robuste barre longitudinali, post-tesate e incrociate, con funzione di controvento in direzione dell'asse della navata, capaci di resistere ai carichi orizzontali.

Per offrire un contrasto laterale alle volte della navata centrale ciascuna "trave boomerang" è stata collegata ad un sistema di contrasto, posto nel matroneo, costituito da due barre in acciaio *sagomate a forma di V* e da un "puntone telescopico", il quale, appoggiandosi al vertice della V, è in grado offrire un contrasto concentrato all'imposta della volta, esercitando, dall'esterno verso l'interno, una spinta orizzontale sulla muratura, pari a circa 30 t, in corrispondenza di ogni campata.

Si tratta di un "arco armato sagomato" sempre finalizzato al contenimento degli archi in muratura, ma con la variante che l'elemento teso non segue esattamente la geometria dell'arco, così da poter esercitare una spinta puntuale localizzata esattamente alla imposta degli archi.

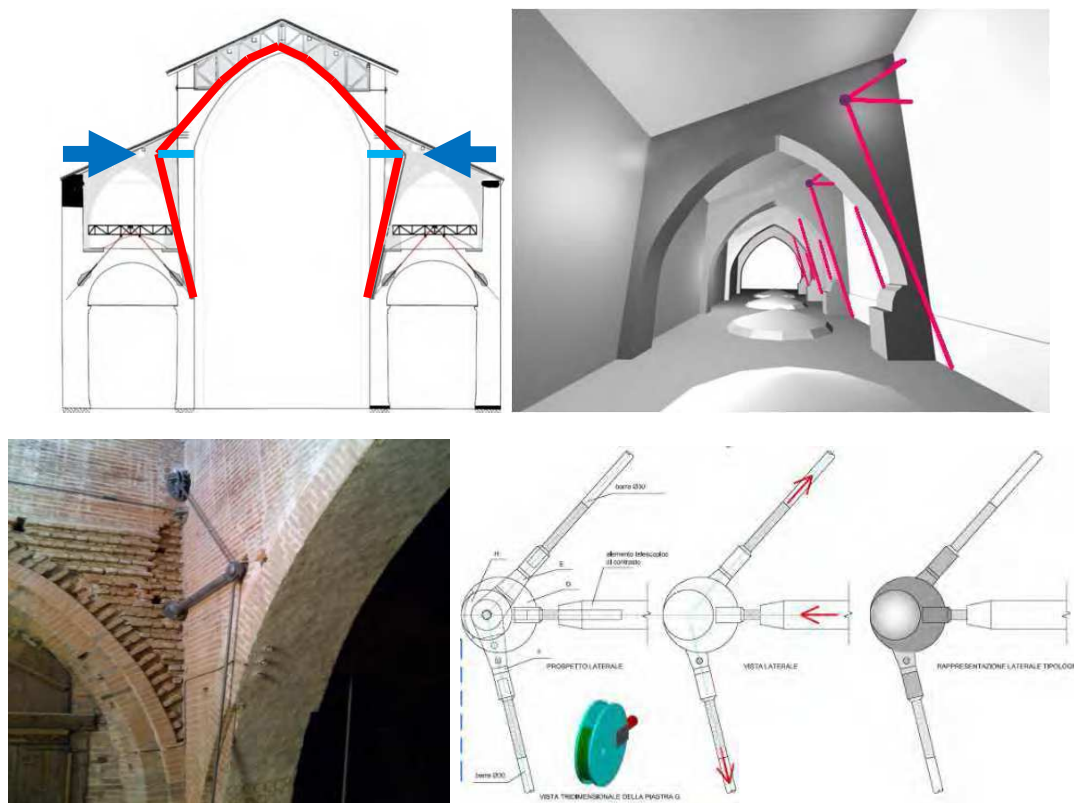


Figura 29. Arco armato di contenimento della navata centrale del Duomo di Cremona e giunto tra barre e puntone

Sopra alle volte delle navate centrale e laterali del Duomo di Cremona è stato inoltre previsto un utilizzo diffuso dell'"arco armato", con tiranti estradossali disposti in corrispondenza delle diagonali principali delle volte a crociera. Tali tiranti sono fissati con lunghe barre in acciaio inghisate nelle murature di appoggio delle volte ed esercitano un'azione confinante sulle volte stesse, migliorandone la risposta meccanica e contrastando le fessurazioni che portano alla formazione di cerniere plastiche. Tale sistema di rinforzo rende possibile un notevole incremento della portanza delle volte e non comporta alcun aumento sostanziale di massa che, sotto carichi sismici, sarebbe oltremodo dannoso per la sommità della navata centrale del Duomo. Sulle cupole dei transetti è stato utilizzato un particolare accorgimento, predisponendo *cavi incrociati disposti "a stella"* al di sopra delle cupole medesime. Si tratta di una ulteriore declinazione dell'arco armato, in cui ci si propone di incrementare l'area di influenza dei cavi.