



ORDINE DEGLI INGEGNERI
DELLA PROVINCIA DI TREVISO



““Degrado e consolidamento delle strutture
in calcestruzzo e muratura”
Treviso, 16-05-2014

“**PATOLOGIE E CONSOLIDAMENTO DI “ ARCHI, VOLTE E CUPOLE**”

Prof. Ing. Lorenzo Jurina – Politecnico di Milano



C. Torre, “Ponti in muratura”, copertina

ARCHI, CUPOLE E IL LORO FUNZIONAMENTO

FINO AL XIX SECOLO TEORIE PRE-ELASTICHE: PROBLEMI DI EQUILIBRIO (POLENI, HOOKE)

SISTEMA ARCO PIEDRITTO

VALORE LIMITE SPINTE ORIZZONTALI

DAL XIX AL XX SECOLO TEORIE ELASTICHE: CURVA DELLE PRESSIONI (MERY, NAVIER, CASTIGLIANO)

DOPO IL XX SECOLO TEORIE PLASTICHE: ANALISI LIMITE (HEYMAN)

Il **TEOREMA STATICO (T.S.)** stabilisce che, presa una qualsiasi configurazione staticamente ammissibile, il moltiplicatore λ_s è sempre inferiore, o al più uguale, al moltiplicatore di collasso reale λ_0 ; λ_0 è dunque il maggiore fra tutti i moltiplicatori staticamente ammissibili λ_s , ovvero: $\lambda_s \leq \lambda_0$ cioè $\lambda_0 = \lambda_s \max$. In base al T.S., quindi, se risulta possibile trovare almeno una soluzione staticamente ammissibile per la struttura in esame, allora essa non ha ancora raggiunto le condizioni di collasso.

Il **TEOREMA CINEMATICO (T.C.)** stabilisce invece che, dato un arbitrario meccanismo cinematicamente sufficiente, il moltiplicatore λ_c è sempre maggiore, o al più uguale, al moltiplicatore di collasso reale λ_0 ; λ_0 è dunque il minore fra tutti i moltiplicatori cinematicamente sufficienti λ_c , ovvero: $\lambda_c \geq \lambda_0$ cioè $\lambda_0 = \lambda_c \min$. In base al T.C., quindi, se risulta possibile trovare almeno una soluzione cinematicamente sufficiente per la struttura in esame, allora essa si trova in condizioni di collasso.

Il moltiplicatore di collasso effettivo λ_0 risulta essere, contemporaneamente, staticamente ammissibile e cinematicamente sufficiente, in quanto elemento separatore di due classi contigue. Si ha quindi: $\lambda_s \leq \lambda_0 \leq \lambda_c$.

L'**applicazione congiunta** di entrambi i teoremi consente di pervenire a due diversi valori del carico di collasso (associati ai rispettivi valori di $\lambda_s \max$ e $\lambda_c \min$ ricavati) che costituiscono il **range** entro il quale è contenuto il **carico di collasso reale**.

Prof. Lorenzo Jurina

ARCHI E VOLTE: ESTRATTI DALLA NORMATIVA ITALIANA 1909-2014

Regio Decreto n. 193/1909 (→ 1927, 1935, 1962)

“Le volte esistenti negli edifici da riparare sono tollerate, a condizione espressa che non siano lesionate, o non siano impostate su muri lesionati o strapiombati, e sempre quando sia provveduto ad eliminare le spinte con l'apposizione di robuste cinture, chiavi e tiranti. In ogni caso però dovranno sostituirsi con strutture non spingenti le volte in sommità degli edifici a più piani”

D.M. n. 40 del 3 marzo 1975 (→ 1986, 1996, 1997)

“Gli archi e le volte interessati da gravi dissesti [...] e se realizzati con muratura di non buona consistenza e fattura, devono essere eliminati”

“Qualora occorra risanare o rinforzare le volte, è possibile intervenire con la tecnica delle iniezioni di miscele leganti meglio se integrate da perforazioni armate [...] un valido sistema di rafforzamento consiste nel costruire in aderenza un guscio portante, generalmente estradossato, realizzato da una rete metallica elettrosaldata chiodata alla struttura da rinforzare e da uno strato di malta antiritiro ad elevata resistenza o di miscele di resine [...]”

C.M. n. 564 del 28 novembre 1997

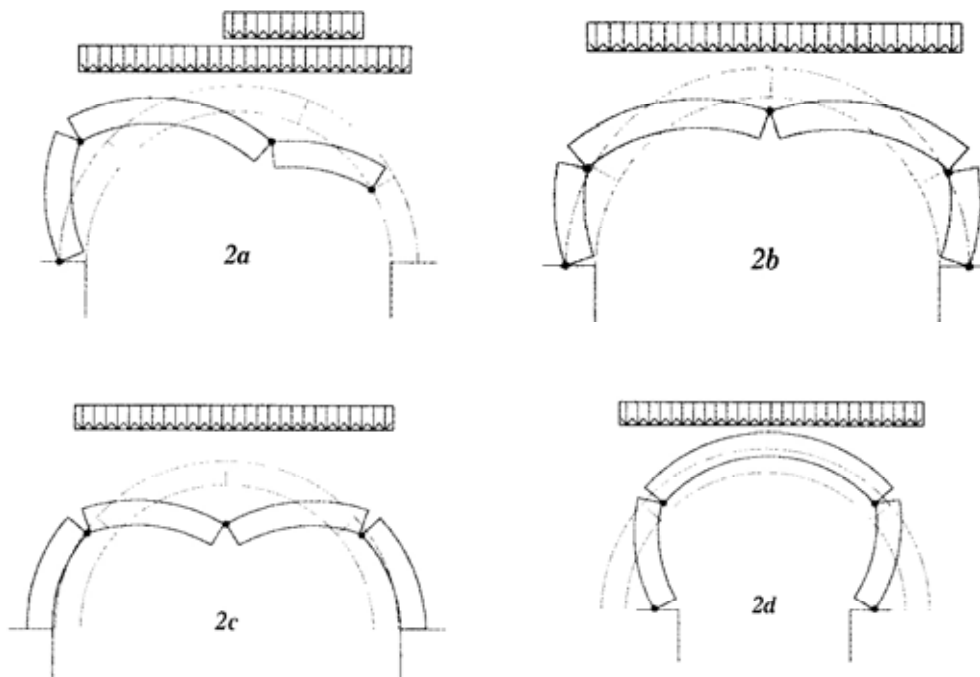
“Va evitato il ricorso a tecniche di placcaggio all'estradosso con realizzazione di controvolte in calcestruzzo o simili, armate o meno [...] gli interventi possibili per ciascuna patologia o forma di vulnerabilità sono generalmente più d'uno, con caratteristiche diverse in termini di efficacia, invasività, reversibilità, durabilità, costi”

O.P.C.M. n. 3274/2003 (→ NTC 2005, 2008, 2011; Linee Guida MiBAC 2007, 2011)

“Gli interventi sulle strutture ad arco o a volta possono essere realizzati con il ricorso alla tradizionale tecnica delle catene [...] non deve essere esclusa a priori la possibilità di realizzare contrafforti o ringrossi murari [...] E' possibile il ricorso a tecniche di placcaggio [...] con fasce di materiale composito. La realizzazione di contro-volte in calcestruzzo o simili, armate o no, è da evitarsi [...]”

“[...] gli elementi strutturali danneggiati devono essere riparati piuttosto che sostituiti e le deformazioni ed alterazioni, costituendo una testimonianza del passato, dovrebbero essere mantenute, adottando misure atte a limitarne gli effetti negativi sulle condizioni di sicurezza”

Prof. Lorenzo Jurina

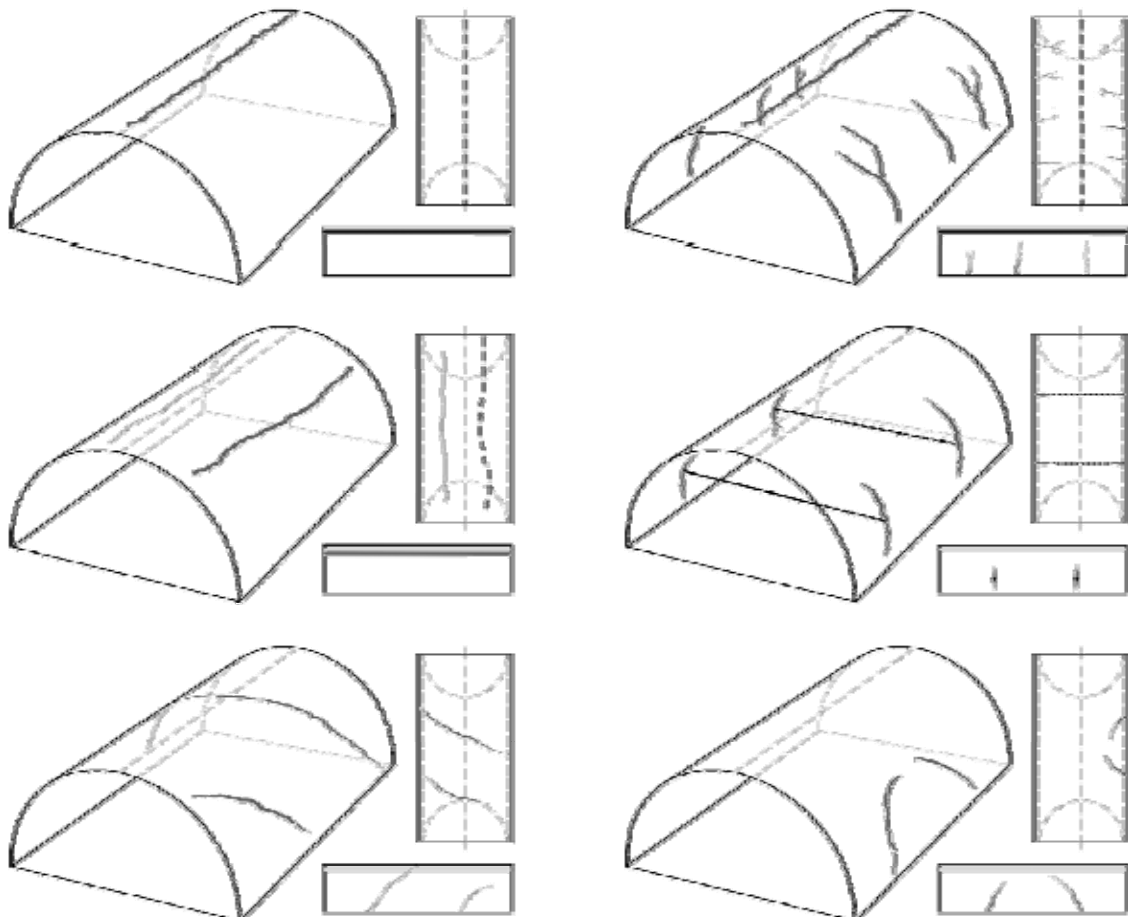


Principali meccanismi di collasso degli archi in muratura dovuto alla formazione di cerniere sotto carichi distribuiti.

Prof. Lorenzo Jurina

PATOLOGIE E DISSESTI

Prof. Lorenzo Jurina



VOLTE A BOTTE: quadri fessurativi tipici

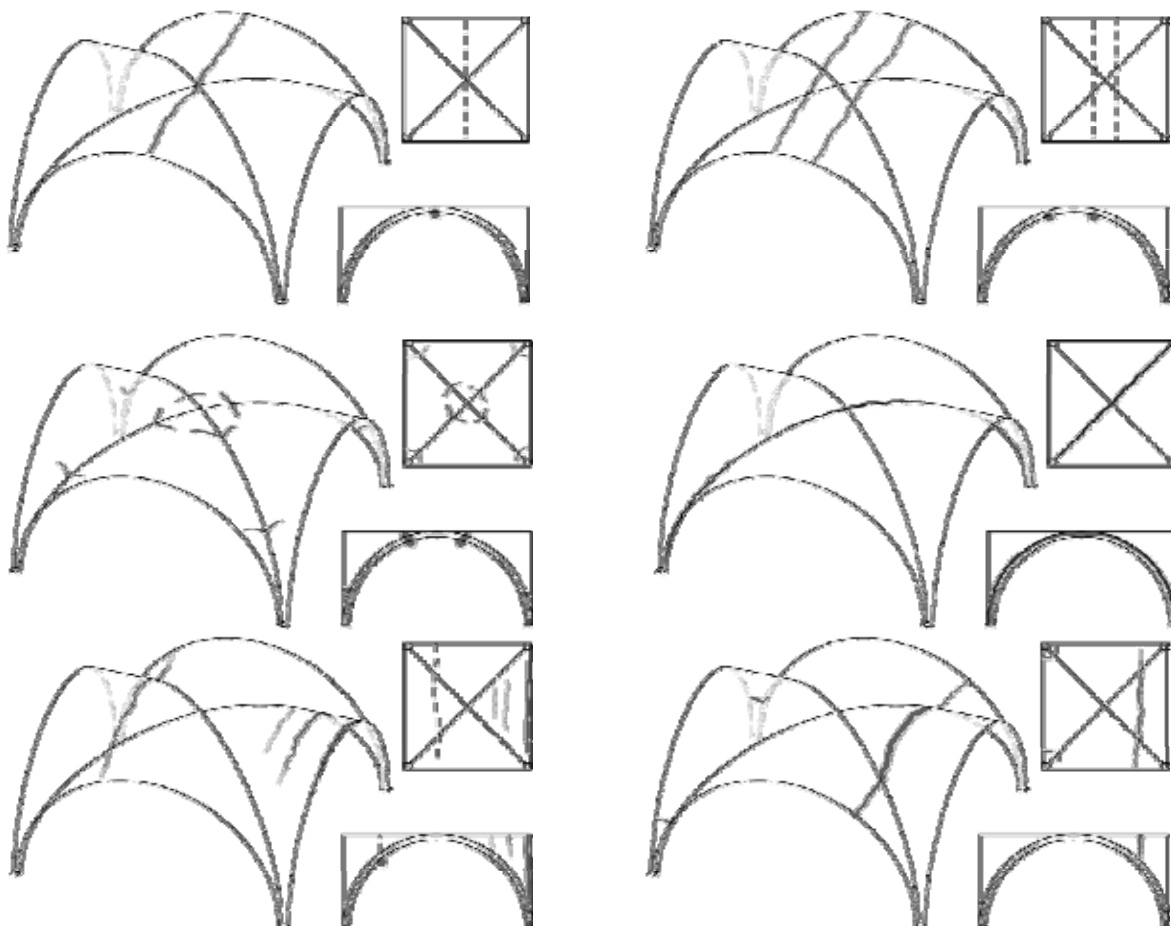
(Jurina+Crivellari-Grassi 2014)

Prof. Lorenzo Jurina



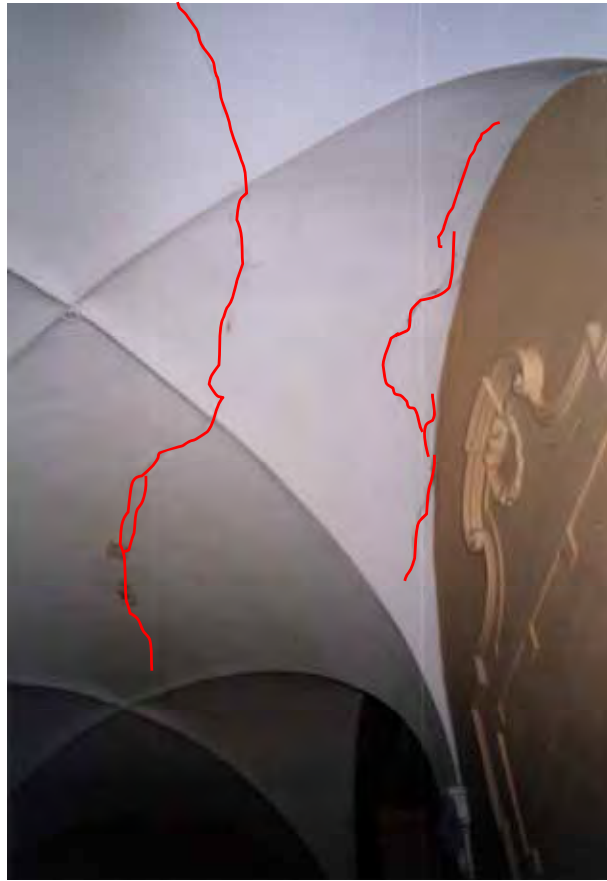
Prof. Lorenzo Jurina

VOLTE A BOTTE: fessurazioni in chiave e diagonali



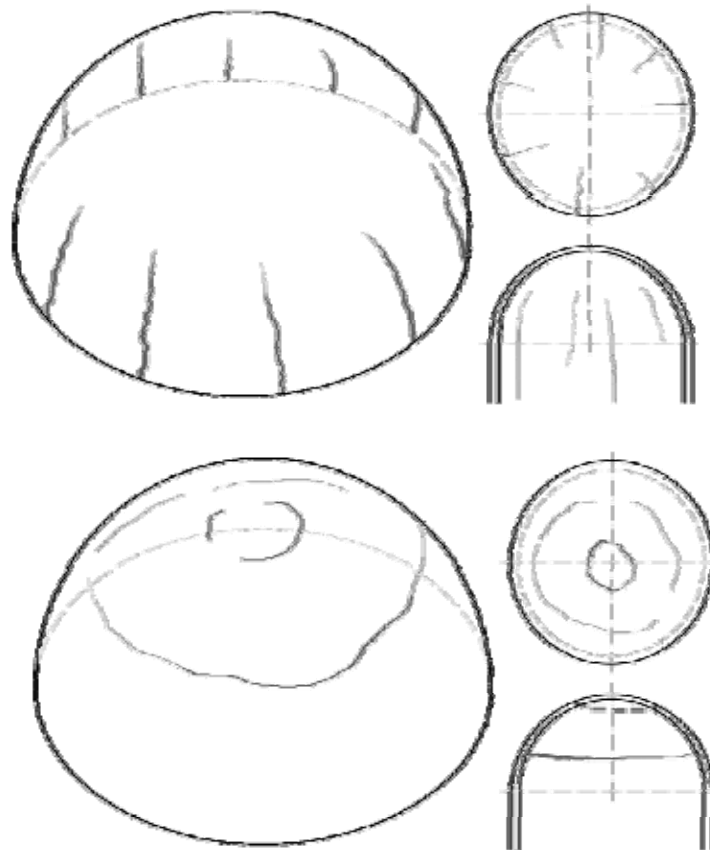
VOLTE A CROCIERA: quadri fessurativi tipici (Jurina+Crivellari-Grassi 2014)

Prof. Lorenzo Jurina



VOLTE A CROCIERA: fessurazioni parallele alle pareti

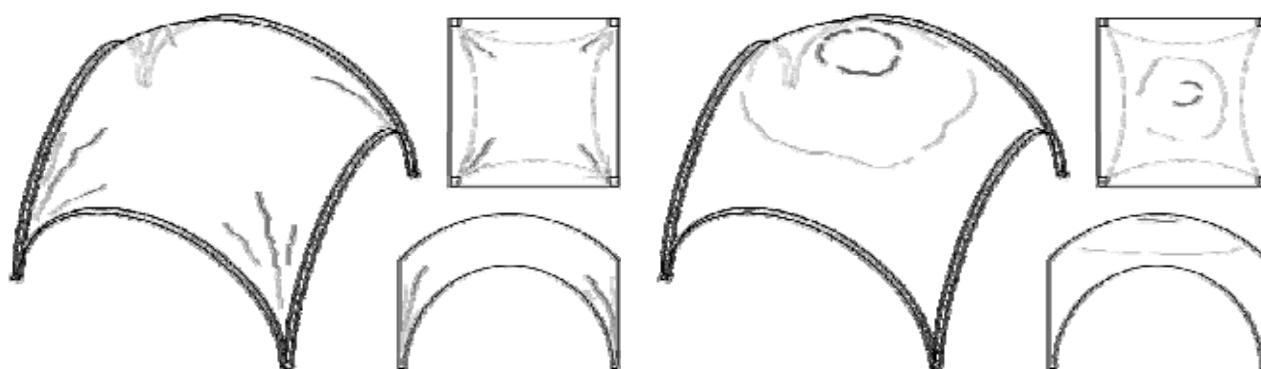
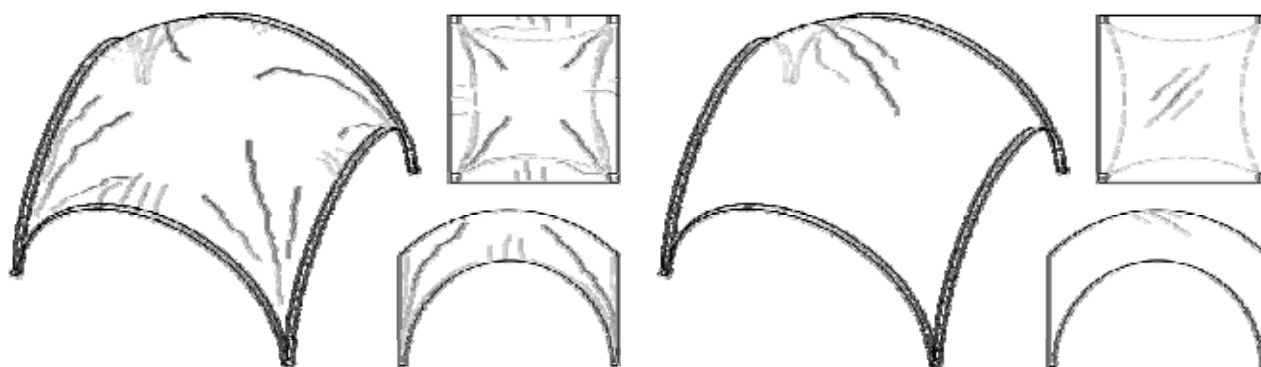
Prof. Lorenzo Jurina



CUPOLE: quadri fessurativi tipici

(Jurina+Crivellari-Grassi 2014)

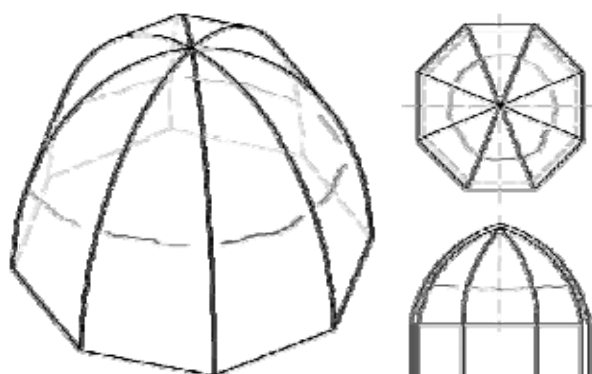
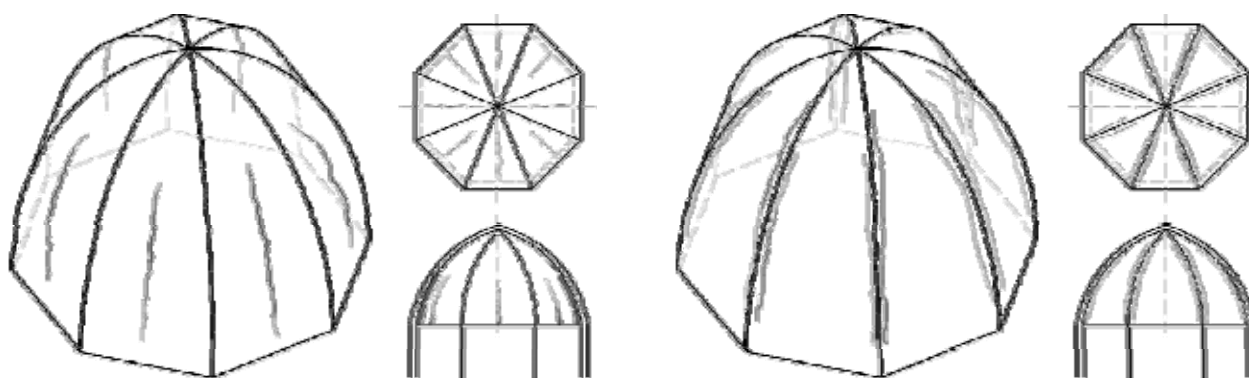
Prof. Lorenzo Jurina



VOLTE A VELA: quadri fessurativi tipici

(Jurina+Crivellari-Grassi 2014)

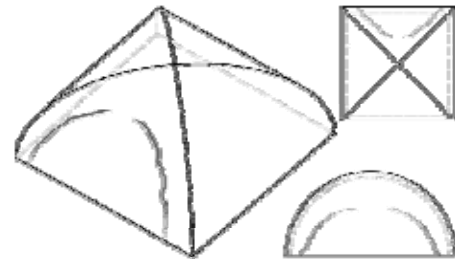
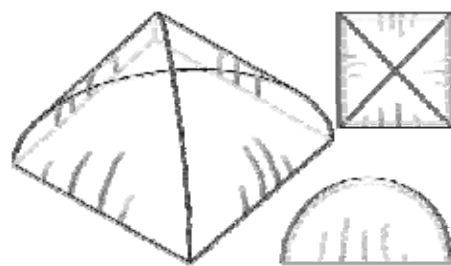
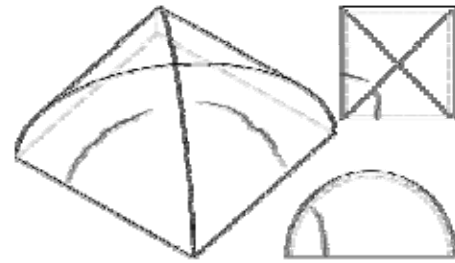
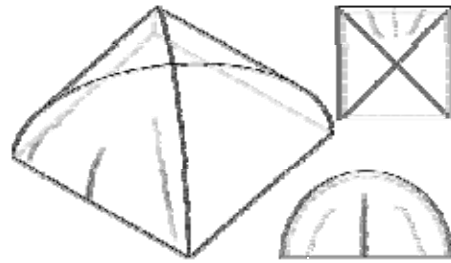
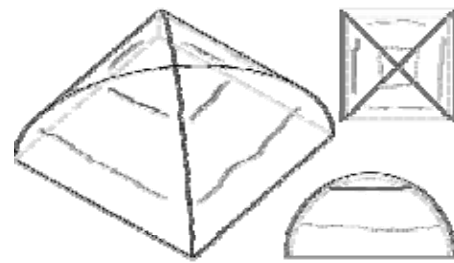
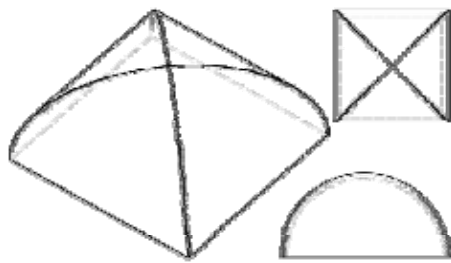
Prof. Lorenzo Jurina



CUPOLE: quadri fessurativi tipici

(Jurina+Crivellari-Grassi 2014)

Prof. Lorenzo Jurina



VOLTE A PADIGLIONE: quadri fessurativi tipici (Jurina+Crivellari-Grassi 2014)

Prof. Lorenzo Jurina



VOLTE A PADIGLIONE: fessurazioni sugli spigoli

Prof. Lorenzo Jurina

CERCHIATURE

Prof. Lorenzo Jurina

CERCHIAGGI ANTICHI



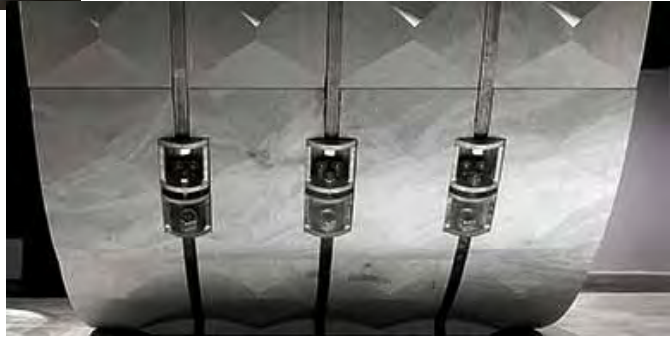
Il sistema costruttivo delle botti rispecchia il funzionamento delle strutture ad arco: tra le singole doghe (equivalente dei conci), inserite con battitura in un anello in ferro, si sviluppano mutue forze di compressione.

Prof. Lorenzo Jurina

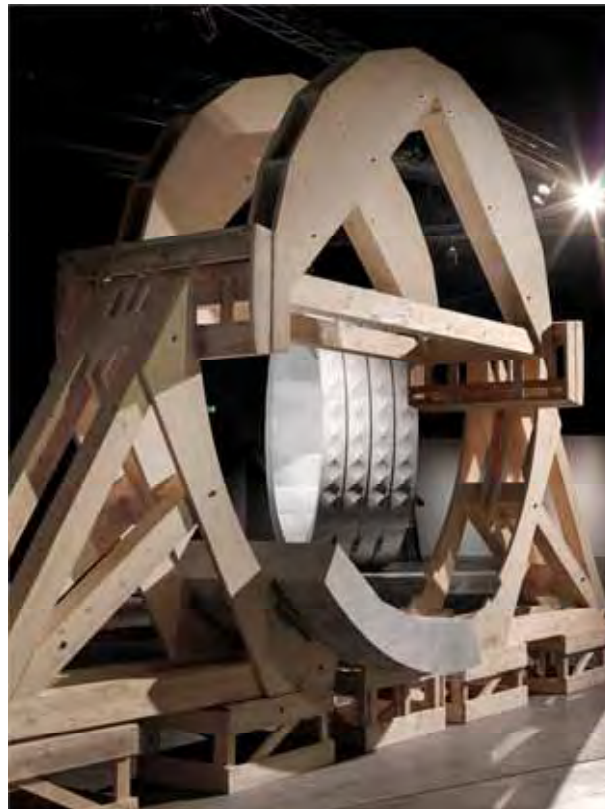


Stone Gate, Marmomac 2012, Verona
R.Galliotto, Lithos Design, L.Jurina

Ruota in marmo di 380 cm di diametro e 30 cm di spessore, costituita dall'assemblaggio di 20 concio, posati a secco e semplicemente accostati, che vengono "forzati" tra loro da 3 cavi circonfenziali post-tesati, i quali impongono una compressione mutua tra concio e concio.



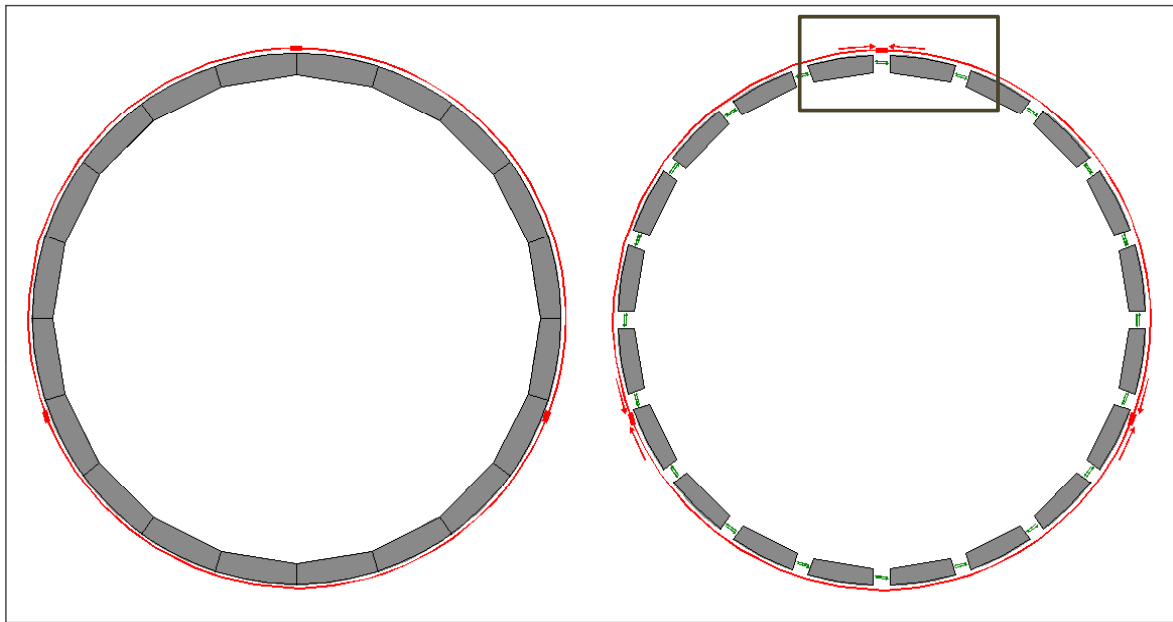
Prof. Lorenzo Jurina



Stone Gate, Marmomac 2012, Verona, R.Galliotto, Lithos Design, L.Jurina

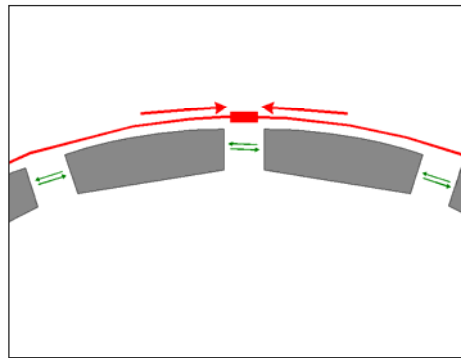
Centina in legno utilizzata per il montaggio

Prof. Lorenzo Jurina

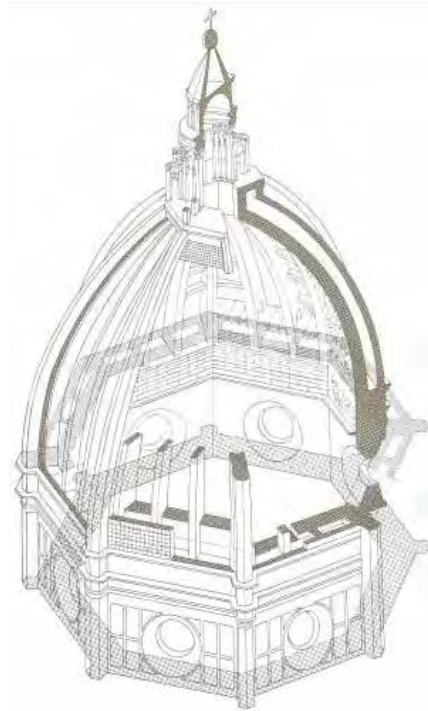
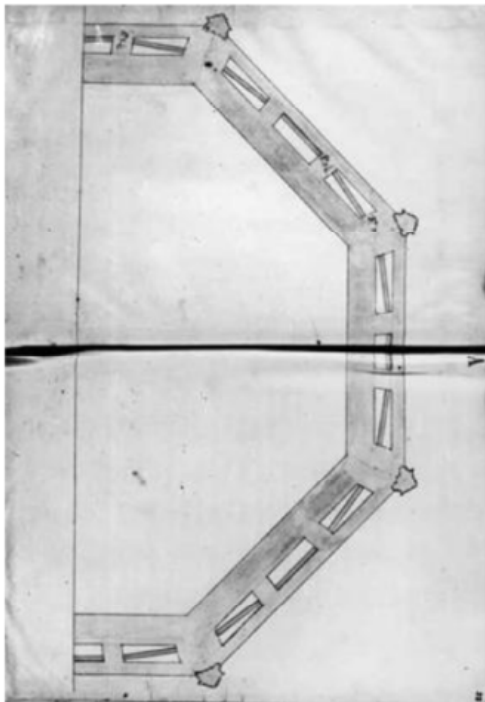


Stone Gate, Marmomac 2012,
Verona, R.Galliotto, Lithos
Design, L.Jurina

Schema di funzionamento del
cerchio con mutua compressione
tra i conci



Prof. Lorenzo Jurina



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.

Santa Maria del Fiore, Firenze, Italia (1420-1436)
Cerchiature in legno previste da Brunelleschi all'interno della
cupola per limitare le deformazioni trasversali

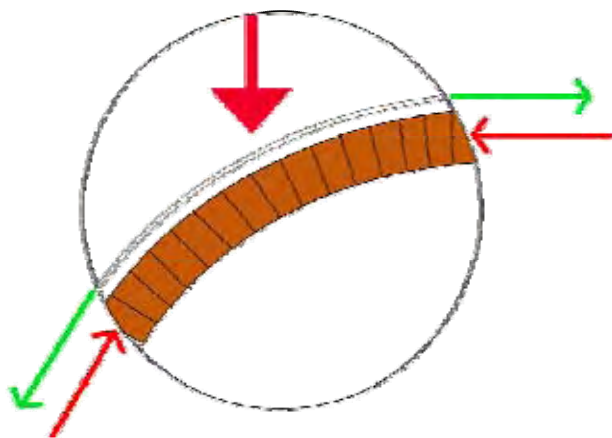
Prof. Lorenzo Jurina



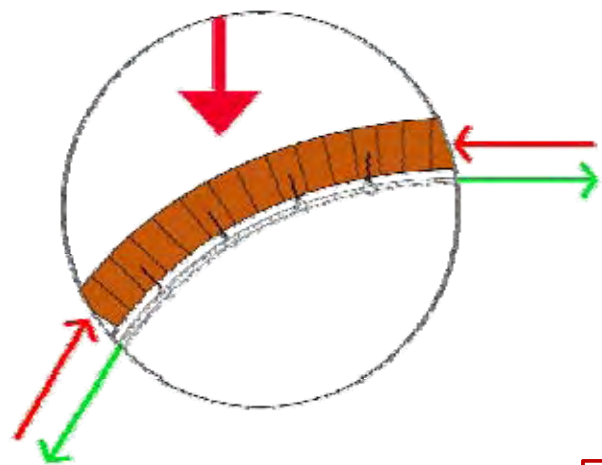
Tecnica dell' "Arco Armato"
 Attraverso una cerchiatura dell'arco modifica i
 carichi applicati
 in modo da rendere staticamente adeguata
 la geometria esistente

Prof. Lorenzo Jurina

L'"arco armato"



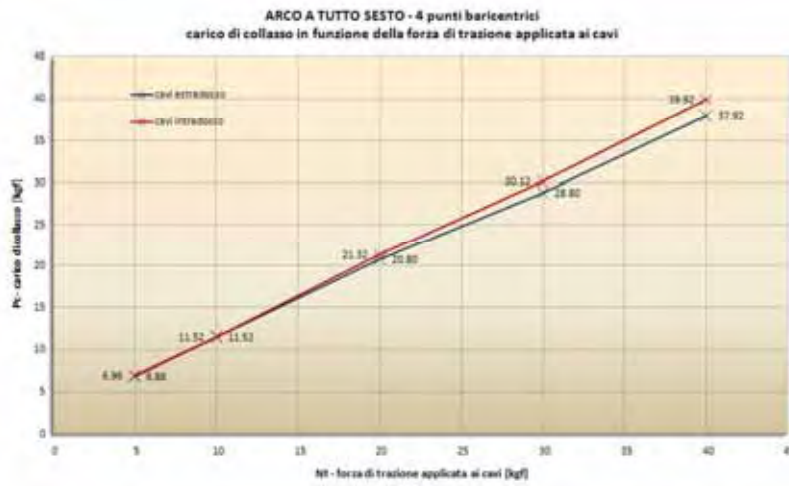
L'"arco armato" estradossale



L'"arco armato" intradossale

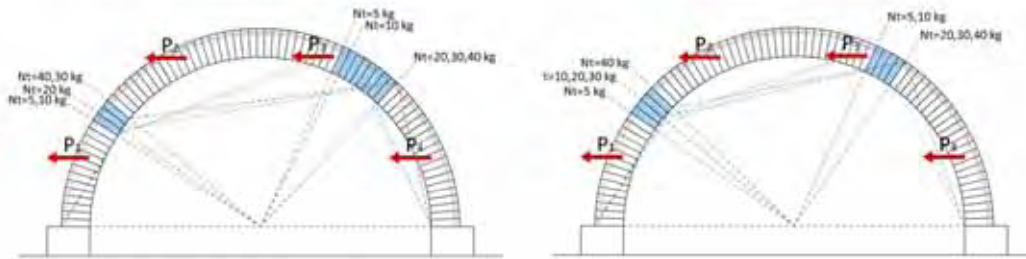
Prof. Lorenzo Jurina

Equilibrio delle forze interne a una sezione di arco
 consolidata con arco armato estradossale e intradossale



ARCO A TUTTO SESTO - 4 punti baricentrici
cavi ESTRADORSO
localizzazione massima in funzione della forza di trazione applicata ai cavi

ARCO A TUTTO SESTO - 4 punti baricentrici
cavi INTRADORSO
localizzazione massima in funzione della forza di trazione applicata ai cavi



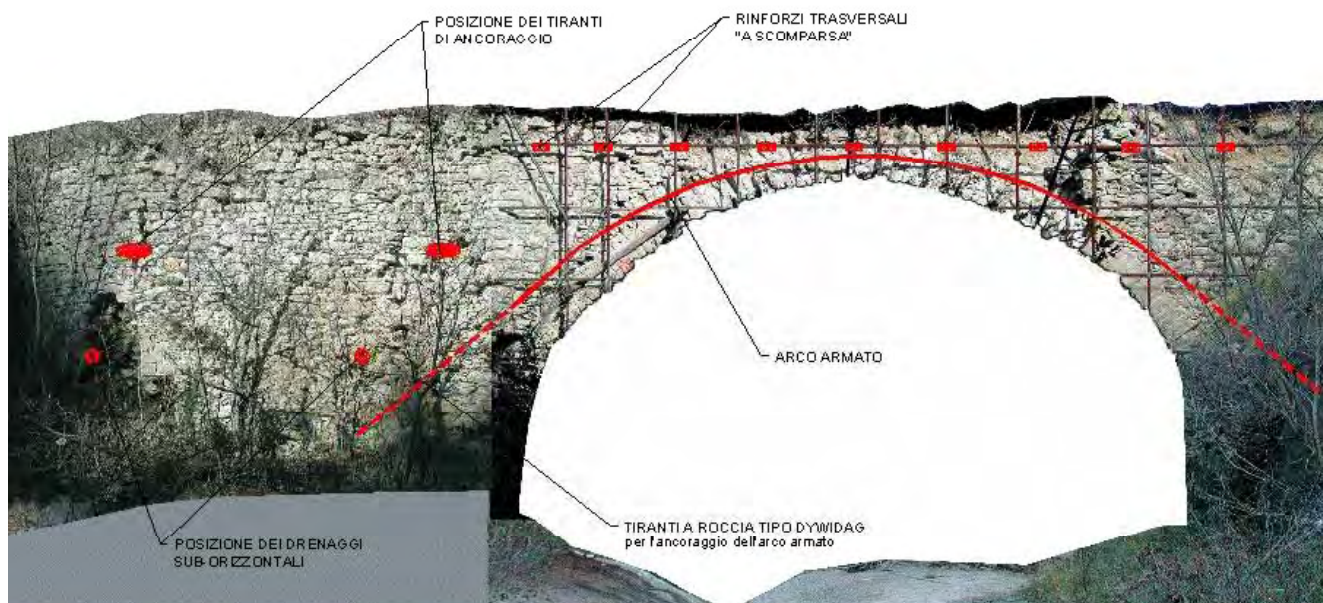
Esiti della sperimentazione su arco armato soggetto a carichi orizzontali.
Incrementando la trazione data ai cavi si aumenta la forza di compressione trasmessa all'arco, e quindi la sua capacità di sopportare i carichi applicati.
(Jurina + Bonfiglioli 2009)

Prof. Lorenzo Jurina

L' "Arco Armato"

APPLICAZIONI

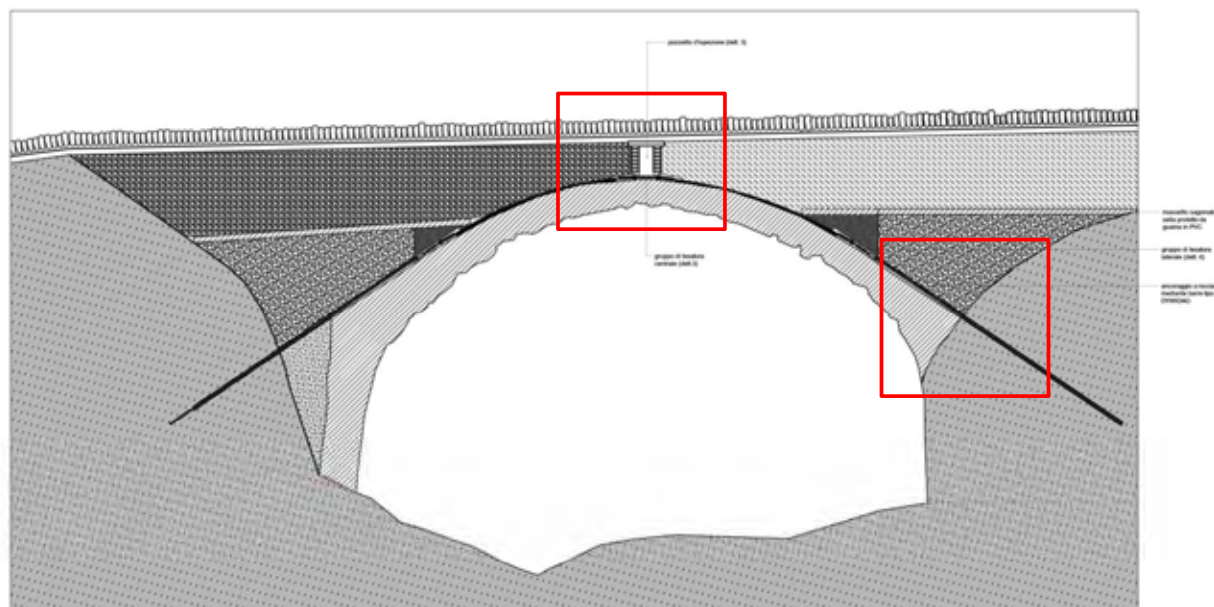
Prof. Lorenzo Jurina



Ponte sul Fiume Uso, Sogliano al Rubicone.

Schema degli interventi di consolidamento statico: arco armato estradossale, tiranti trasversali, stabilizzazione dei piedritti, ripristino del drenaggio delle acque.

Prof. Lorenzo Jurina

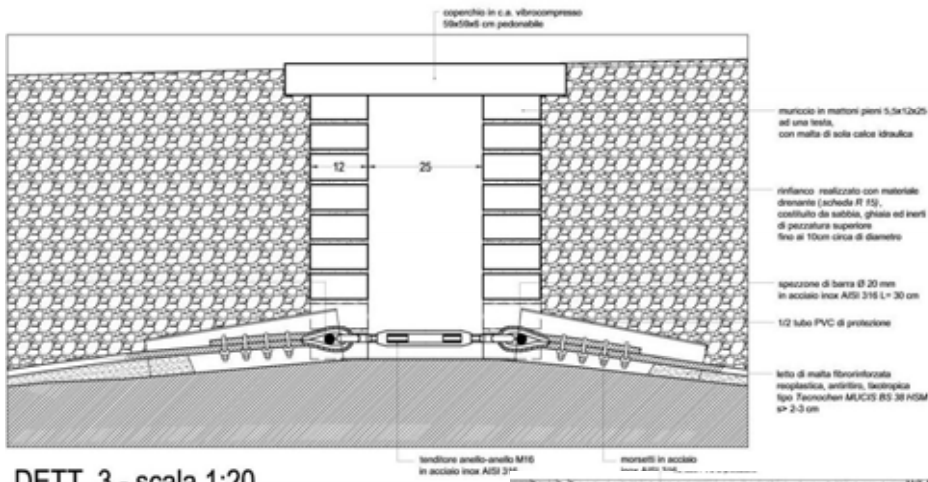


SEZIONE LONGITUDINALE
scala 1:50

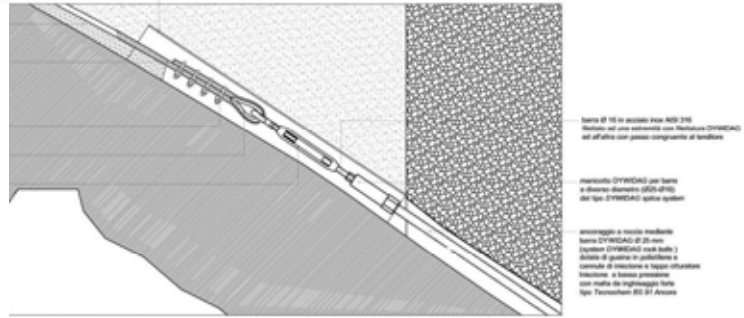
Ponte sul Fiume Uso, Sogliano al Rubicone.

Sezione costruttiva dell'arco armato estradossale.

Prof. Lorenzo Jurina



DETT. 3 - scala 1:20



DETT. 4 - scala 1:20

Ponte sul Fiume Uso, Sogliano al Rubicone.

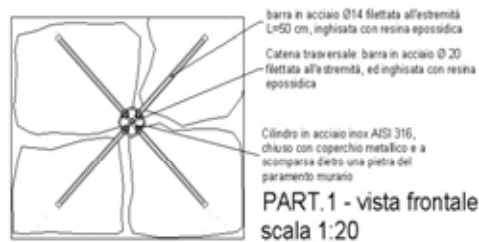
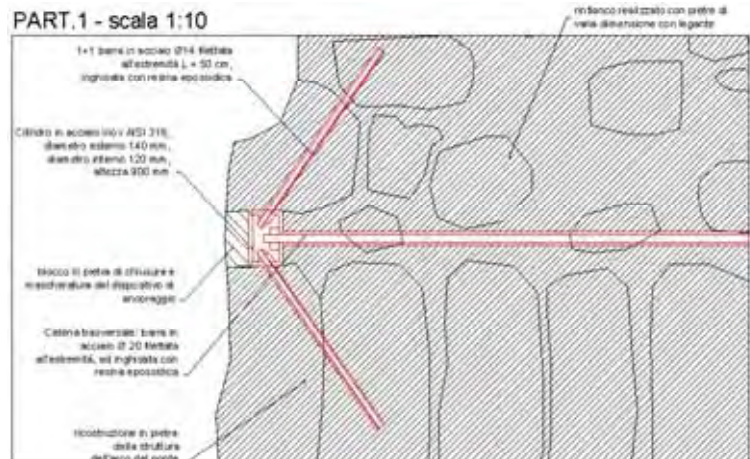
Dettagli costruttivi dell'ancoraggio alle imposte e del pozzetto per l'ispezione del tenditore e il controllo del tiro in chiave

Prof. Lorenzo Jurina

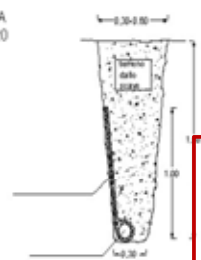
DETTAGLIO DI REALIZZAZIONE DELLA CATENA UNGHIAIA DI RINFORZO TRASVERSALE SEZIONE TRASVERSALE - SCALA 1:50



PART. 1 - scala 1:10



TRINCEA scala 1:20



Prof. Lorenzo Jurina

Ponte sul Fiume Uso, Sogliano al Rubicone.

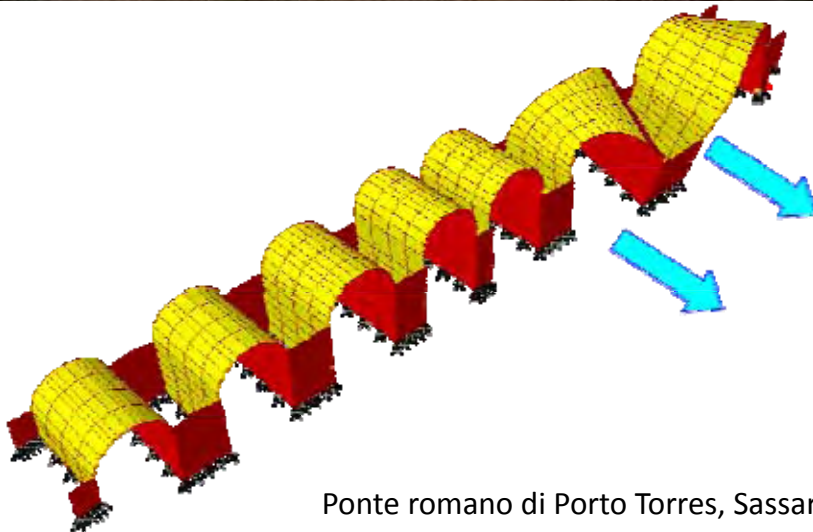
Dettagli dei tiranti trasversali con capochiave a tazza



Ponte sul Fiume Uso, Sogliano al Rubicone.

Realizzazione in chiave dell'arco armato estradossale.

Prof. Lorenzo Jurina



Ponte romano di Porto Torres, Sassari

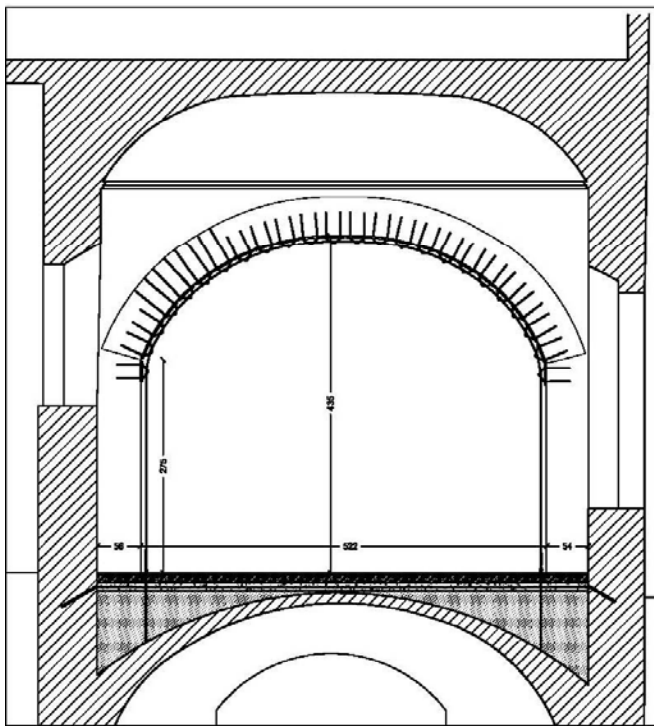
Intervento di rinforzo della spalla e della prima pila del ponte soggette a slittamento.

Prof. Lorenzo Jurina



Chiostro dell'Ex convento di San Cristoforo,
Sede della nuova Provincia, Lodi

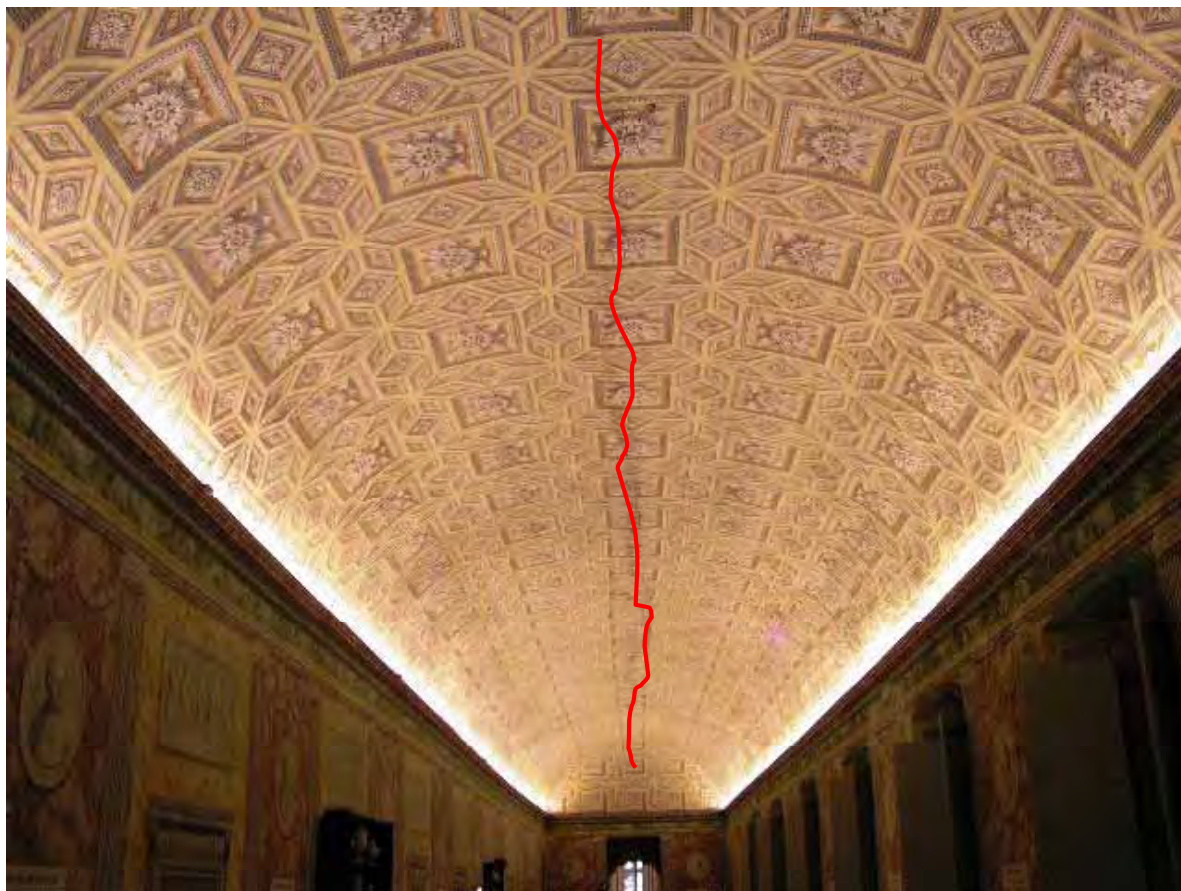
Prof. Lorenzo Jurina



Arco armato intradossale nella Sala del Consiglio

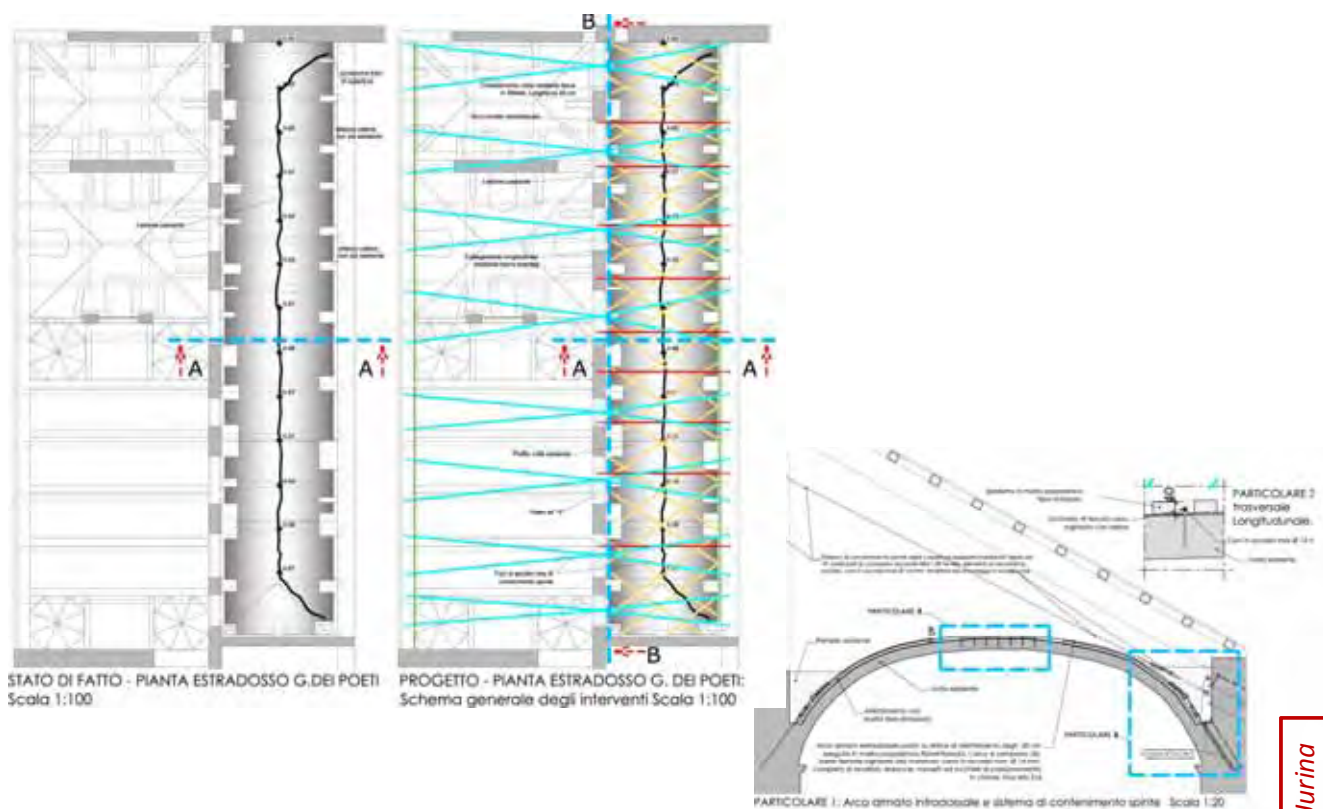
I trefoli in acciaio sono collegati all'arco in muratura mediante piastre in acciaio dotate di barre di inghisaggio. Il collegamento ai piedritti, indispensabile al funzionamento del sistema, avviene con piastre dotate di barre inghisate nel solaio. In prossimità delle imposte sono stati posizionati i tenditori del trefolo.

Prof. Lorenzo Jurina



Galleria dei Poeti, Castello di Masino, Caravino , Torino
 In evidenza la fessura longitudinale della volta a botte.

Prof. Lorenzo Jurina



Interventi estradossali alle volte della Galleria dei Poeti, Castello di Masino:
 Arco armato estradossale sulla volta depresso, fasciature estradossali in fibra di carbonio, tiranti di contenimento delle imposte sostenuti da cavalletti centrali in acciaio.

Prof. Lorenzo Jurina



Prof. Lorenzo Jurina

Interventi estradossali alle volte della Galleria dei Poeti, Castello di Masino
Archi armati estradossali trasversali e fasciature in fibra di carbonio diagonali sulla volta a botte depressa.



Prof. Lorenzo Jurina

Arco armato estradossale alle volte della Galleria dei Poeti, Castello di Masino
La parte centrale del cavo, in corrispondenza della depressione della volta, è stata collegata ai coni con golfari in acciaio.



Prof. Lorenzo Jurina

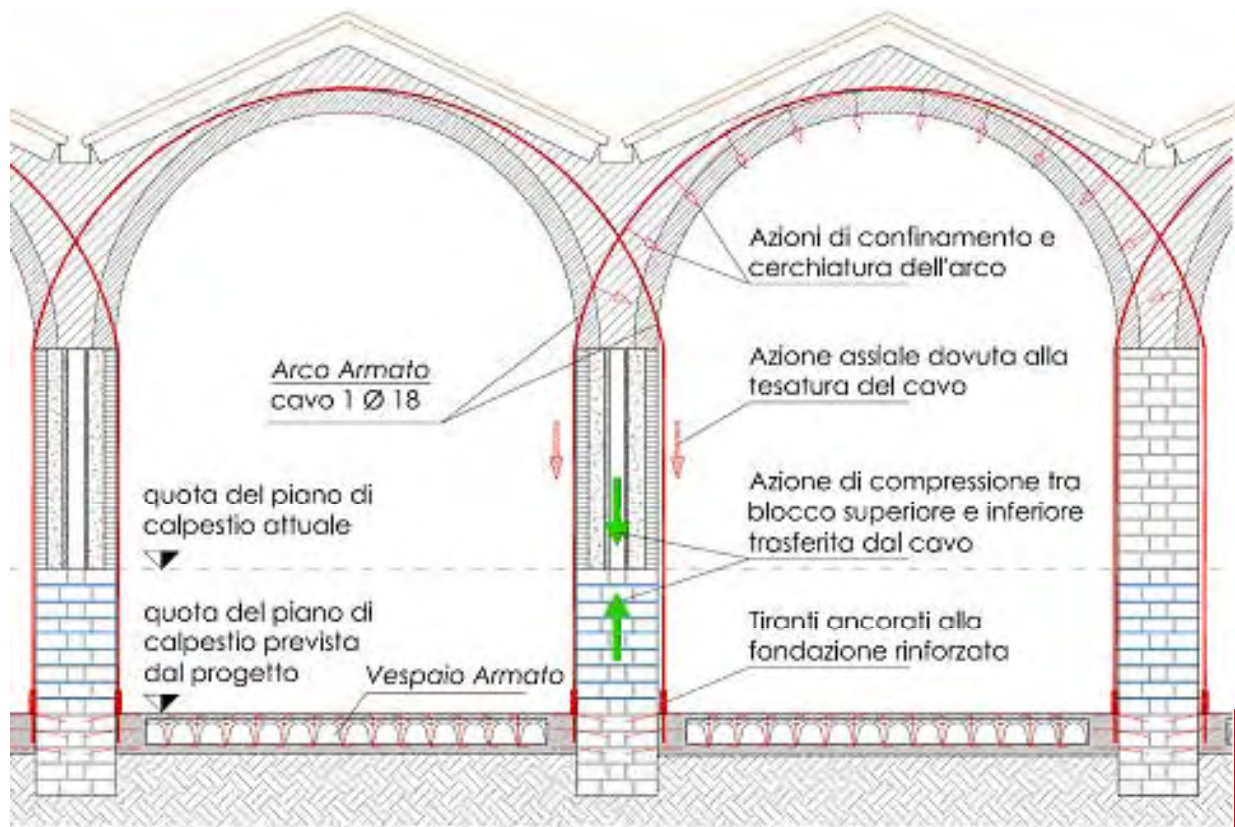
I cavalletti in acciaio posti nella parte centrale del sottotetto della Galleria dei Poeti, Castello di Masino, sospendono trefoli in acciaio fissati alle imposta delle volte con funzione di contenimento.



Prof. Lorenzo Jurina

Santa Casa di Loreto a Tresivio (SO)

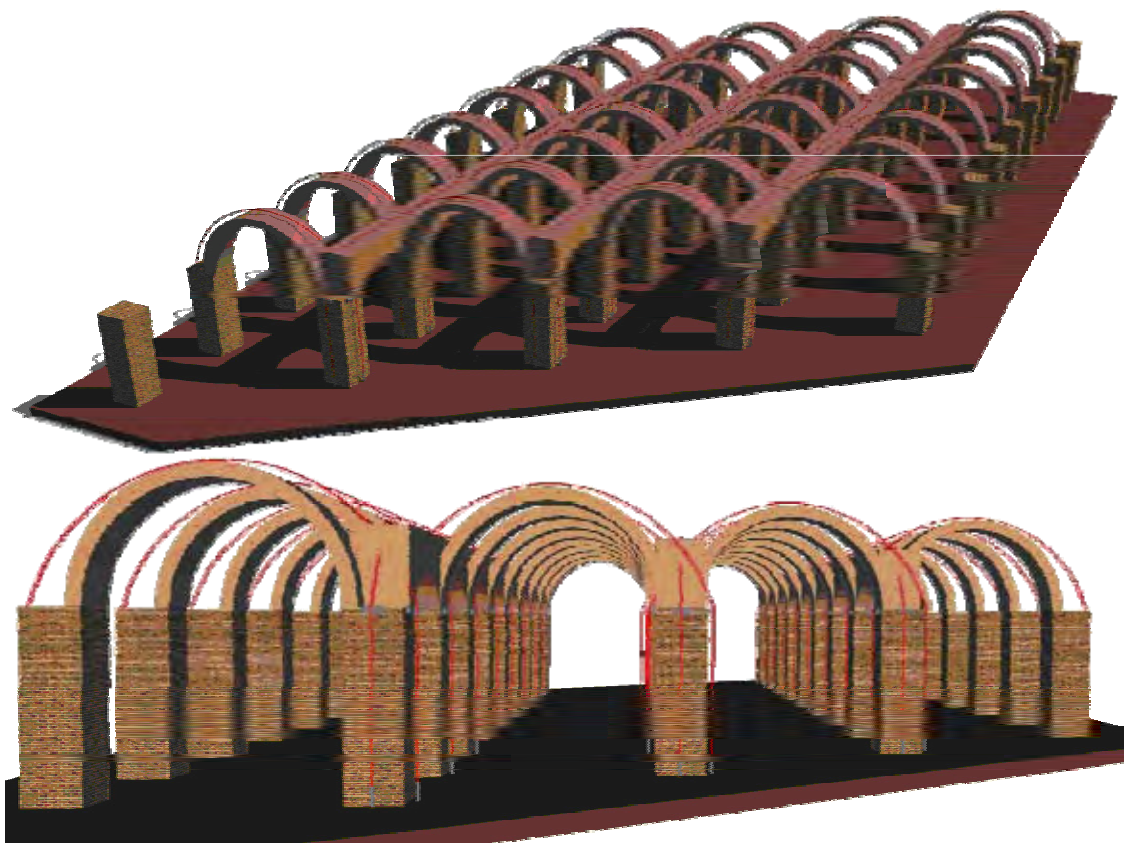
Cerchiatura dell'imposta della cupola nascosta dalla cornice



Proposta di consolidamento dell'Arsenale repubblicano – PISA; (progetto Jurina 2011)

Utilizzo dell'arco armato nelle due direzioni trasversali per il contenimento degli archi isolati.

Prof. Lorenzo Jurina



Proposta di consolidamento dell'Arsenale repubblicano – PISA; (progetto Jurina 2011)

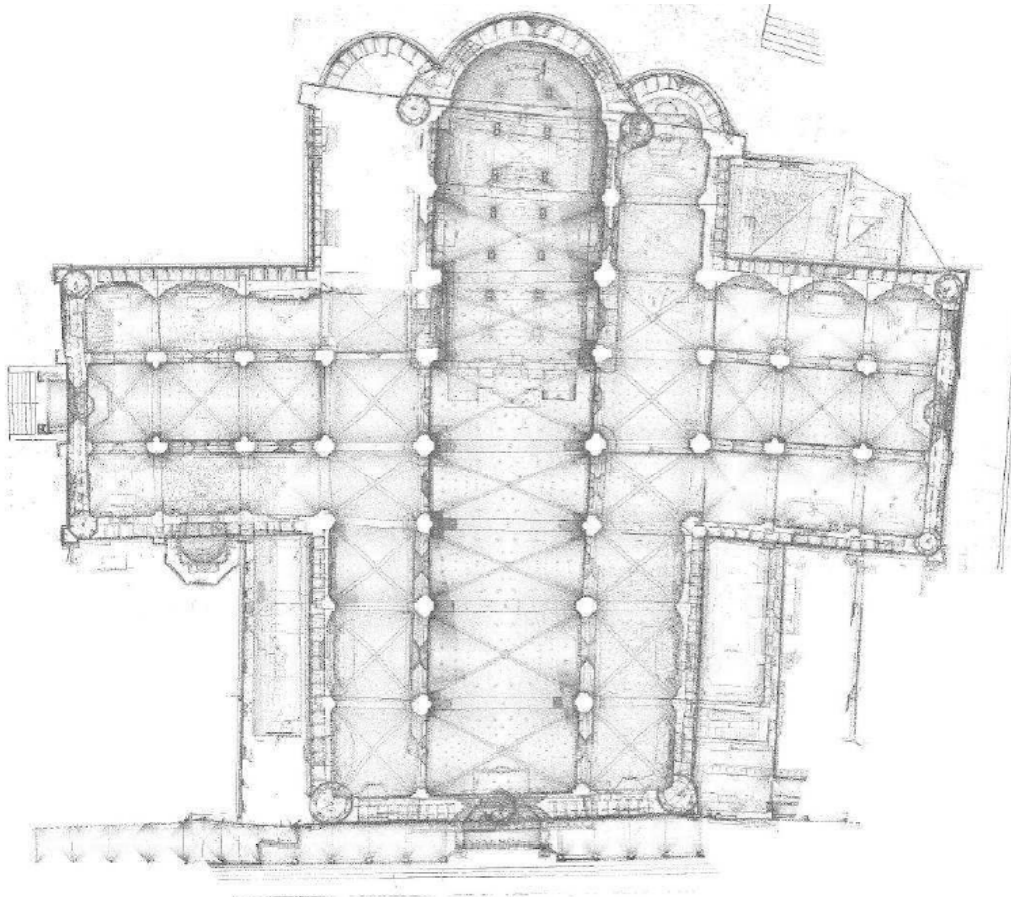
Utilizzo dell'arco armato nelle due direzioni trasversali per il contenimento degli archi isolati.

Prof. Lorenzo Jurina



Duomo di Cremona

Prof. Lorenzo Jurina



Pianta ottenuta da rilievo laser scanner del Duomo di Cremona

Prof. Lorenzo Jurina

RISULTATI DELLA CAMPAGNA DIAGNOSTICA E DELL'ANALISI NUMERICA
SUL DUOMO DI CREMONA:

- ECCESSIVA SPINTA DEGLI ARCHI DELLA NAVATA CENTRALE CHE INDUCE FORTE SOLLECITAZIONI ALLA BASE DELLE COLONNE
- SCARSA RESISTENZA A SOLLECITAZIONI ORIZZONTALI
- ELEVATE SOLLECITAZIONI NEI COSTOLONI DELLE VOLTE DELLA NAVATA CENTRALE



IL DUOMO SOFFRE



**E' NECESSARIO UN INTERVENTO
DI CONSOLIDAMENTO**

Prof. Lorenzo Jurina

RIMEDI PROPOSTI PER IL DUOMO DI CREMONA:

- ECCESSIVA SPINTA DEGLI ARCHI DELLA NAVATA CENTRALE CHE INDUCE FORTE SOLLECITAZIONI ALLA BASE DELLE COLONNE

SOLUZIONE: **"PUNTELLO" ALLE IMPOSTE**
(non potendo inserire una catena alle imposte)

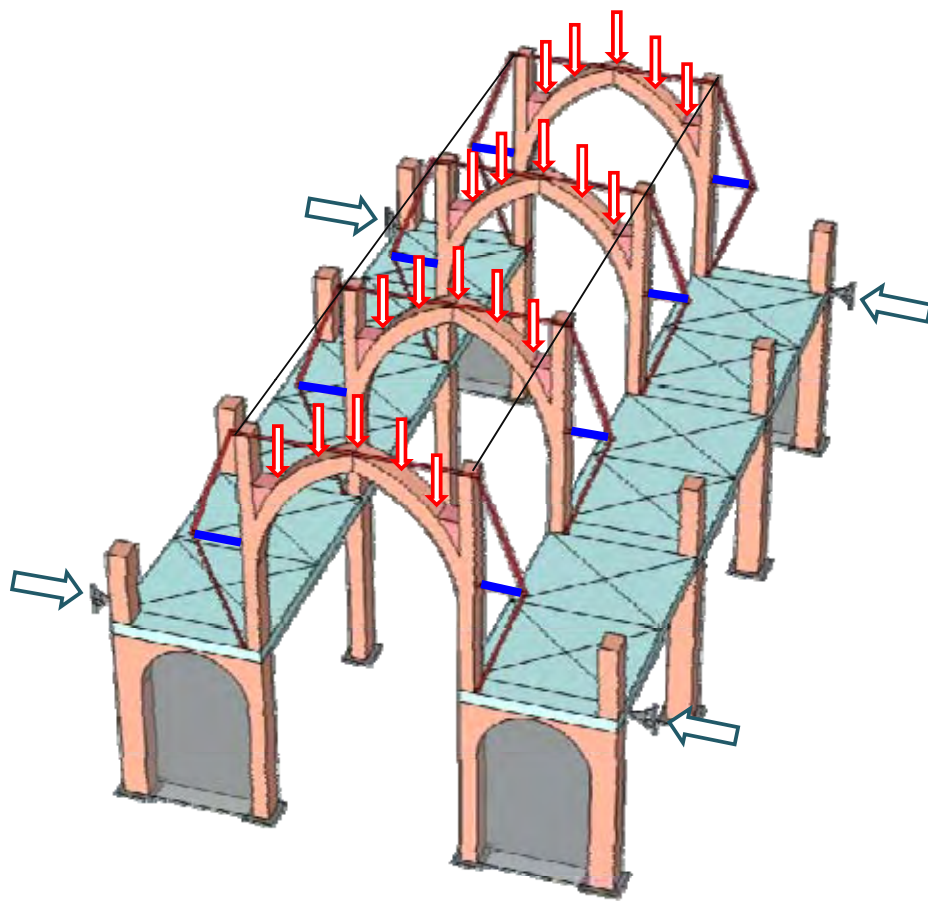
- SCARSA RESISTENZA A SOLLECITAZIONI ORIZZONTALI

SOLUZIONE: **TRAVE "TRALICCIO" (matronei)**
+ FALDE "DIAFRAMMA" (coperture)

- ELEVATE SOLLECITAZIONI NEI COSTOLONI DELLE VOLTE DELLA NAVATA CENTRALE E NAVATE LATERALI

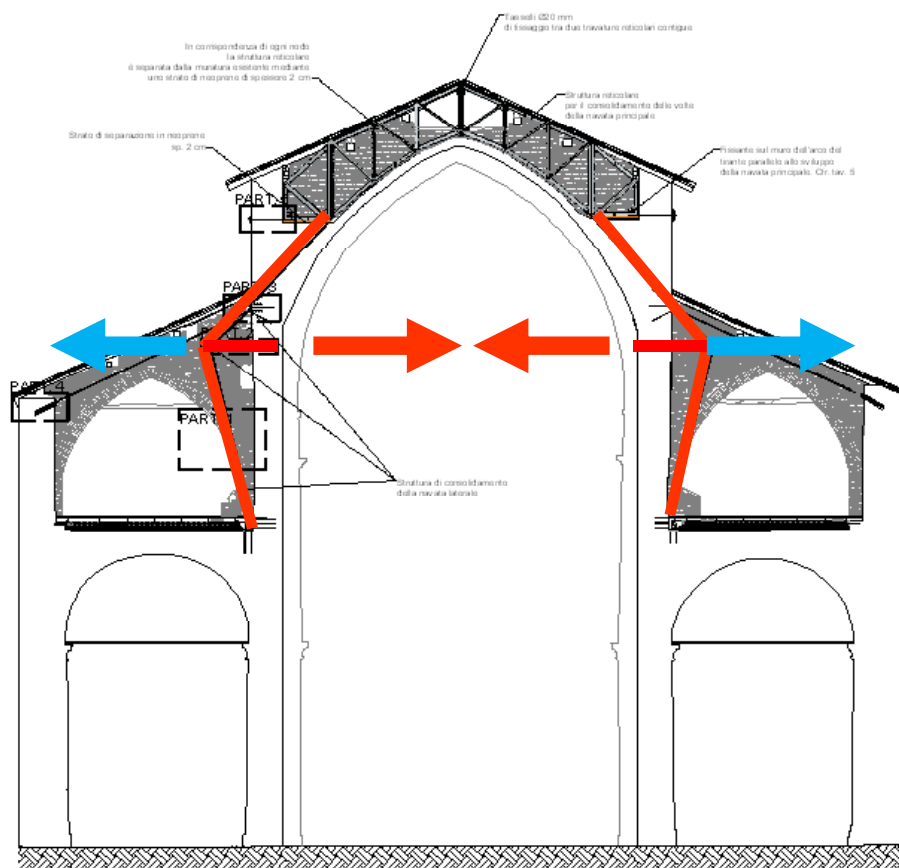
SOLUZIONE: **"ARCO ARMATO" E "GRAFFETTE"**

Prof. Lorenzo Jurina



Visione tridimensionale degli interventi pensati per il Duomo di Cremona (Progetto Jurina – 2009-2012)

Prof. Lorenzo Jurina



Sezione di intervento dell'arco armato estradossale alle volte della navata centrale del Duomo, dotato di puntello per compensare le spinte laterali.

Prof. Lorenzo Jurina