

# **INCREMENTO DELLA SISMORESISTENZA DEI VECCHI EDIFICI**

*Natale Gucci*  
*Dipartimento di Ingegneria Civile – Università di Pisa*

**C.I.A.S. Riabilitazione del costruito e Adeguamento sismico**  
Firenze 11 Marzo 2010

## LA PROGETTAZIONE È UNA “CONCEZIONE VERIFICATA”

oggi come ieri

**ieri:** la verifica era implicita nelle “*buone regole del costruire*”  
cui il progettista si atteneva  
non sussisteva quindi un processo iterativo fra la concezione e  
la sua verifica

**oggi:** la verifica avviene con *modellazioni a tavolino*  
(le relazioni di calcolo), ciò comporta:  
- un processo interattivo fra le diverse prerogative (cui oggi  
corrispondono le specializzazioni)  
- un processo iterativo (vai e vieni) fra concezione e sua verifica

Ogni processo che spezzi il progetto in fasi disposte in cascata impedisce l'iterazione fra concezione e sua verifica risultando così dannoso non solo per la qualità, ma anche per il costo delle costruzioni

Gli edifici storici possono ritenersi frutto di una progettazione quando hanno avuto una concezione unitaria iniziale e conseguono a un progetto predefinito, quando si tratta cioè di “palazzi”.

Più frequentemente ci troviamo a trattare costruzioni frutto di aggregazioni e rifacimenti di edifici più antichi.

In tali casi non si può nemmeno parlare di processi di progettazione, ma piuttosto di eventi edilizi che sfruttano la grande adattabilità della costruzione muraria.

Molto spesso i nostri interventi si possono addirittura annoverare fra questi.

Con criterio scientifico, vogliamo però inserire il nostro operato in una logica articolata e compiuta propria dei nostri tempi.

Sarebbe quindi un errore non adattare a questi casi il processo di progettazione più opportuno per le nuove costruzioni cioè una concezione verificata in modo interattivo fra le diverse prerogative e con processo iterativo, di vai e vieni fra concezione e verifica dei vari aspetti.

Occorrerebbe un progettista-artigiano capace di gestire in modo compiuto i diversi aspetti della costruzione, forte di una preparazione che sia completa sia sul piano delle tecniche che su quello della cultura necessaria per la loro applicazione consapevole. Ciò oggi è più difficile che in passato non tanto perché lo stato dell'arte è più vasto e più articolato ma perché le nostre menti sono ingessate dalla cultura della “specializzazione trasversale”.

Di qui l'importanza della formazione di operatori completi corrispondenti a quelli che in passato hanno prodotto e portato fino a noi le opere che tanto apprezziamo.

Cosa ancora possibile per gli edifici (impossibile per gli aerei) perché l'incremento delle conoscenze è compensato dalle disponibilità per applicarle a oggetti che sono sempre quelli che gli antichi gestivano in prima persona con “specializzazioni per obiettivi”, cioè l'artigianato del rinascimento o la cultura della Scuola di Alessandria.

Oggi la comprensione dei funzionamenti statici e termofisici può essere aiutata dai progressi che le modellazioni, implementate su computer, stanno facendo anche nel campo degli edifici storici. Ma soltanto aiutata, non surrogata: il processo della conoscenza deve rimanere ancora quello dell'osservazione e della meditazione di quanto osservato per acquisire la percezione della realtà. I calcoli sono soltanto un aiuto in questo processo, non un nuovo modo di pensare e di operare.

E' questo un aspetto del principio basilare della conservazione da caldeggiare: "fra i beni da conservare il primo e più importante è l'estratto delle culture che hanno accompagnato le opere che curiamo amandole"; e, se questo non lo si fa, si mantiene il prodotto, ma si distrugge la fabbrica che è stata capace di produrlo.

Ritengo che il ruolo principale degli incontri come questo consista nella formazione di operatori completi "con il frigorifero pieno e capaci di far cucina". Se i due ruoli si scindono si generano due monchi sempre incapaci di fare ciò che, invece, uno con due mani è in grado di fare.

La cultura umanistica stimola la ricerca tecnica e le conoscenze tecniche consentono la scelta delle applicazioni più appropriate.

Nelle more e con la speranza che questo avvenga molto più vantaggiosamente in singole menti, si possono costruire fin da ora staff completi e armonizzati da un linguaggio comune conseguente a conoscenze di base di ampio spettro.

Vi sono concetti basilari di comune accezione che dovrebbero essere conosciuti e guidare tutti i componenti di uno staff di progettazione; per le prerogative di sismoresistenza potrebbero essere riassunti come segue, mentre altrettanti criteri potrebbero essere compendati per gli aspetti termofisici o acustici, e i criteri di conservazione dovrebbero essere ispirati alla vera conservazione delle opere e non del loro degrado: fare cioè restauro come in passato e non costoso abbandono come usa oggi.

## **PRINCIPI BASILARI PER IL MIGLIORAMENTO DELLA SISMORESISTENZA**

- 1 - evitare incrementi di pesi, specialmente in alto,
- 2 - favorire il "comportamento scatolare",
- 3 - curare che le forze di massa siano trasferite al terreno dagli stessi elementi che le generano,
- 4 - rispettare la congruenza fra interventi rinforzanti e parti rinforzate, non solo in campo elastico, ma anche in campo post-elastico e con degrado,
- 5 - evitare disomogeneità in termini di massa, resistenza e rigidità, cioè potenziali "arieti" in caso di scuotimento,
- 6 - tenere conto delle diverse deformabilità termiche,
- 7 - non modificare la risposta dinamica quando la costruzione ha dimostrato di favorire il disaccoppiamento con l'eccitazione verificatasi in sismi precedenti; in tali casi migliorare la sismoresistenza con interventi che aumentino i limiti di deformabilità e di duttilità senza alterare le frequenze proprie, cioè senza modificare la rigidità,
- 8 - considerare che gli effetti del danneggiamento modificano la risposta dinamica aumentando la deformabilità e lo smorzamento; ciò è favorevole solo se la deformabilità iniziale originava frequenze proprie inferiori a quelle dominanti nell'eccitazione; in caso contrario viene incrementato l'effetto del sisma sulla costruzione già degradata.

## **ESEMPI**

*Si tratta di interventi in qualche modo significativi tratti dall'esperienza personale*

- 1 – campanile di Castelnuovo Garfagnana
- 2 – campanile di Buti
- 3 – Teatro Rossi di Pisa
- 4 – la Pieve di S.Stefano di Sorano a Filattiera (MS)

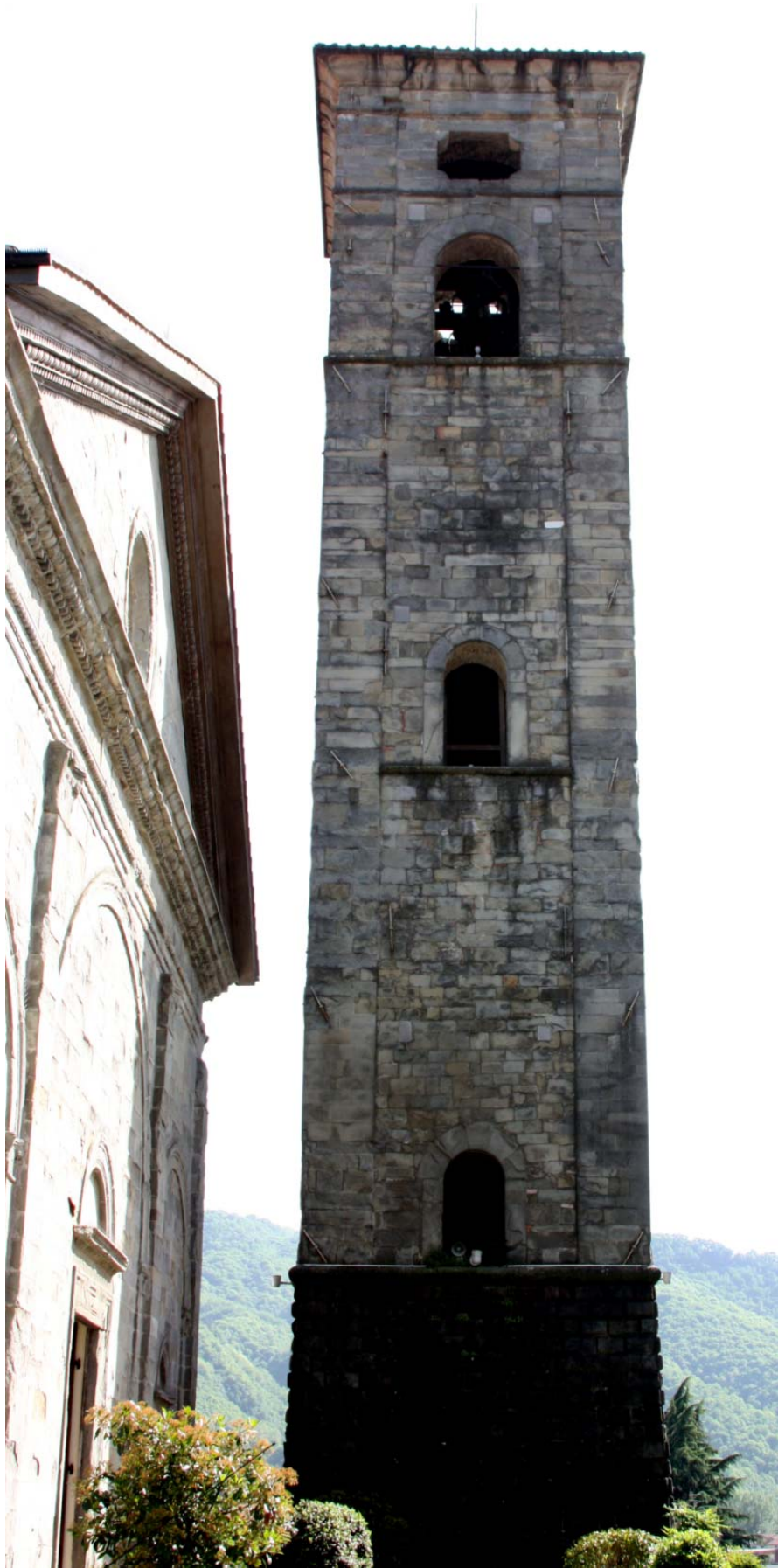
## Campanili di Castelnuovo Garfagnana e di Buti

L'intervento è stato concepito per migliorare la sismoresistenza del campanile in modo affatto invasivo, senza alterare la rigidità e senza modificare l'entità e la distribuzione delle masse. In altri termini, si è cercato di aumentare i limiti di resistenza dell'edificio senza variare la sua risposta dinamica, dimostratasi buona alla prova dei passati scuotimenti sismici del sito. A tale scopo è stata progettata una nuova scala, peraltro di per sé necessaria nell'intervento di manutenzione straordinaria, con ripiani reticolari d'acciaio collegati alle pareti e funzionanti anche da diaframmi orizzontali rigidi nel proprio piano. Questi diaframmi sono stati congiunti in senso verticale tramite esili cantonali, a partire dal piano più basso.

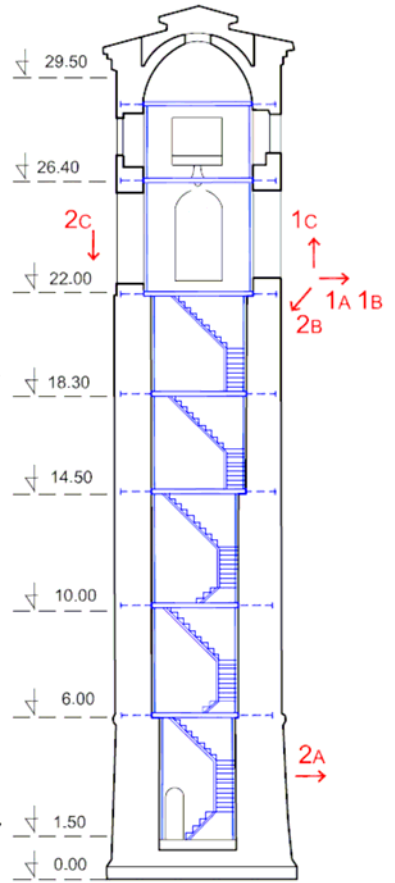
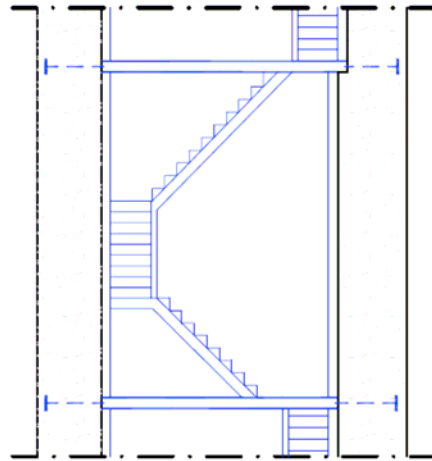
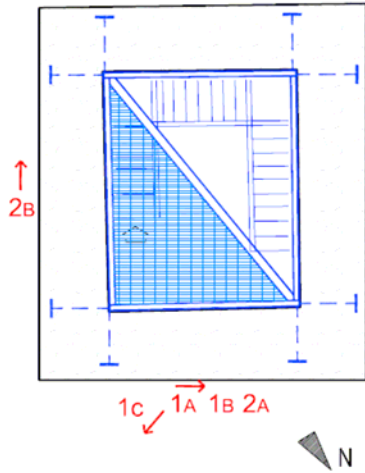
Al complesso diaframmi-cantonali è stata perciò conferita la funzione di "armare" lo scatolare in muratura cosicché, sotto l'effetto di azioni orizzontali di forte intensità, sia possibile l'instaurarsi di un meccanismo a "traliccio di Morsch": in tal caso la resistenza della struttura permane per scuotimenti maggiori di quelli che generano la sconnessione della muratura con lesioni verticali, ciò senza apprezzabile modifica della deformabilità.

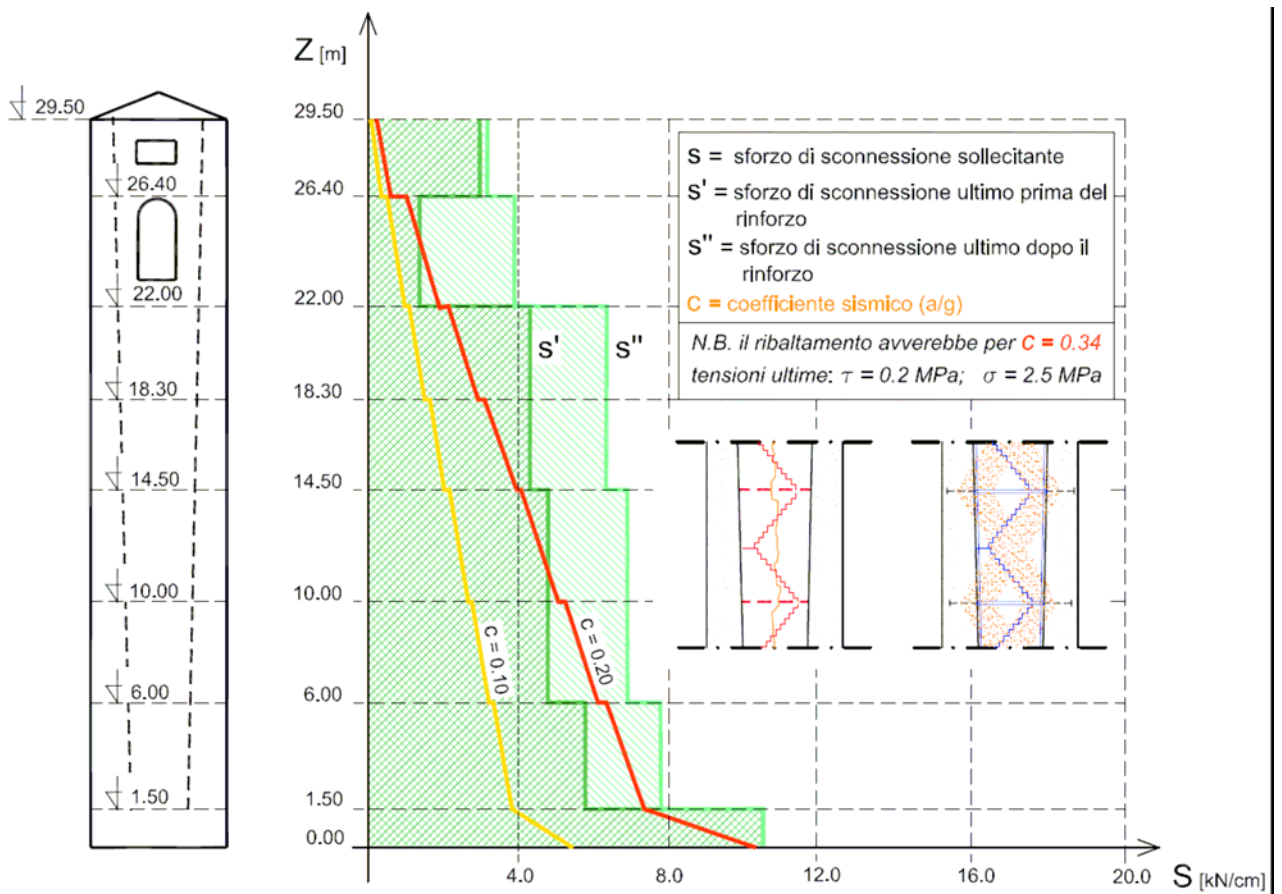
### Campanile di Castelnuovo Garfagnana



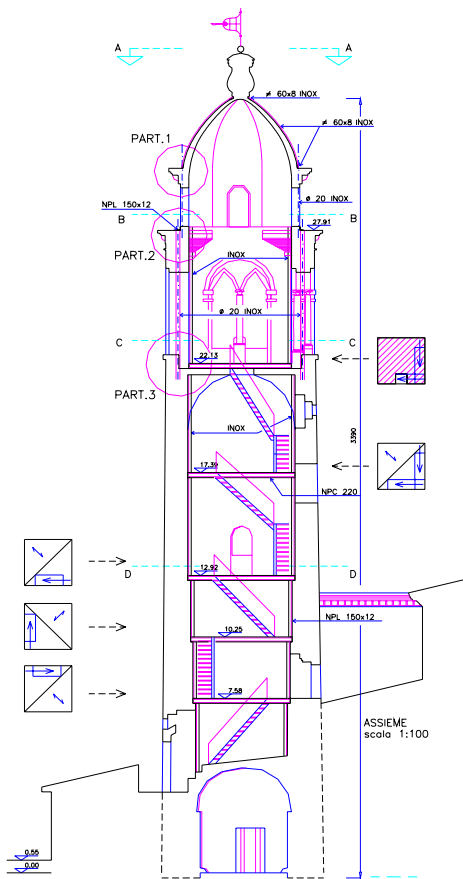


accelerometri  $\nearrow 2c$

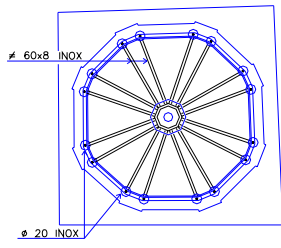




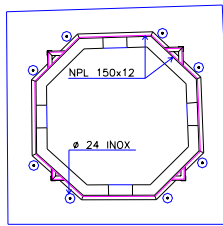
# Campanile di Buti



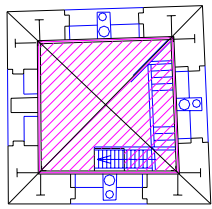




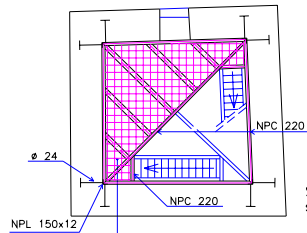
VISTA A-A  
scala 1:100



SEZ. B-B  
scala 1:100



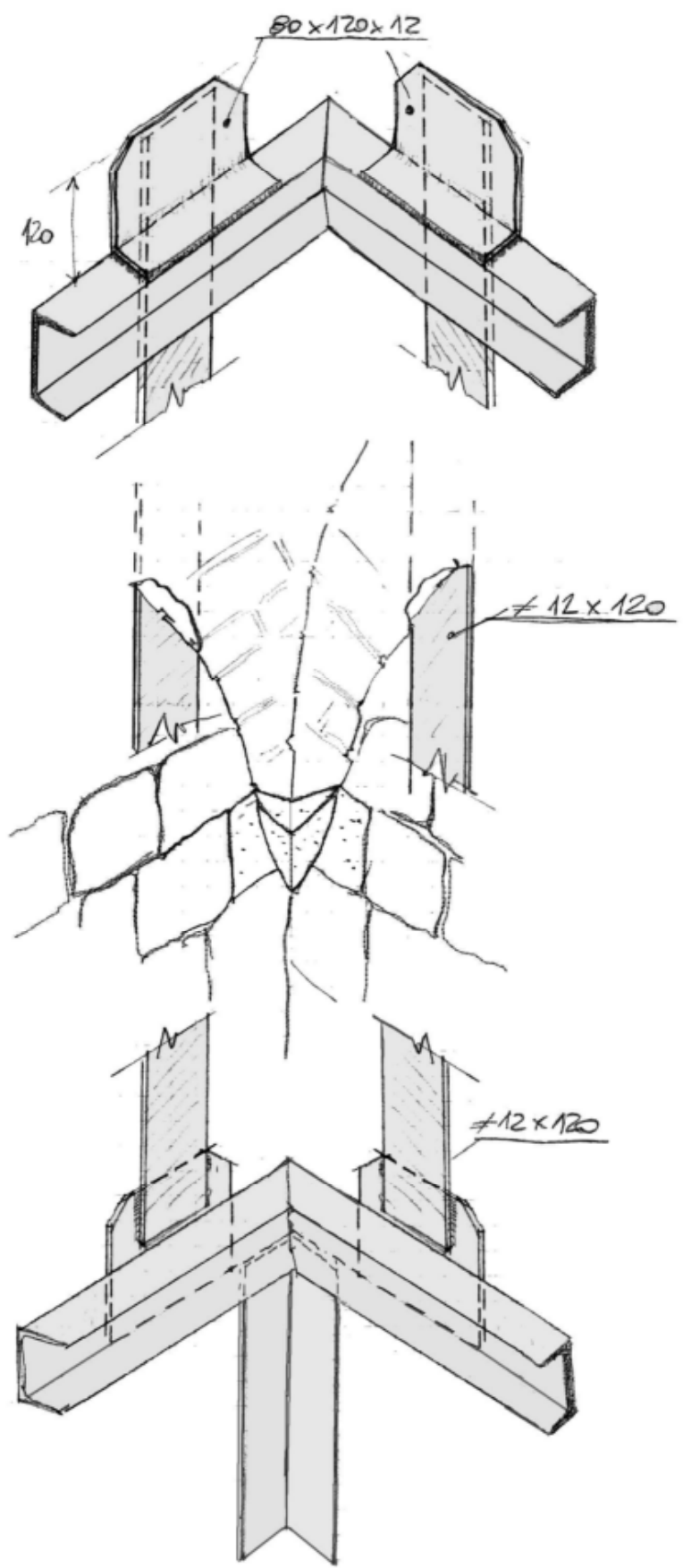
SEZ. C-C  
scala 1:100



SEZ. D-D  
scala 1:100

solaio grigliato in acciaio zincato  
con sostegni in HEA 120 ortogonali  
alla diagonale



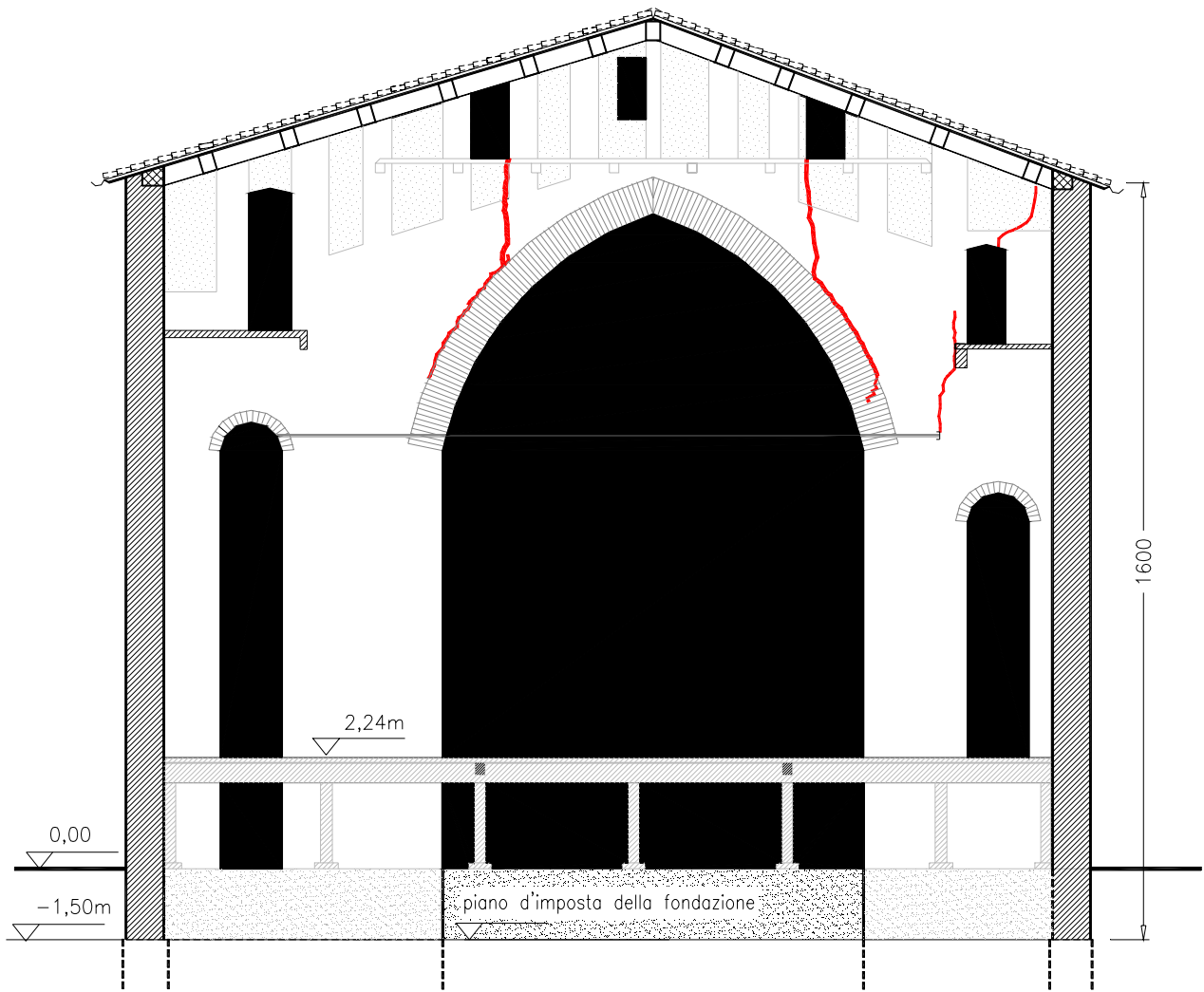


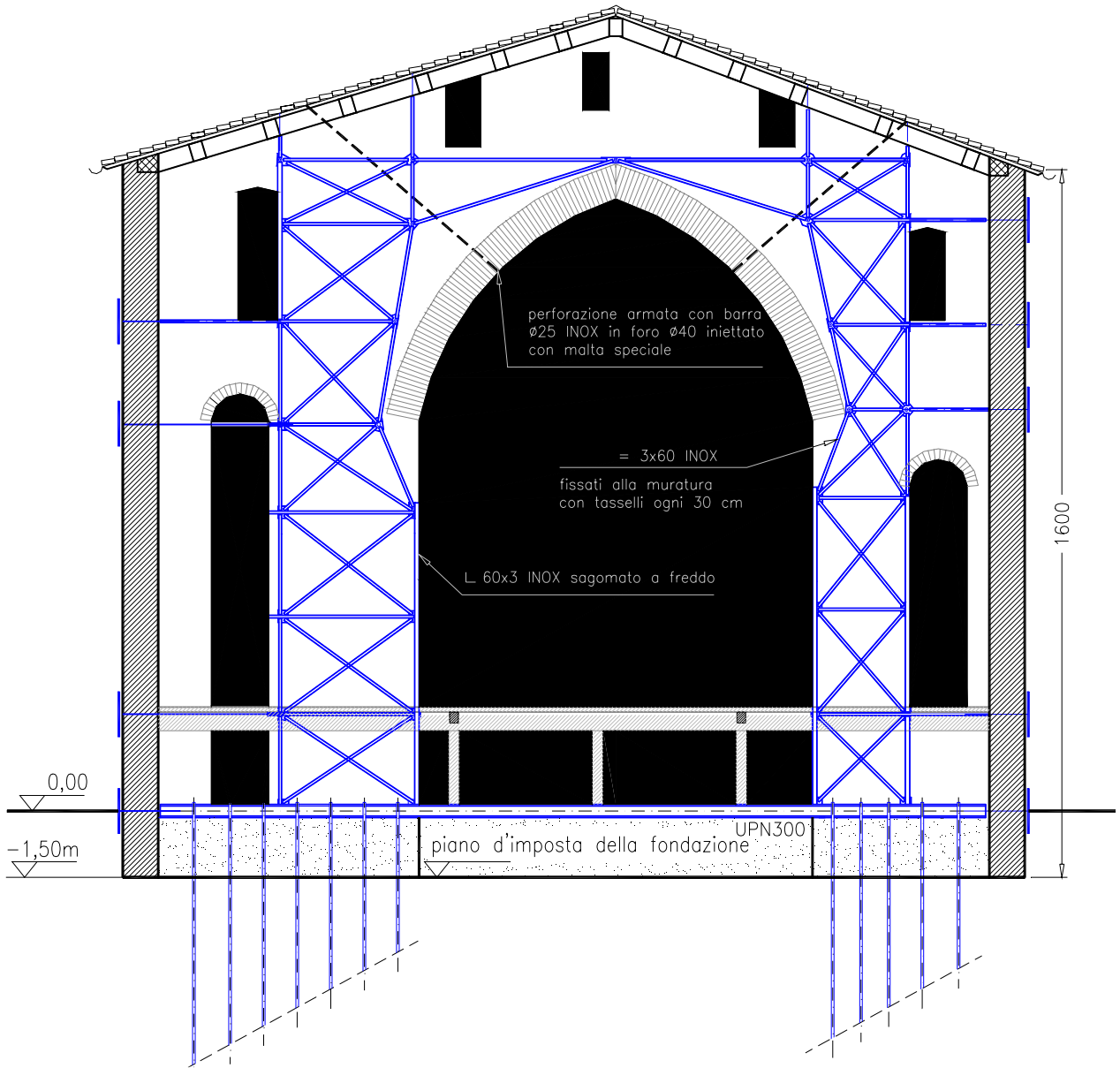


## Teatro Rossi di Pisa

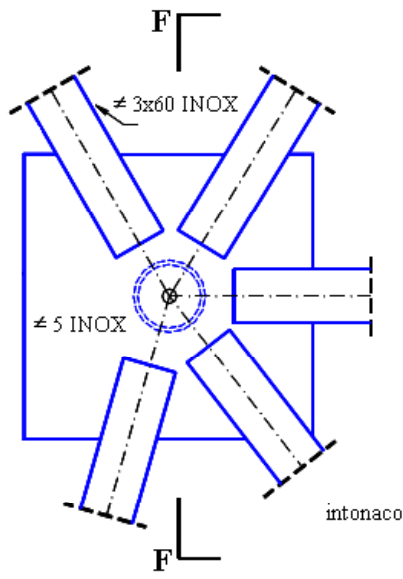




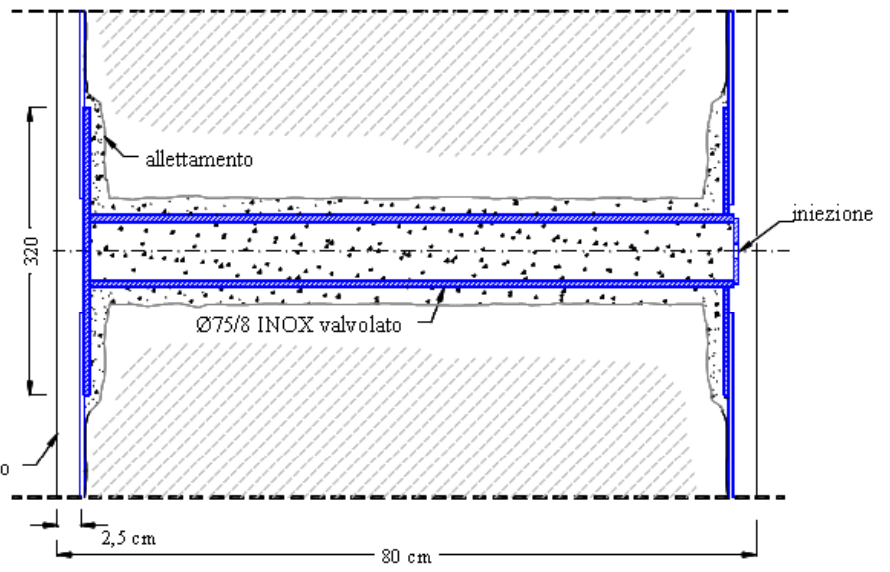




# ATTACCO DELLE ASTE



# SEZ.F-F









## Criteri di modellazione

Per modellare la muratura è stato utilizzato un legame costitutivo elastico non lineare che tiene conto della limitata resistenza a trazione.

Lo studio è stato effettuato in stato piano di sforzo.

Il modello dell'arco, costituito da elementi piani, è stato messo in equilibrio sotto l'effetto del peso proprio in assenza del rinforzo.

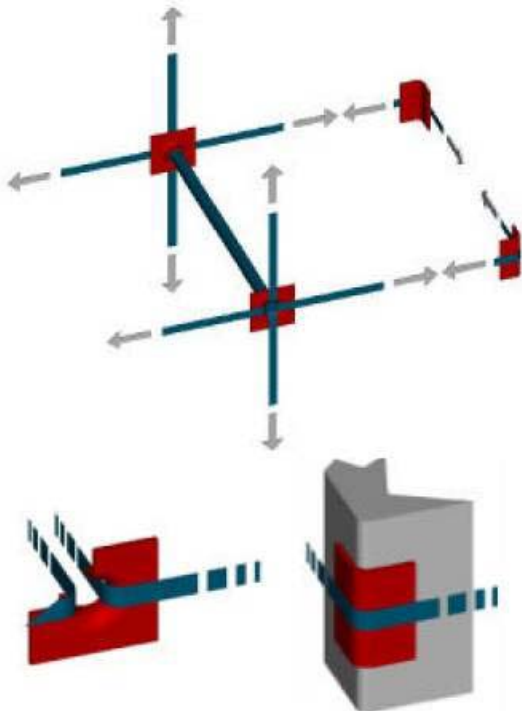
Il rinforzo reticolare è stato modellato con elementi monodimensionali, connessi ai nodi della struttura già in equilibrio sotto il peso proprio.

Per simulare l'effetto del sisma, il modello completo è stato sottoposto all'azione delle forze di inerzia orizzontali, ottenute moltiplicando la massa della porzione di muratura per un'opportuna frazione dell'accelerazione di gravità.

Il comportamento delle fasce compresse è stato studiato tenendo conto dei collegamenti alla muratura, del vincolo di continuità e della collaborazione della sezione di acciaio con lo strato di intonaco.

## CAM Cuciture attive murarie

Il CAM è una struttura reticolare di rinforzo con elementi soltanto tesi; è realizzata con nastri in acciaio inox presolleccati in modo da generare una rete attiva sul muro.



I nastri, posti sul muro dopo rimozione dell'intonaco, realizzano un sistema continuo di tiranti e collegano tra loro muri ortogonali.

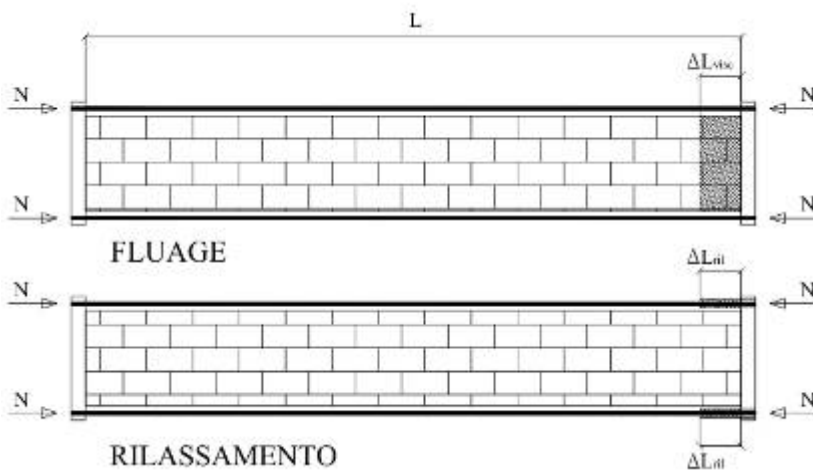
- nastri di acciaio inox di sezione  $0,75 \times 18$  mm  $f_y = 250 \div 300$  MPa  $f_r = 600 \div 700$  MPa
- piatti di connessione quadrati, con apertura ad imbuto e lato 12,5 cm
- terminali angolari di lato 10 cm

Il CAM favorisce il comportamento scatolare dell'edificio, ne aumenta la duttilità e la stabilità a ribaltamento.

Non vengono alterate le proprietà fisiche del muro e non c'è interferenza con gli impianti esistenti. La trazione applicata è modulabile.



Il fluage della muratura e il rilassamento dell'acciaio causano una caduta di tensione: se il tiro iniziale è circa quello di snervamento, la perdita di tensione risulta inferiore al 20%.



### RINFORZI DI MURATURE CON NASTRI DI INOX: VANTAGGI

- **duttilità** del materiale / del collegamento con la muratura (*no peeling off, no concrete ripping*);
- **funzionamento alla “Mörsch”**;
- **funzionamento a “gabbia” indipendente** (al muro il solo ruolo di conferire stabilità locale al nastro);
- **durabilità**;
- **resistenza al fuoco**;
- **ubicazione sotto intonaco**;
- **removibilità**;
- **costo**

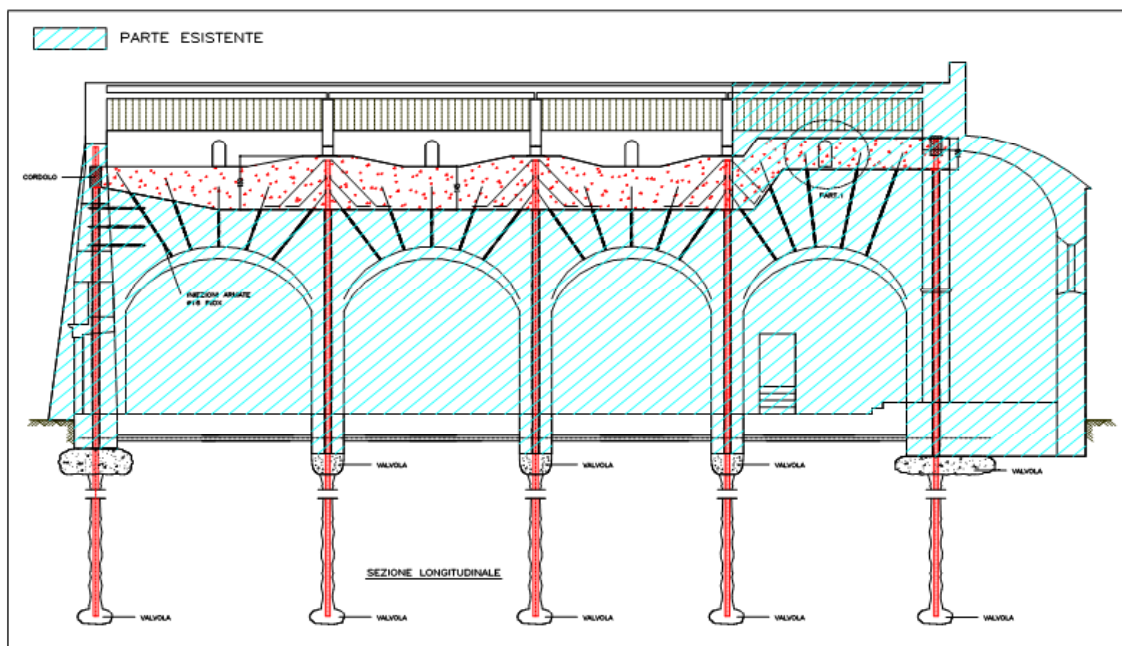
**IL CASO DELLA PIEVE DI S.STEFANO DI SORANO**  
a Filattiera (MS)



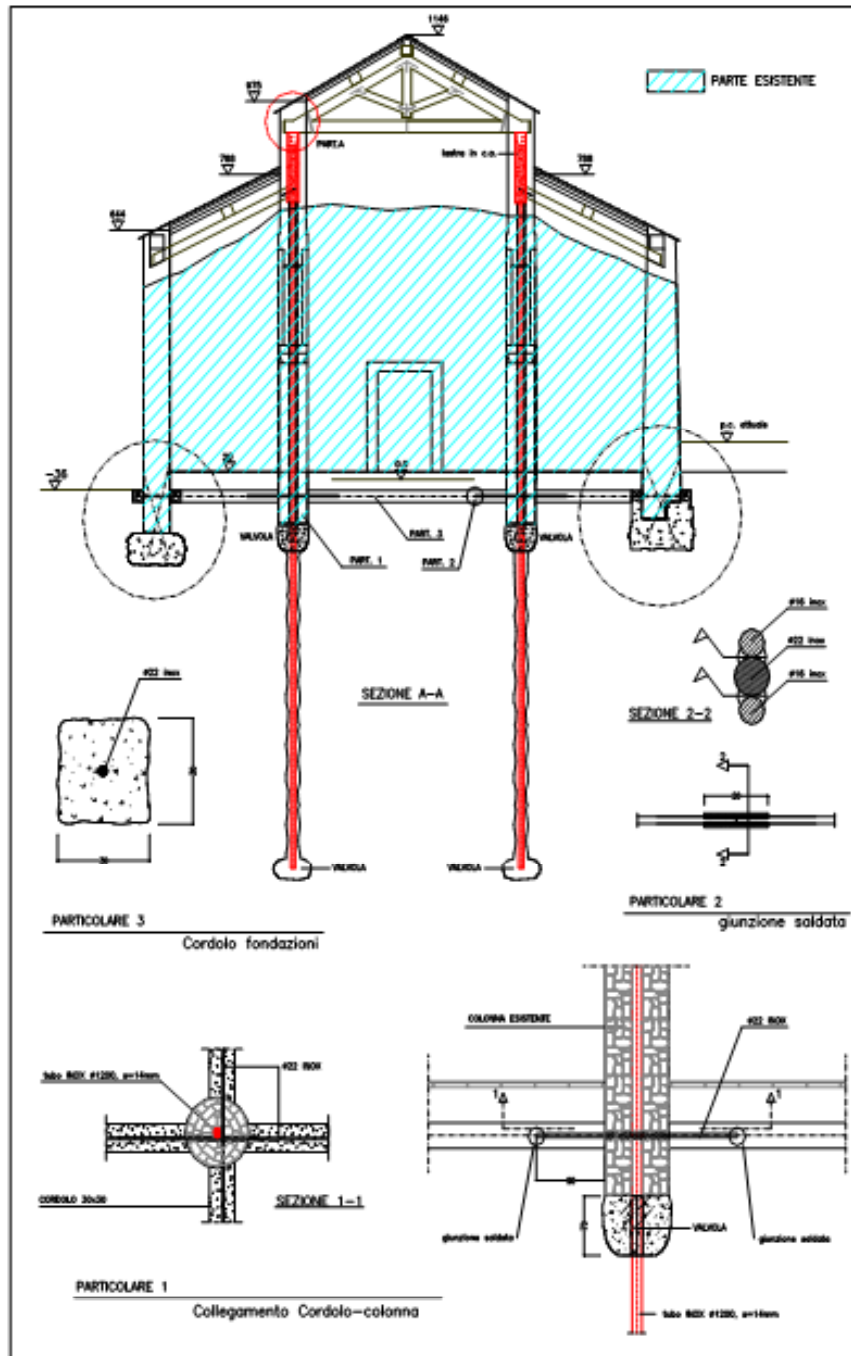
I sismi non hanno risparmiato in passato gli edifici storici; i successivi reintegri sono consistiti di solito in semplici ricostruzioni che non hanno influito sul funzionamento statico, esponendo così nuovamente le opere ai sismi. Il conferimento di sismoresistenza si basa invece su modifiche del comportamento della costruzione in fase di scuotimento, da ottenersi nel modo meno invasivo possibile e comunque con soluzioni invisibili, che non condizionino l'architettura e capaci di sfidare il tempo. Riteniamo che ciò si ottenga modificando la resistenza e i collegamenti delle membrature esistenti, piuttosto che introducendo nuove membrature deputate a sostituirle. La parziale ricostruzione della Pieve romanica di S.Stefano di Sorano ha costituito l'occasione per mettere in atto una soluzione che risponde al suddetto criterio.

La Pieve, costruita intorno all'XI secolo sulla via Francigena ai piedi della Cisa, mostrava, prima dell'inizio dei lavori, ultimati con l'Anno Santo 2000, gli effetti distruttivi dei sismi e dell'incuria che nel corso dei secoli avevano lasciato in uso soltanto la parte absidale (trasformata in cappella cimiteriale) e le due navate laterali, modificate ad uso di cimitero utilizzando i ruderi. La copertura della navata centrale e i suoi muri di sostegno e parte della facciata erano crollati, mentre le pareti longitudinali mostravano lesionamenti e vistose rotazioni.

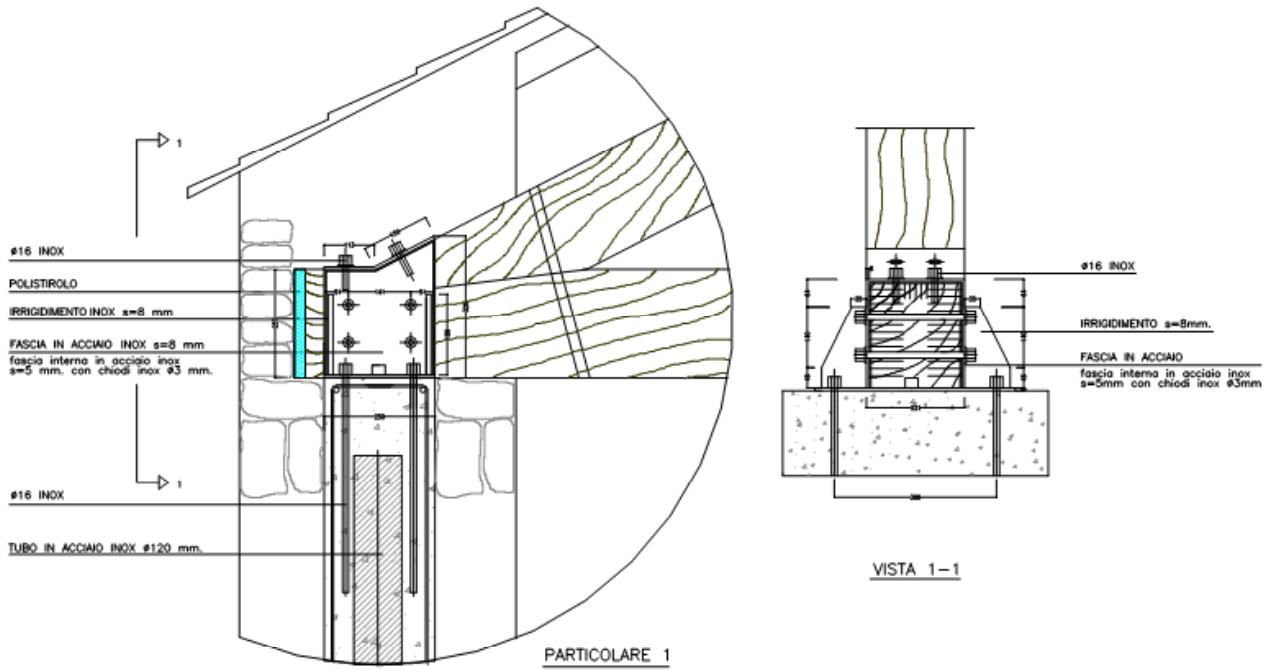
Gli interventi di progetto, tutti inediti, hanno consentito di realizzare, senza condizionamenti per la ricostruzione, un nuovo organismo statico che è stato oggetto di studio con modellazione della risposta strutturale al sisma sia in fase di comportamento elastico, sia post-elastico in presenza di degrado. Quest'ultima modellazione, del tutto originale, è rivolta a verificare l'efficacia dell'intervento attraverso una moderna previsione della sicurezza in caso di sisma, confrontando la duttilità disponibile con quella richiesta.



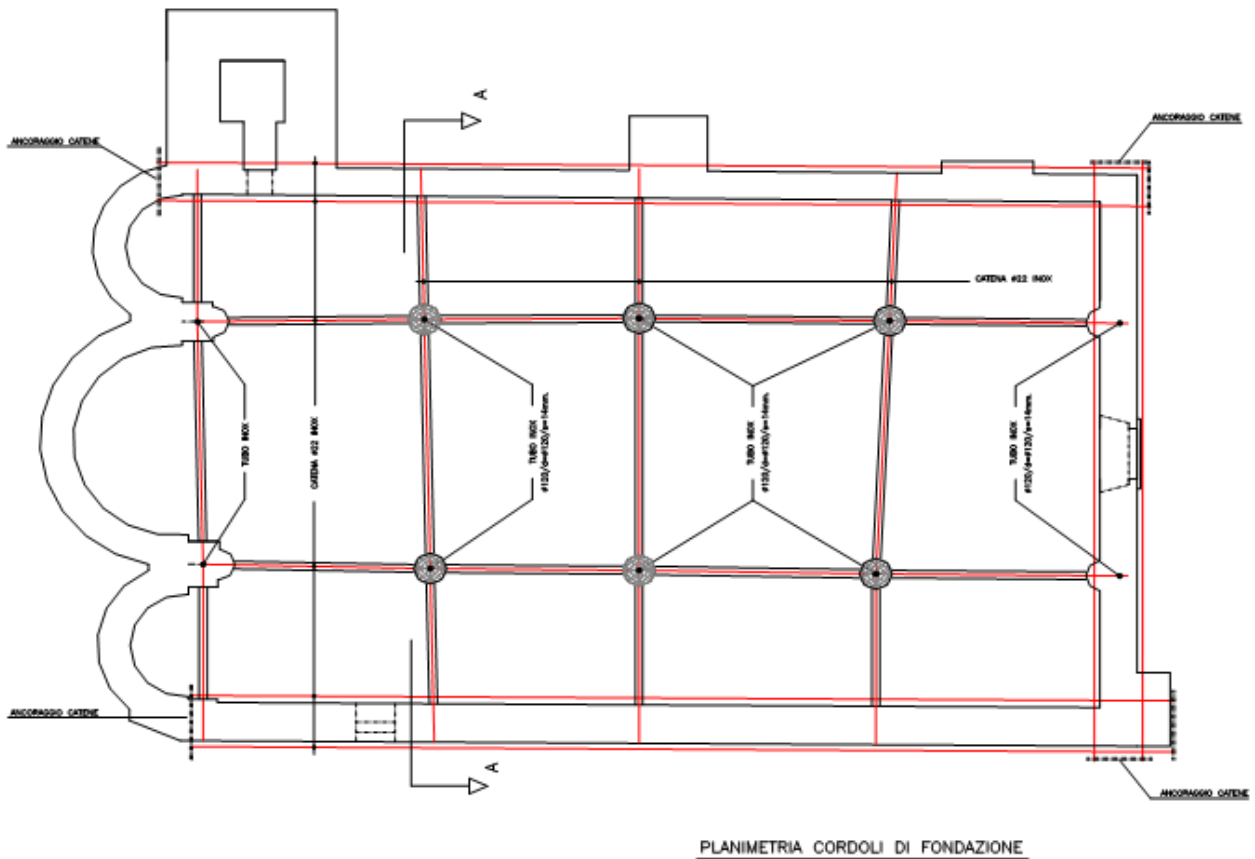
Schema dell'intervento: sezione longitudinale



Schema dell'intervento: sezione trasversale



Collegamenti rigidi pareti-capriate

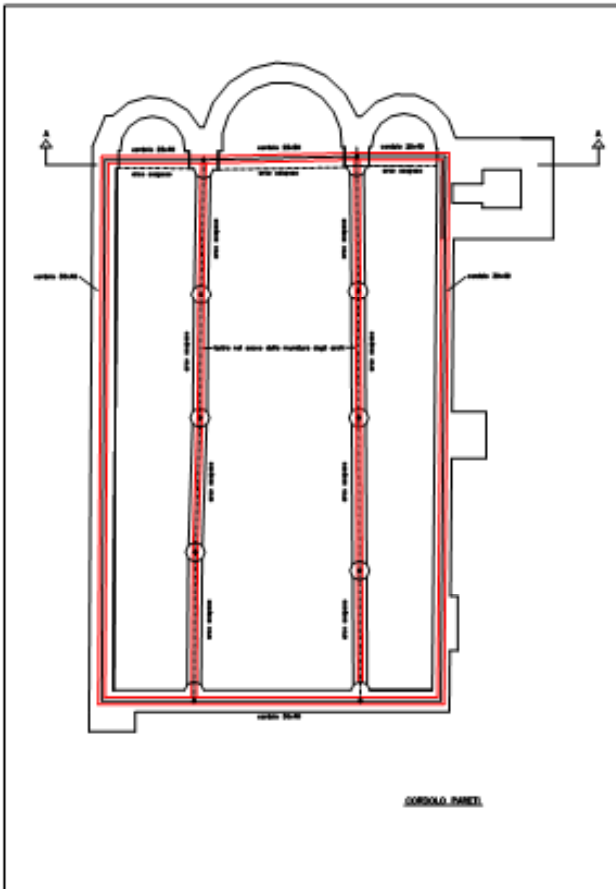


Schema dell'intervento: pianta al livello di fondazione

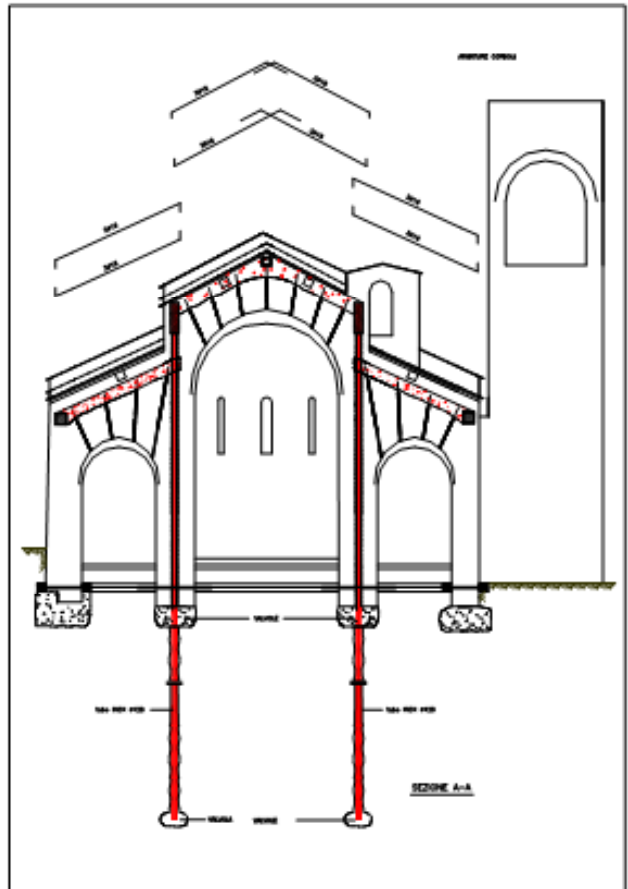




Sottofondazione



Cordoli



Rinforzo abside







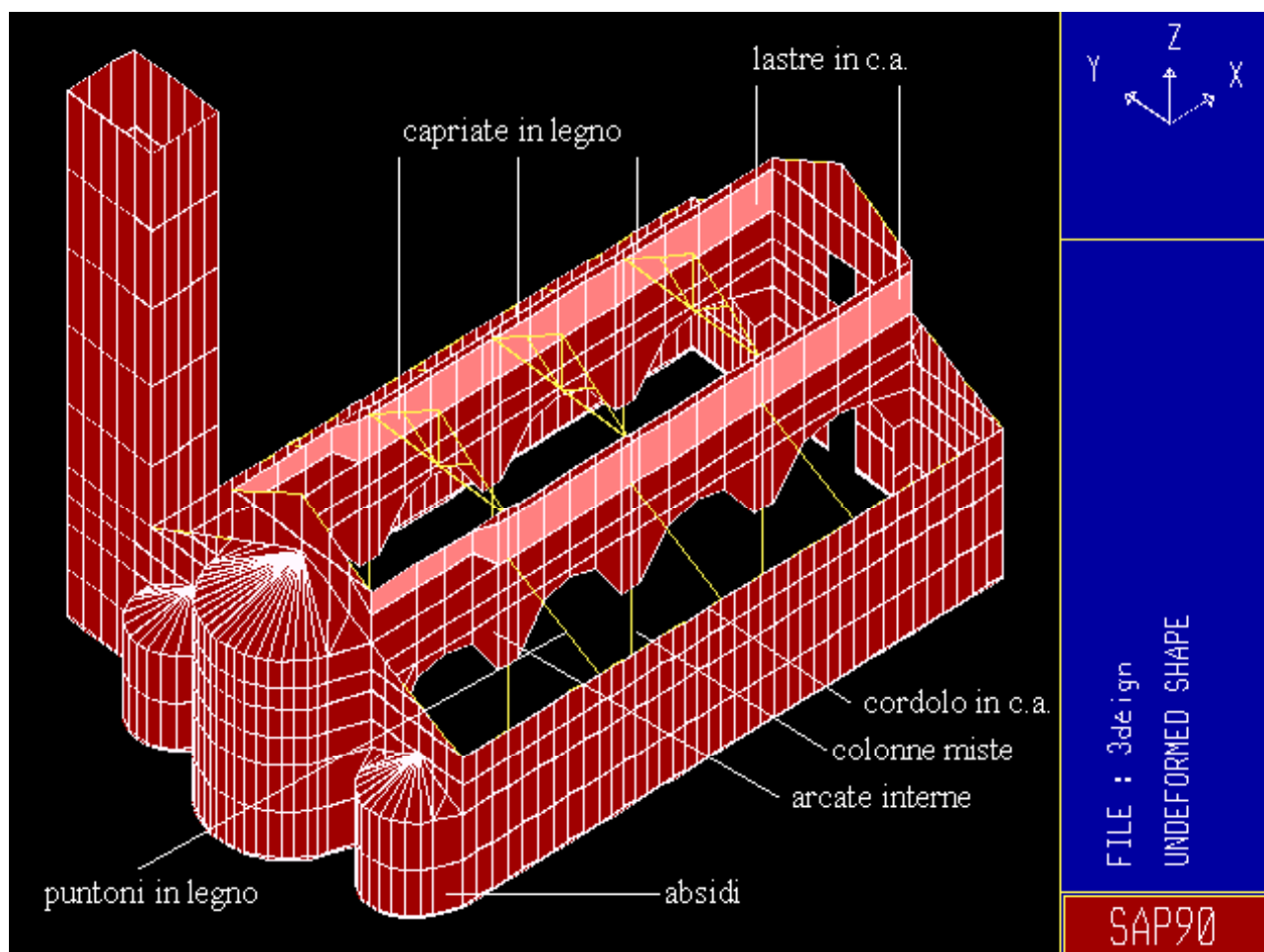
Navata destra



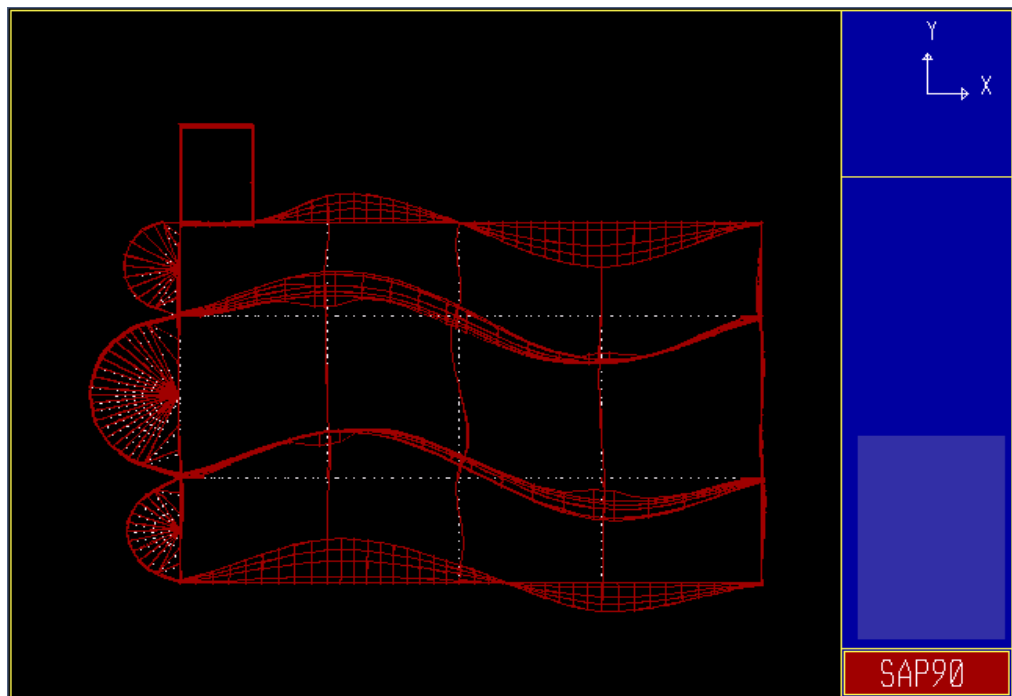
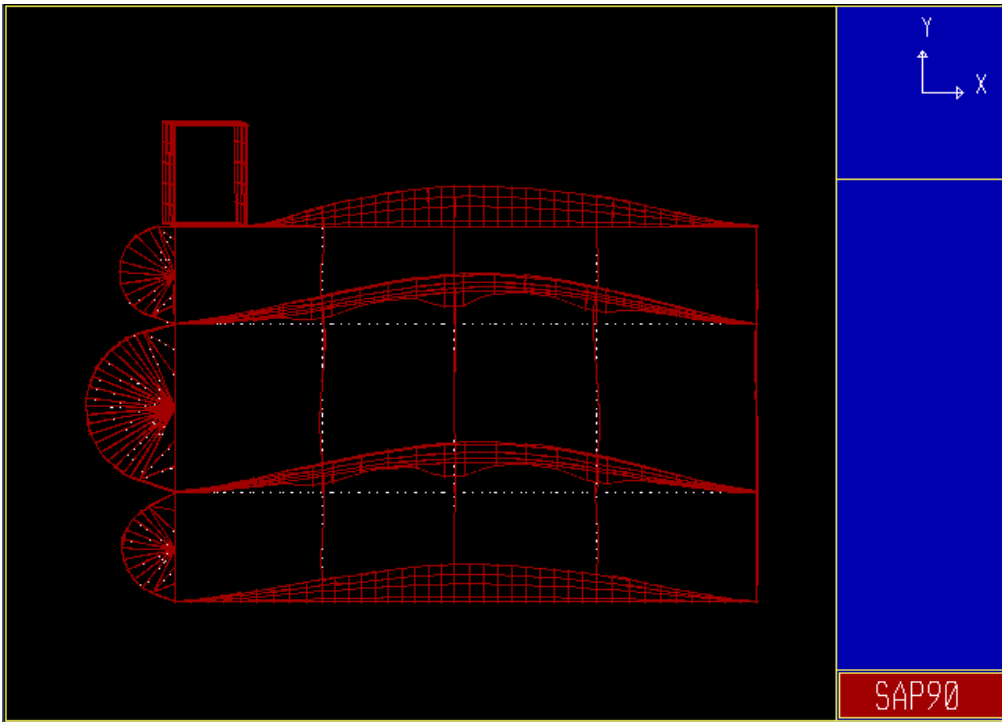
Navata sinistra

## Modellazione del comportamento in fase sismica

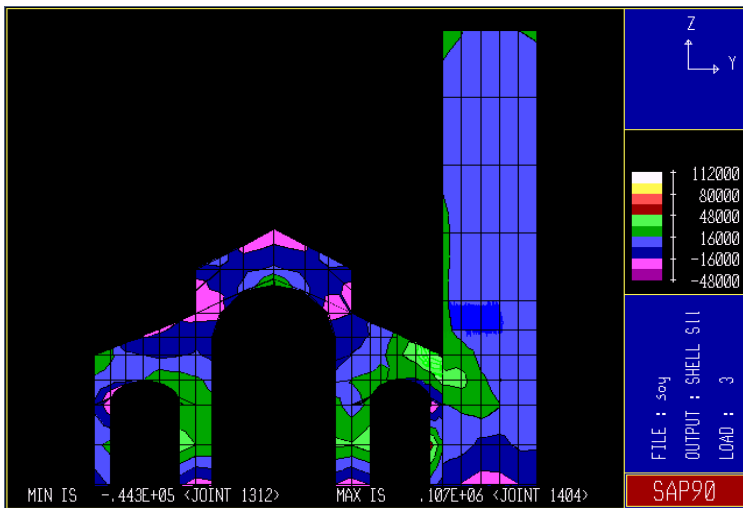
Gli interventi descritti nei paragrafi precedenti realizzano un nuovo organismo statico che è stato oggetto di studio con la modellazione della risposta al sisma quando la costruzione si muove in modo elastico senza danneggiarsi; successivamente si è esteso lo studio al più complesso ma più importante funzionamento nella fase in cui gli scuotimenti sismici originano grandi deformazioni e danneggiamenti localizzati. Si sono così quantificate le doti di sismoresistenza e di duttilità ottenute con l'intervento di restauro, elaborando in modo originale gli attuali mezzi scientifici a disposizione dell'ingegneria antisismica.



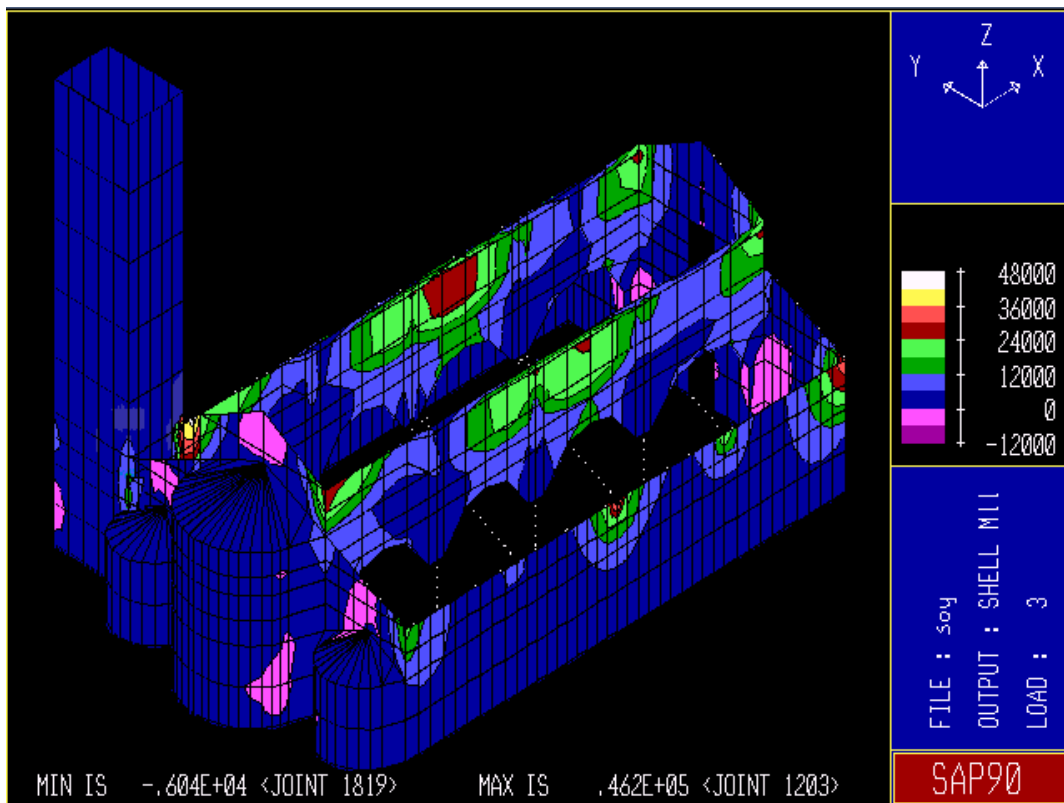
Il modello elastico: 1377 elementi guscio, 175 elementi trave



Primo e quarto modo di vibrare



sforzi membranali negli archi



Sollecitazioni flessionali

L'analisi dinamica di tipo "time history" riferita a terremoti caratteristici dell'attività sismica italiana e forniti in input sotto forma di accelerogrammi, ha consentito di stimare i massimi valori delle sollecitazioni e degli spostamenti ed eseguire un successivo confronto con le analoghe caratteristiche ottenute nel calcolo post-elastico.

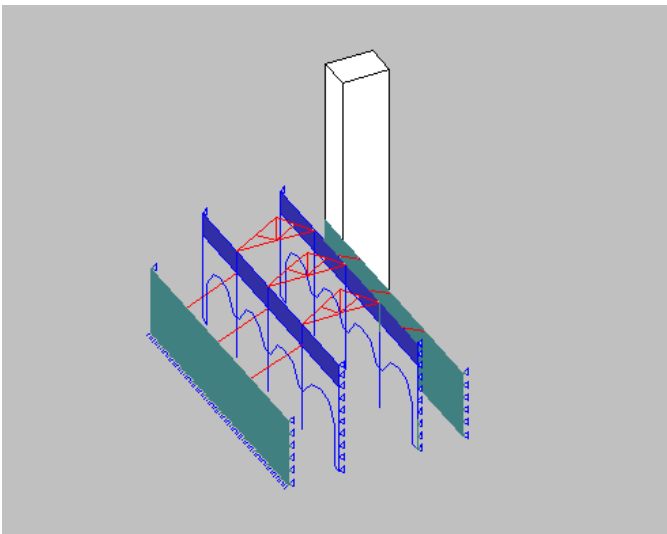
### Analisi in campo post - elastico

E' stato analizzato il comportamento della pieve, in campo post- elastico ed in presenza di degrado, in caso di terremoti di elevata intensità. Scopo dell'analisi è stato quello di valutare la duttilità richiesta alla struttura dai terremoti di progetto caratteristici dell'attività sismica italiana ed eseguire un confronto con la duttilità disponibile, cioè quella che la struttura è in grado di fornire con il

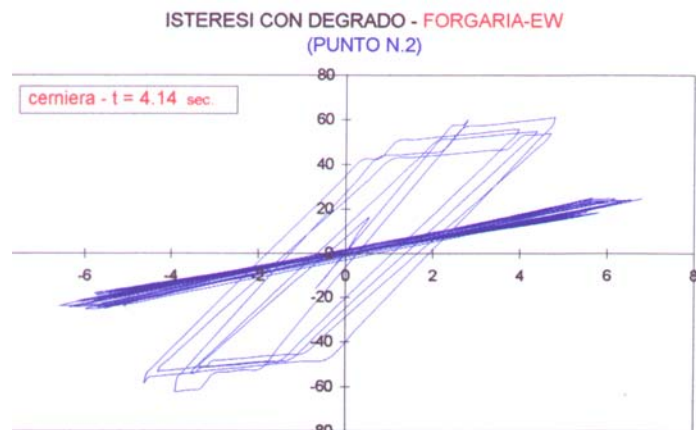
nuovo funzionamento strutturale. Il modello di calcolo utilizzato è stato semplificato rispetto a quello elastico tridimensionale. In esso le colonne sono state schematizzate come elementi “frame” a legame costitutivo elasto-plastico (Hendry) con incrudimento cinematico mentre le lastre in c.a., ipotizzate a comportamento elastico, sono state vincolate alle estremità con incastrati e cerniere.

Nella valutazione della storia deformativa della struttura sotto l’effetto del sisma, assume un ruolo essenziale il fenomeno del degrado cioè il decadimento della legge costitutiva degli elementi strutturali causata dal susseguirsi di storie deformative, in questo caso indotte dal sisma. Si osserva che il degrado è funzione della storia deformativa passata ed influenza la rigidità e quindi la risposta deformativa dei componenti. Siamo, dunque, in presenza di un problema di interazione moto-degrado, che analiticamente è stato risolto con un algoritmo di integrazione al passo in grado di quantificare il danno in oscillatori discreti. Tale algoritmo, implementato numericamente su codice di calcolo, è relativo al cosiddetto degrado parametrico in cui la legge costitutiva dell'oscillatore discreto si modifica in funzione di un solo parametro (D) senza mutare la forma.

L’idea alla base del programma si ispira alla trattazione di Miner nei problemi di fatica e consiste nel ritenere significativi nella storia deformativa passata, che influenza il danno, i soli estremi deformativi e il numero di ripetizione di questi. Il parametro D, dunque, sulla base di una rigorosa trattazione fisico-matematica si ipotizza funzionale di tre variabili capaci di descrivere univocamente i picchi deformativi ed il numero di ripetizioni di questi. Nel caso specifico, è stato studiato un funzionale di danno in grado di tradurre analiticamente il comportamento tipico delle murature secondo il quale i primi cicli incidono percentualmente sul danno molto più degli ultimi.



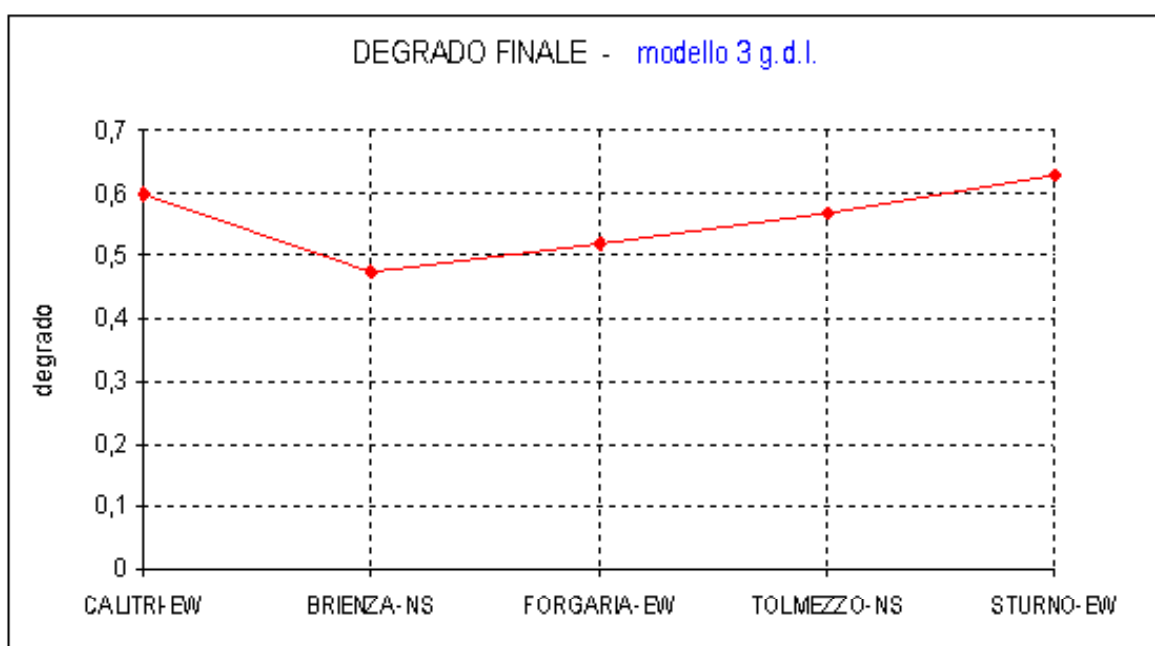
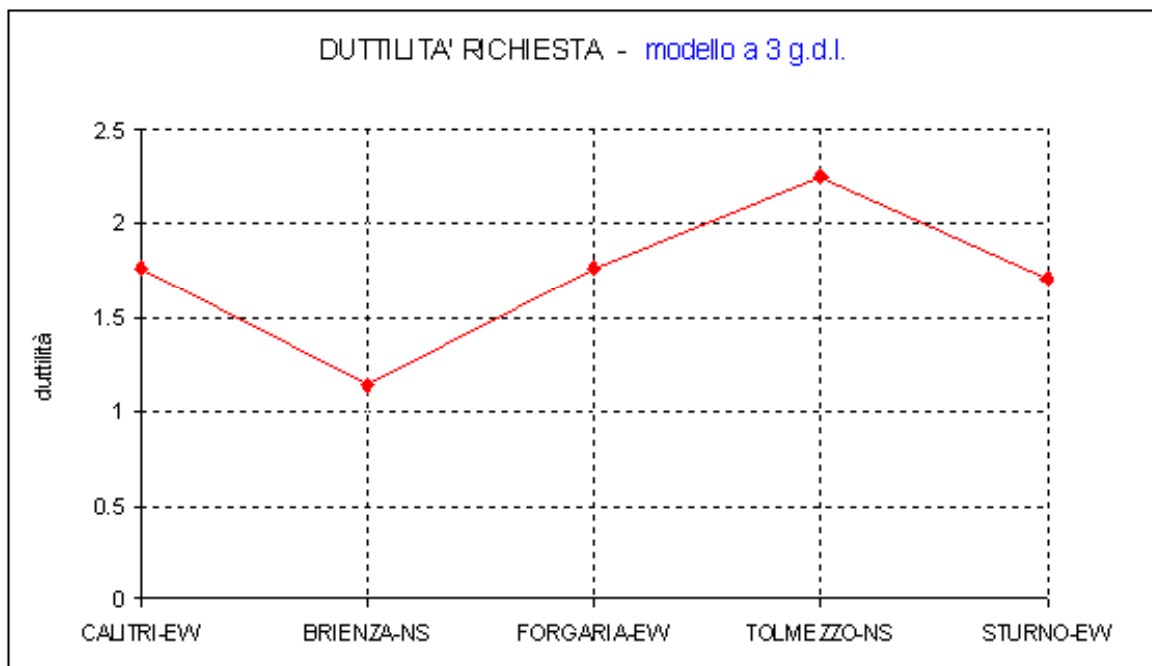
Il modello di calcolo in fase post-elastica



Isteresi con degrado nelle colonne



L'applicazione rigorosa al caso in questione dell'intero procedimento di calcolo è avvenuta mediante l'utilizzo di codici numerici appositamente implementati (Shedeg-spri e Beamdeg). Inoltre, un altro algoritmo oggetto di studio è stato quello relativo al controllo di rotture sulla muratura nella sezione di base della colonna. In altri termini, si è voluto verificare se, per effetto di sollecitazioni di natura sismica, l'alternanza di trazioni e compressioni producano o meno rotture successive nelle sezioni più impegnate delle colonne. L'algoritmo è fondato sul criterio energetico di Griffith riguardante la meccanica della frattura ed in esso si ipotizza che la rottura avvenga per successive strisce di sezione a partire da quelle esterne. La fessura si propaga quando un aumento della sua lunghezza produce una diminuzione o, al limite, lascia inalterata l'energia totale del sistema costituita dall'energia potenziale immagazzinata in un volume possibile sede di fessure e dall'energia superficiale relativa alle due nuove superfici di frattura.



Questi esempi, ben distinti rispetto alla tradizione della “strutturistica” moderna, sono frutto della sinergia fra le conoscenze tecniche e la cultura umanistica necessaria per applicarle in modo culturalmente appropriato, muovendo dal processo originario della conoscenza, cioè l’osservazione, la meditazione dell’osservato e la percezione del funzionamento del nuovo. Il tutto stimolato e avallato dalla preparazione scientifica che lo stato dell’arte ci consente, inserita nella cultura che ha prodotto e portato fino a noi le opere che vogliamo conservare.