



Rete dei Laboratori Universitari
di Ingegneria Sismica e Strutturale



6/13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC



SCUOLA DI INGEGNERIA STRUTTURALE – RELUIS

Bologna, 9-11 ottobre 2024

**EFFICACIA DI INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO SISMICO PER EDIFICI
DI CULTO: EVIDENZE DAI RECENTI TERREMOTI E DALLA
MODELLAZIONE DI CASI REALI**

Prof. Ing. Francesca da Porto

Inquadramento

Gli **edifici ecclesiastici** si distinguono dagli edifici ordinari per la disposizione degli elementi strutturali e le proporzioni geometriche:

→ **vulnerabilità sismica intrinseca molto elevata**

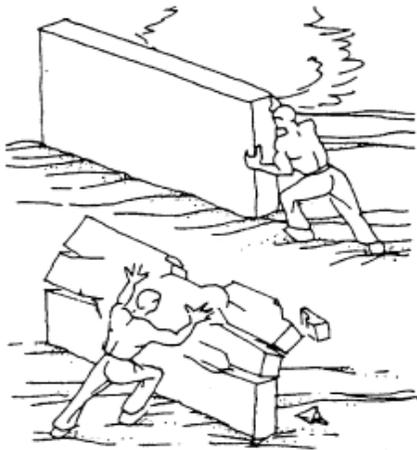
Caratteristiche:

- **poche pareti portanti** (perimetrali: facciata, pareti laterali, parete di chiusura), spesso **snelle**
- presenza di **elementi spingenti** (archi, volte)
- **unico diaframma orizzontale in sommità**, tetto a falde solitamente non progettato per redistribuire le azioni sismiche.

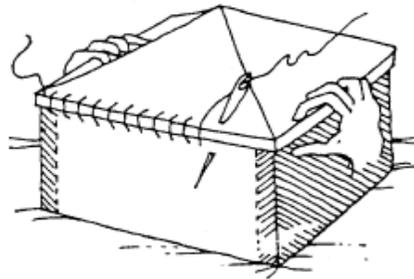


Chiesa di San Felice, San Felice sul Panaro (MO)

Inquadramento



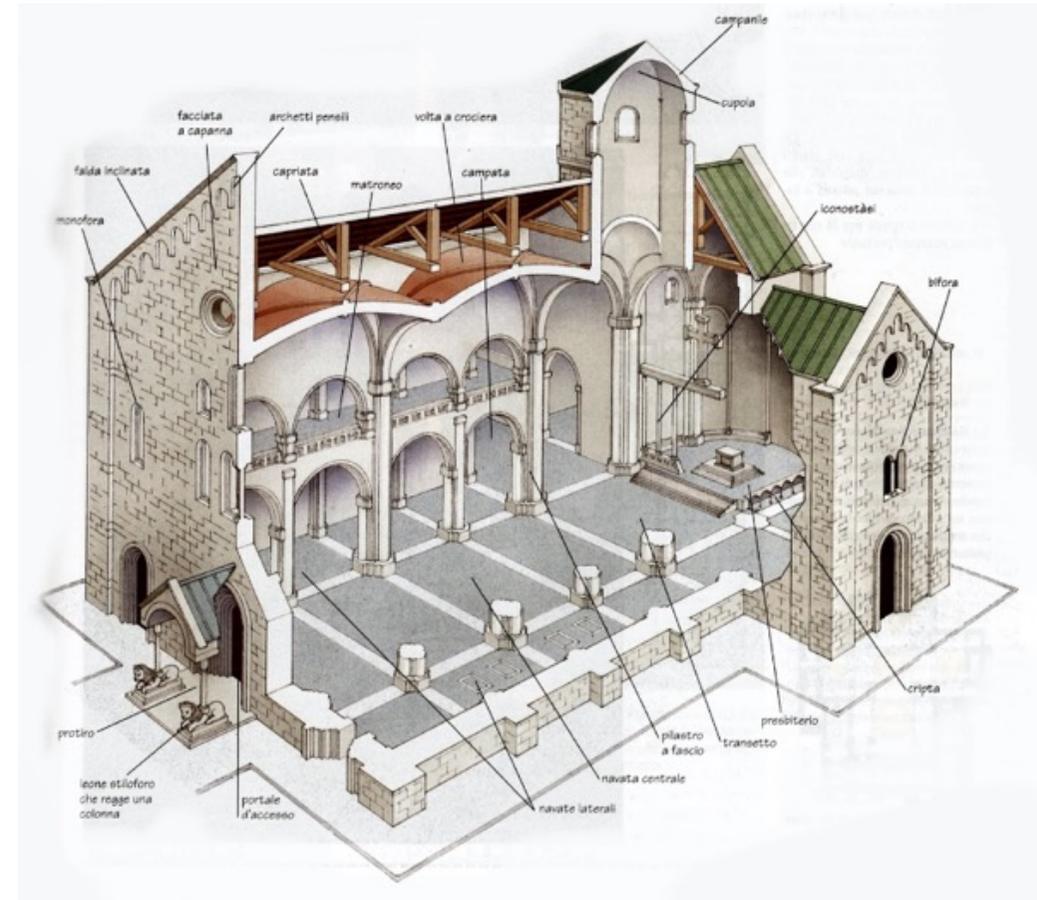
**DIAFRAMMI
ORIZZONTALI???**



**PARETI DI
CONTROVENTO???**

COLLEGAMENTI???

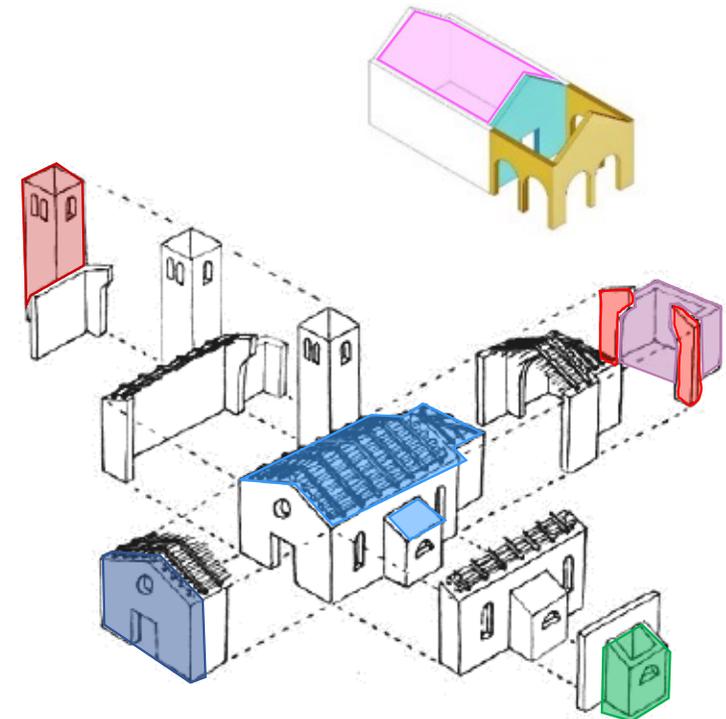
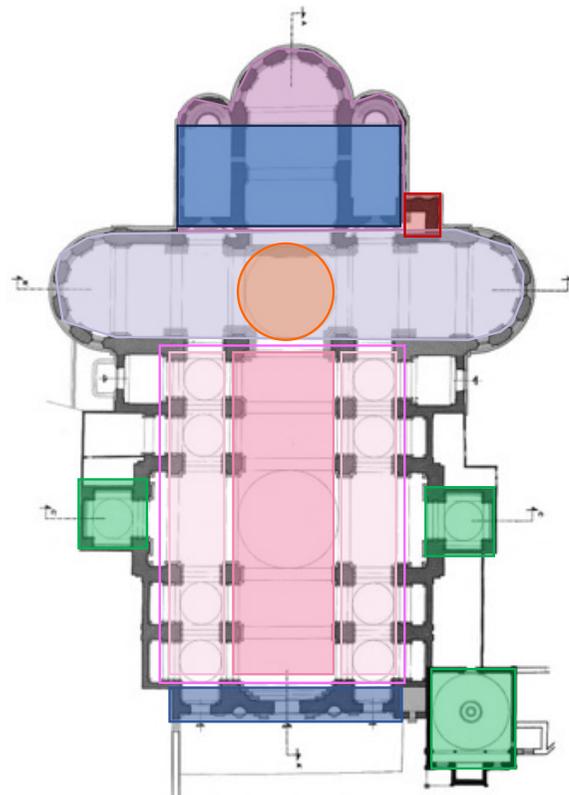
Difficoltà di sviluppare un comportamento globale sotto azioni sismiche, e netto prevalere di un comportamento per macroelementi indipendenti l'uno dall'altro, che possono dar luogo a diversi meccanismi di danneggiamento e collasso.



Inquadramento

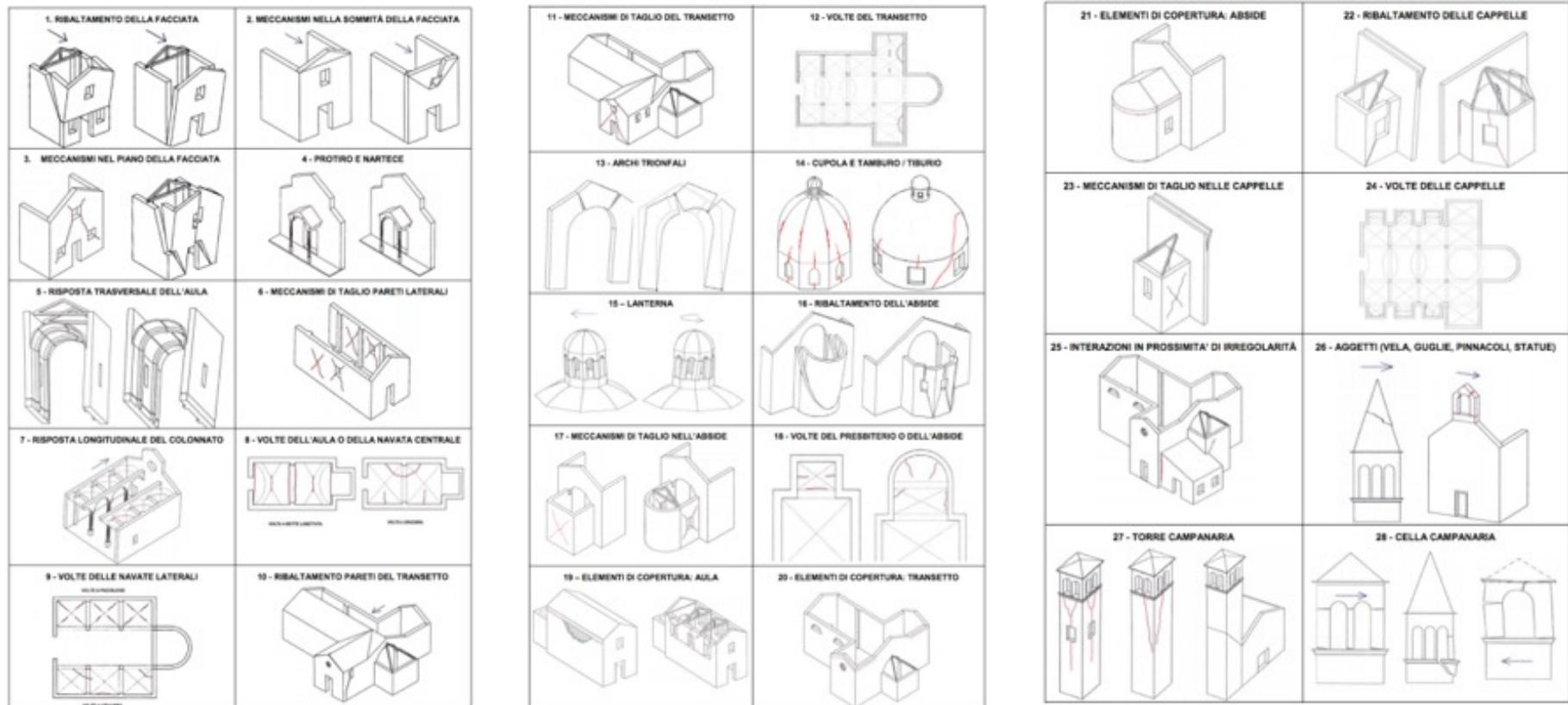
MACROELEMENTO: parte costruttivamente riconoscibile del manufatto, di caratteristiche omogenee in riferimento al comportamento strutturale. Può coincidere con una porzione identificabile anche sotto l'aspetto architettonico e funzionale.

-  Facciata
-  Aula
-  Navata centrale
-  Navate laterali
-  Transetto
-  Arco trionfale
-  Abside
-  Presbiterio
-  Cappella
-  Cupola
-  Torre campanaria
-  Copertura
-  Protiro / Nartece



Meccanismi di collasso

Meccanismi di collasso da scheda di rilievo del danno post-sisma delle chiese (Scheda A-DC PCM-DPC MiBAC 2006)



Meccanismi di collasso

**Disgregazione della
muratura anziché
attivazione del meccanismo**



San Michele Arcangelo, Celano (AQ)



Meccanismi di collasso

Murature snelle e coperture inadeguate



Chiesa di San Francesco,
Mirandola (MO)

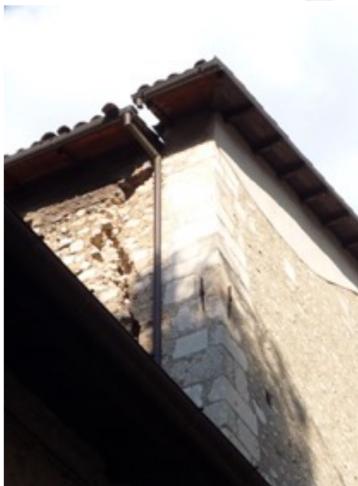
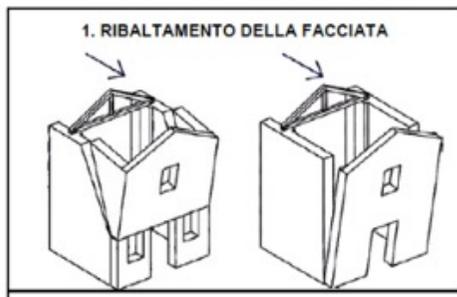


Chiesa di San Martino,
Buonacompra di Cento (FE)



Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi alla facciata



San Giuseppe dei Minimi, L'Aquila



Santa Gemma,
Goriano Sicoli
(AQ)

Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi alla facciata



San Biagio d'Amiterno, L'Aquila:
effetto di interventi in copertura



Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi alla facciata



Chiesa di San Vito alla Rivera, L'Aquila



Chiesa di San Domenico, L'Aquila



San Pietro, Coppito



San Biagio D'Amiterno, L'Aquila

Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi alla facciata

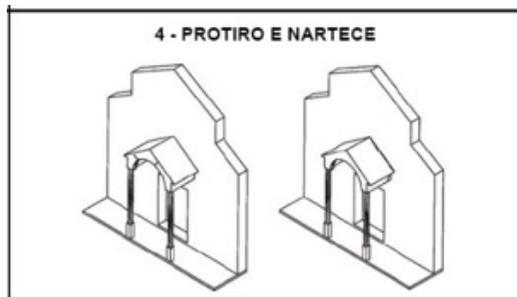


S. Croce, S. Ginesio (MC)



Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi a protiro/nartece



Abbazia S. Giovanni Battista – località Collimento Lucoli

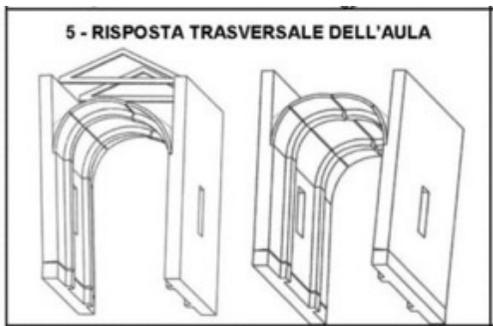


Chiesa Parrocchiale di Santo Stefano, Castelmassa (RO)



Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi all'aula



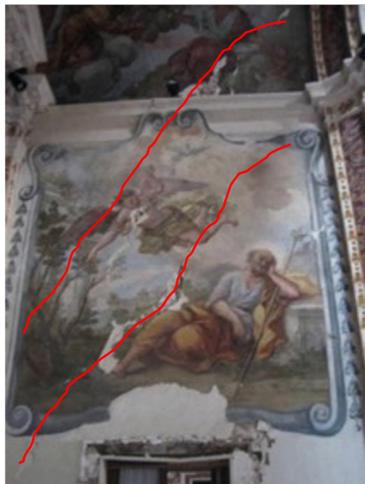
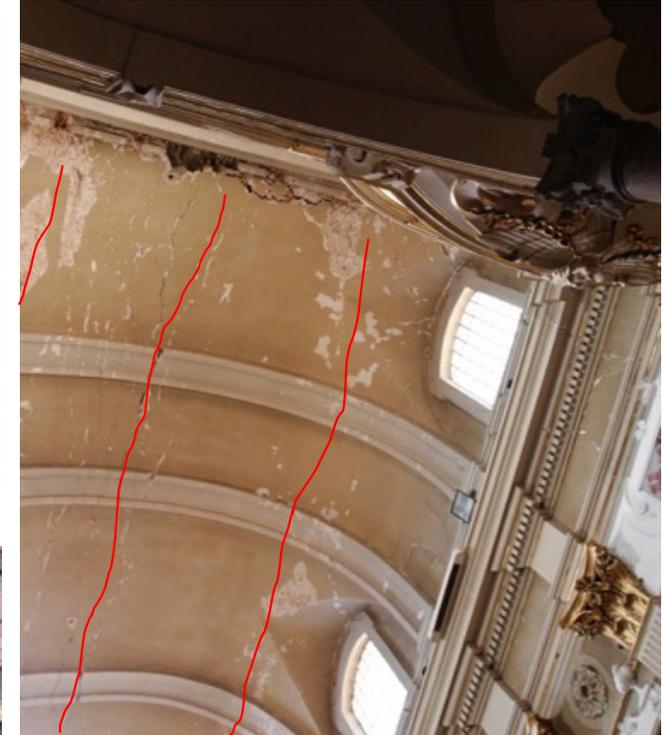
Chiesa di San Marco, L'Aquila

Chiesa della
Madonna
del Piano,
Baschi (TR)



Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi all'aula



Santa Margherita dei Gesuiti,
L'Aquila

Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi all'aula



Chiesa di S Michele Arcangelo, Bagnolo



Chiesa di S. Giovanni Battista (MN)



Meccanismi di collasso

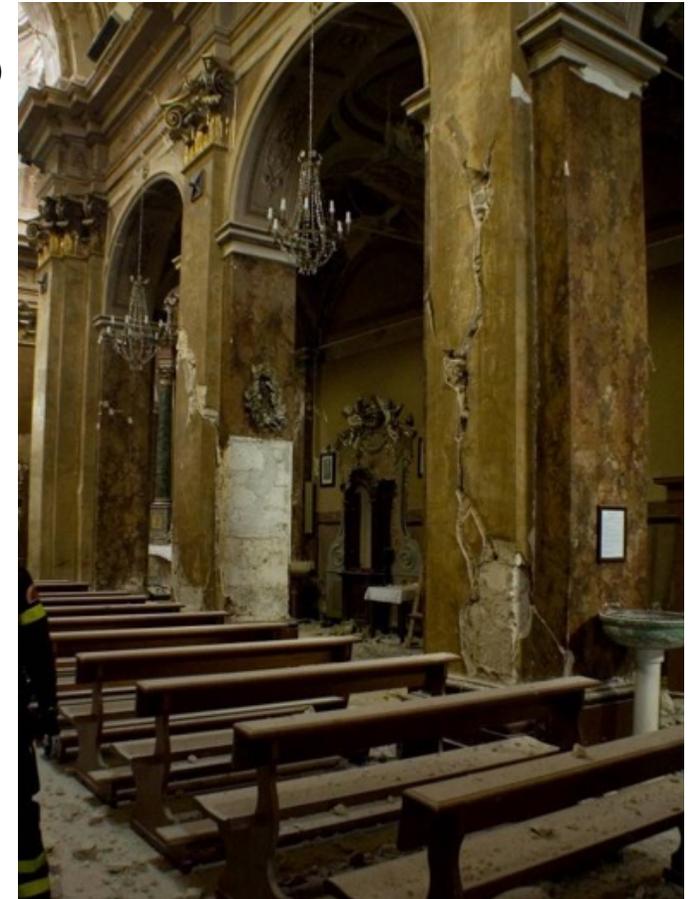
Meccanismi relativi all'aula



Chiesa di San Demetrio, San Demetrio ne Vestini (AQ)

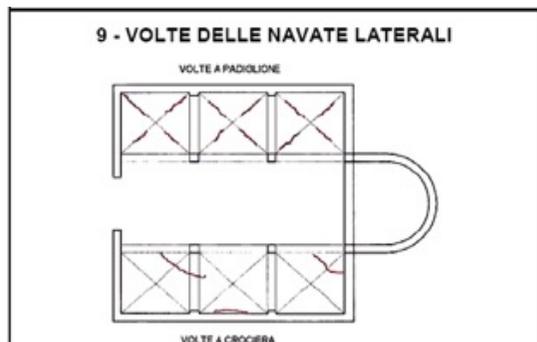


Santa Gemma,
Goriano Sicoli (AQ)



Meccanismi di collasso

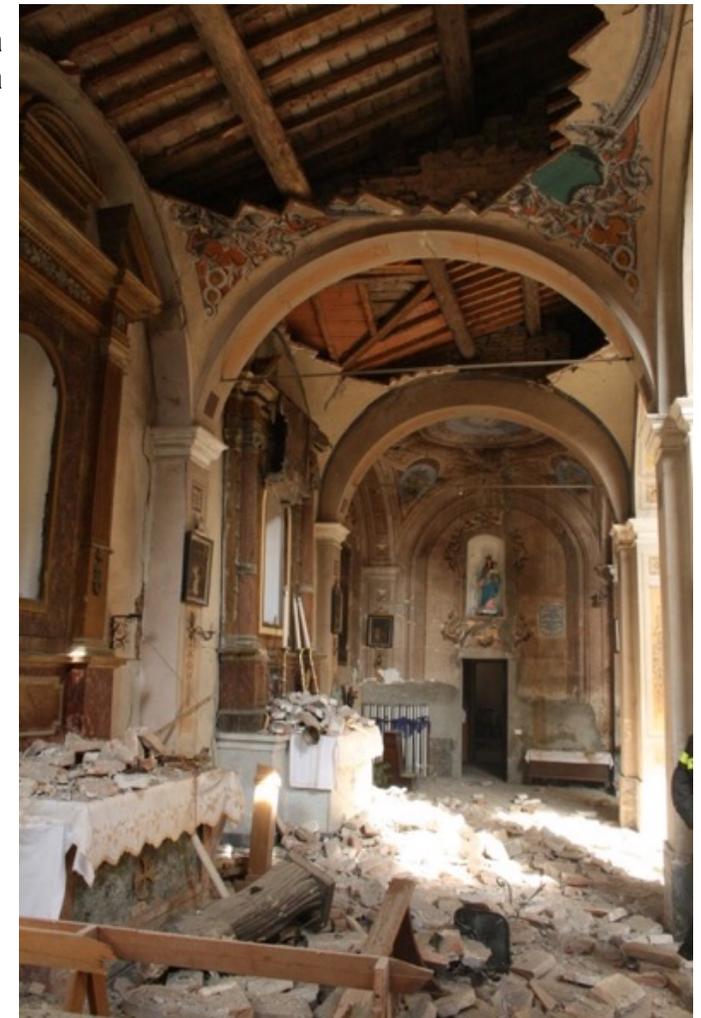
Meccanismi relativi all'aula



San Domenico,
L'Aquila

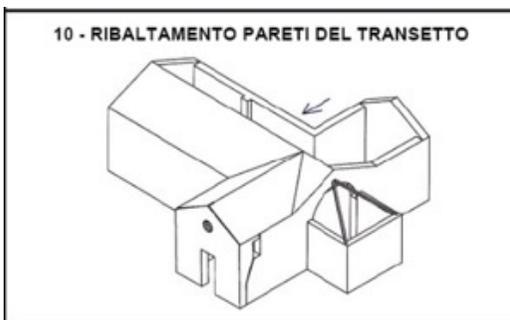


Chiesa
in Emilia



Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi al transetto



Duomo di San Massimo (AQ)



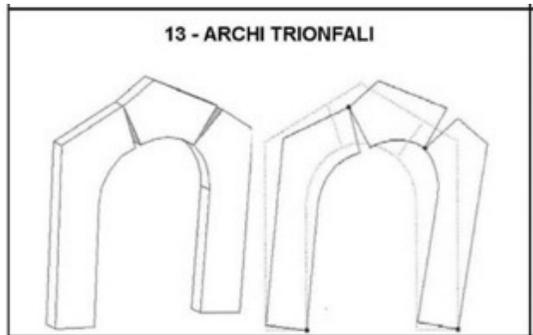
Santa Gemma, Goriano Sicoli (AQ)



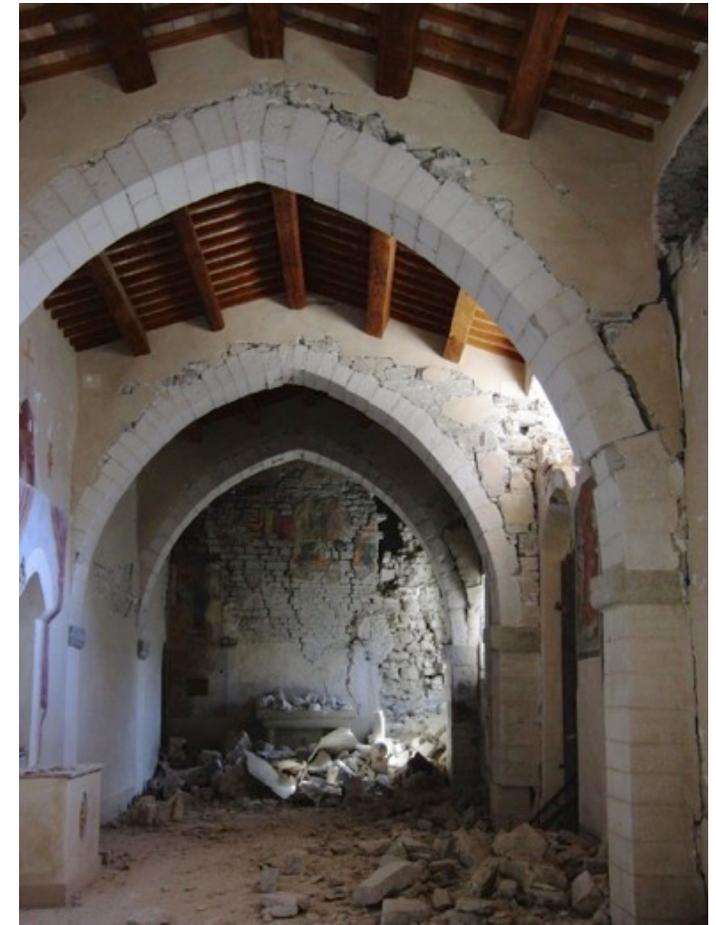
San Domenico, L'Aquila

Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi all'arco trionfale



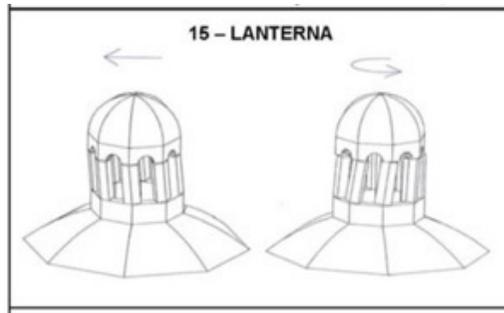
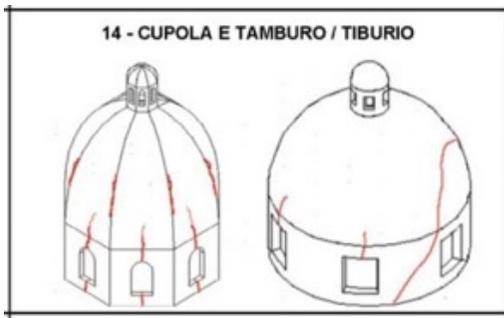
S. Pietro in Campo, Amatrice (RI)



San Martino, Castelsantangelo sul Nera (MC)

Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi alla cupola



Santa Gemma,
Goriano Sicoli (AQ)



Anime Sante, L'Aquila



Sant'Agostino, L'Aquila

Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi all'abside



Chiesa di San Giovanni Battista, Moglia (MN)

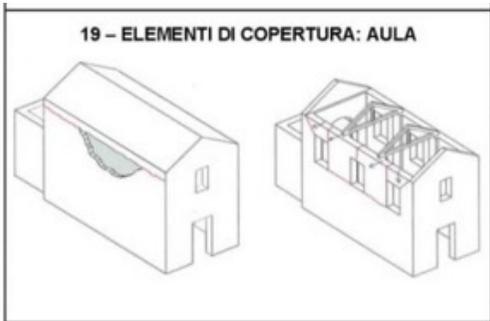


Chiesa di San Marco, L'Aquila



Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi alla copertura



San Martino, Buonacompra di Cento (FE)



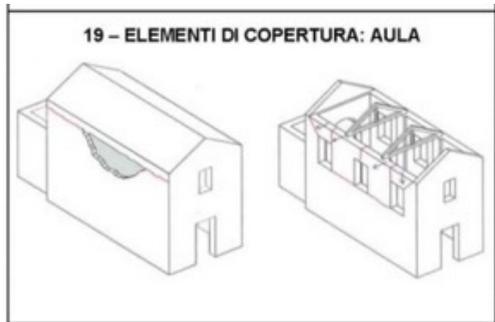
S. Stefano,
Novellara (RE)

S. Pietro in Campo, Amatrice (RI)



Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi alla copertura

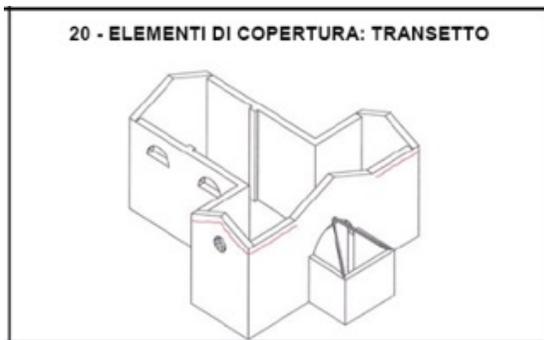


Duomo de L'Aquila: effetto di interventi in copertura



Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi alla copertura



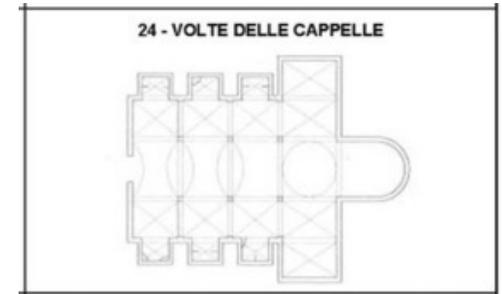
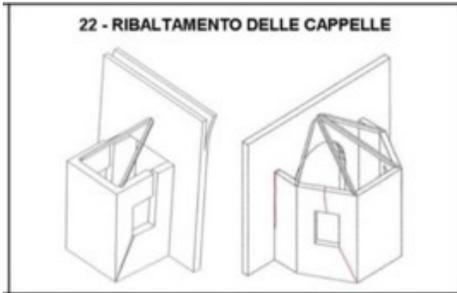
Duomo di San Massimo (AQ)



S. Pietro in Campo, Amatrice (RI)

Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi alle cappelle e corpi annessi



S. Maria Rio Sacro,
Acquacanina (MC)



S. Maria Castellare,
Castelsantangelo sul Nera (MC)

S. Maria di Piazza Alta, Sarnano (MC)



Meccanismi di collasso

Meccanismi relativi alle cappelle e corpi annessi



S. Giorgio, Valle Castellana (TE)

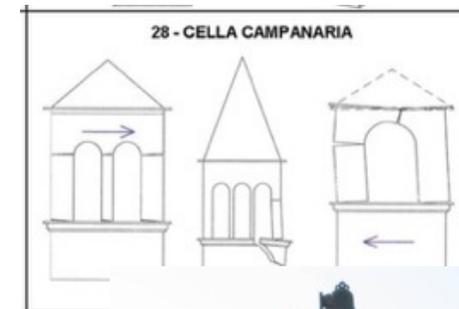
Chiesa di S. Lorenzo,
Clibbio (BS)



Meccanismi di collasso

Chiesa di San Michele e Chiesa Parrocchiale, Villa Sant'Angelo (AQ)

Meccanismi relativi a aggetti, torri e celle campanarie

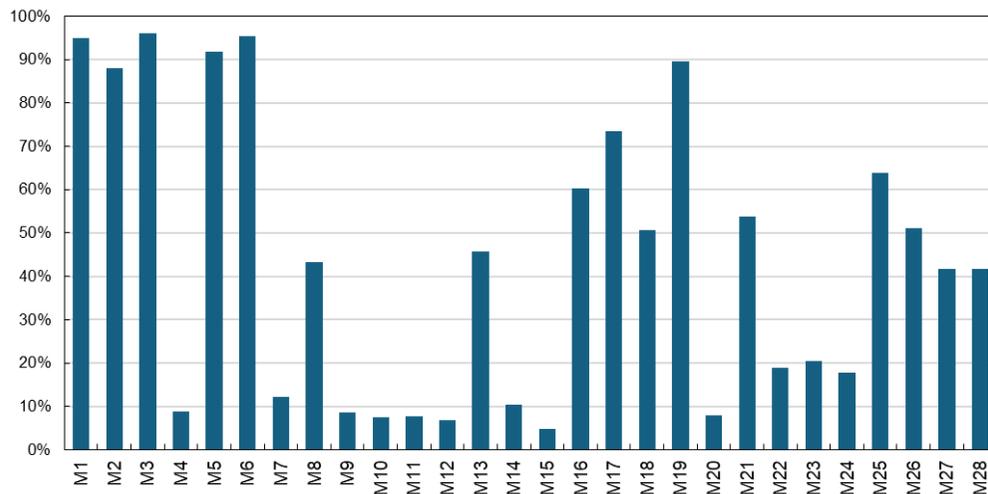


Elaborazioni da dati osservazionali

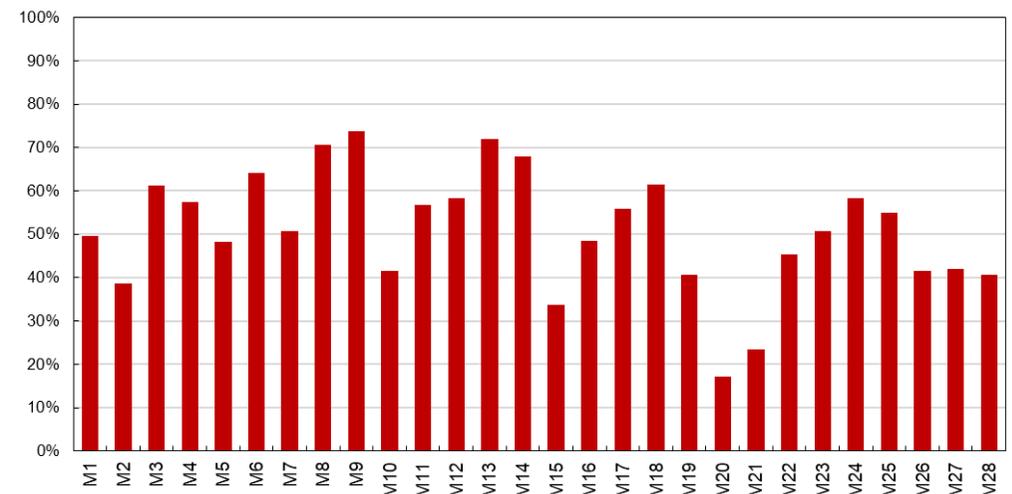
Attivabilità meccanismi di collasso

Database di 3280 chiese il cui danno è stato rilevato a seguito del sisma del Centro Italia 2016/17 (*DaDO Chiese – Eucentre*)

**Meccanismi potenzialmente attivabili
(da struttura della chiesa)**



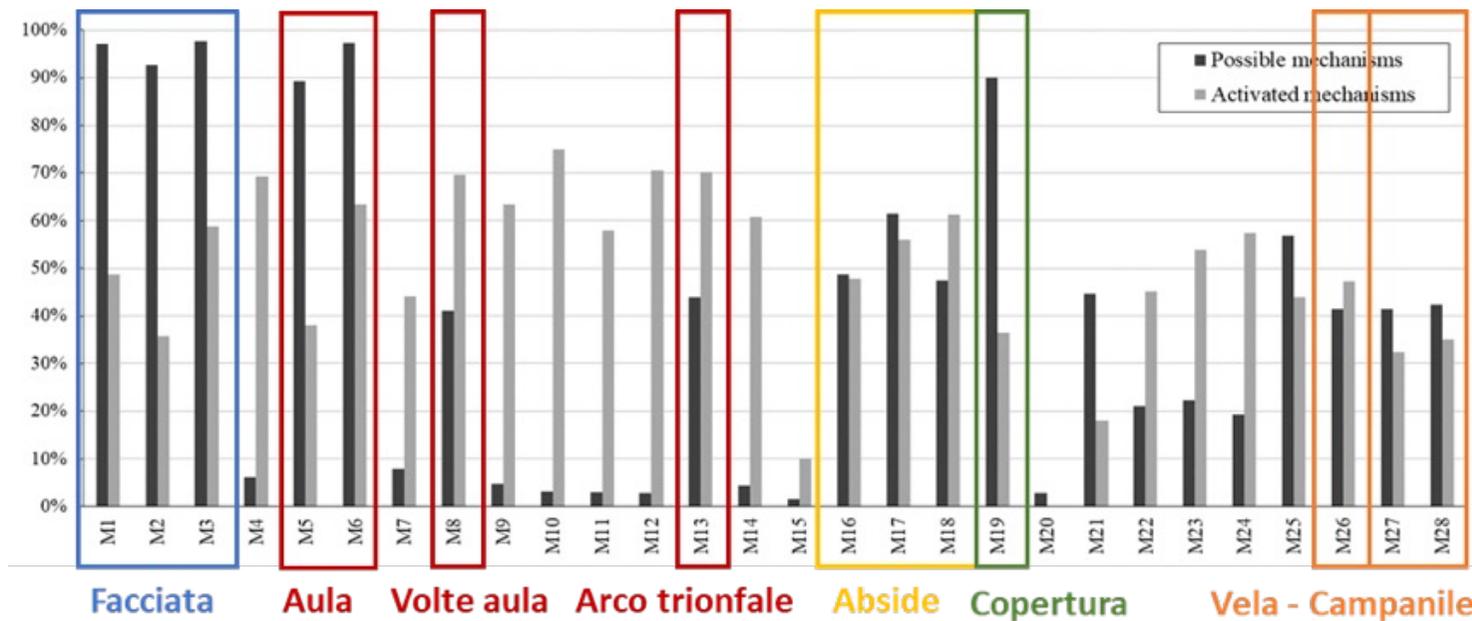
**Meccanismi attivati
(% su attivabili)**



Elaborazioni da dati osservazionali

Analisi di vulnerabilità svolta su chiese a pianta semplice a una navata

Database di 633 chiese il cui danno è stato rilevato a seguito del sisma del Centro Italia 2016/17



Possibili meccanismi maggiormente diffusi su cui sono state effettuate analisi di vulnerabilità

Elaborazioni da dati osservazionali

Analisi di vulnerabilità svolta su chiese a pianta semplice a una navata

Database di 633 chiese il cui danno è stato rilevato a seguito del sisma del Centro Italia 2016/17

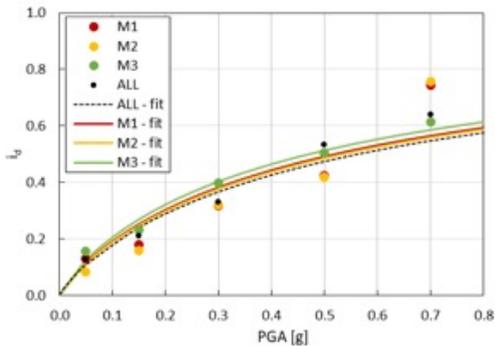
Facciata



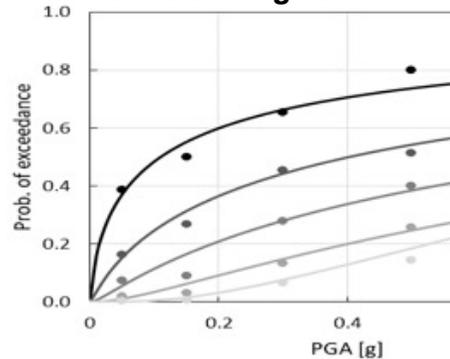
Osservazioni

- Vulnerabilità della facciata in linea con quella globale
- Meccanismo nel piano (M3: taglio) generalmente più vulnerabile di quello fuori piano (M1: ribaltamento)
- Fragilità: DS1-DS3 (danni moderati) globalmente più vulnerabili, DS4-DS5 (danni severi) rispecchiano vulnerabilità globale

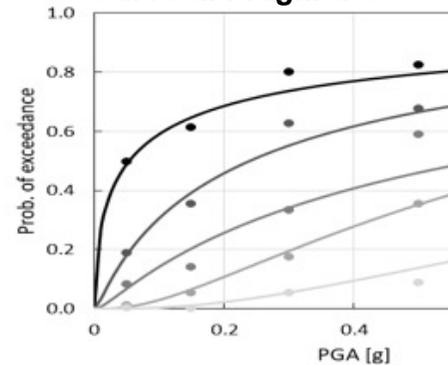
Curva di Vulnerabilità



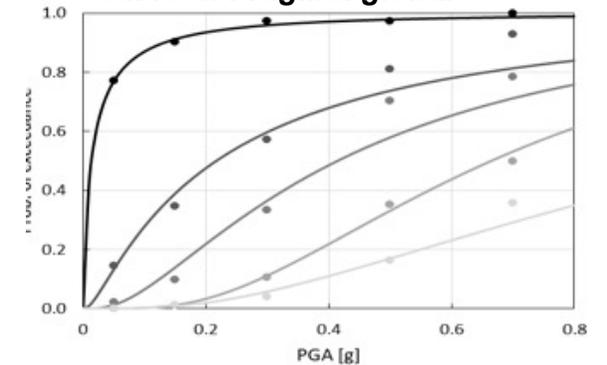
Curve di Fragilità M1



Curve di Fragilità M3



Curve di Fragilità globale

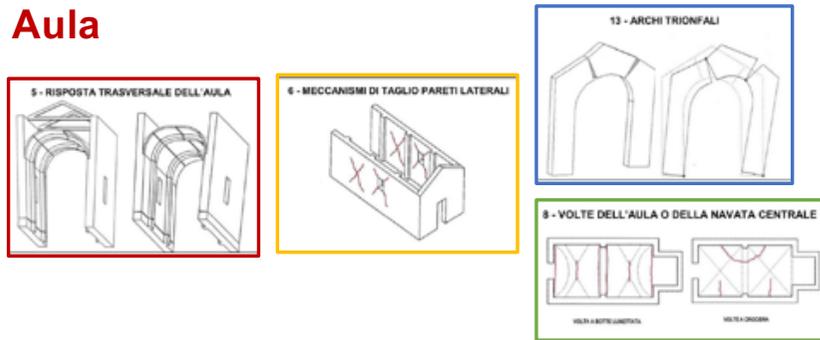


Elaborazioni da dati osservazionali

Analisi di vulnerabilità svolta su chiese a pianta semplice a una navata

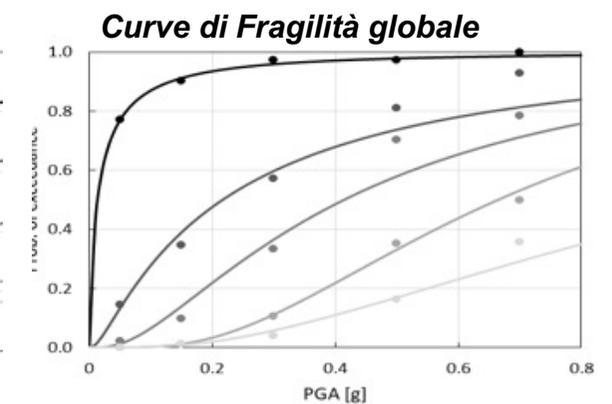
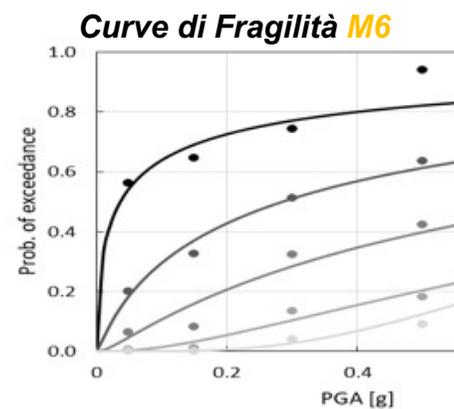
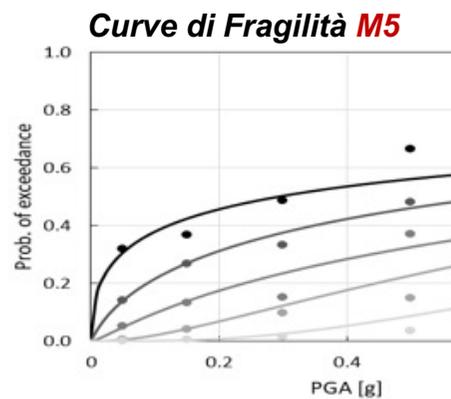
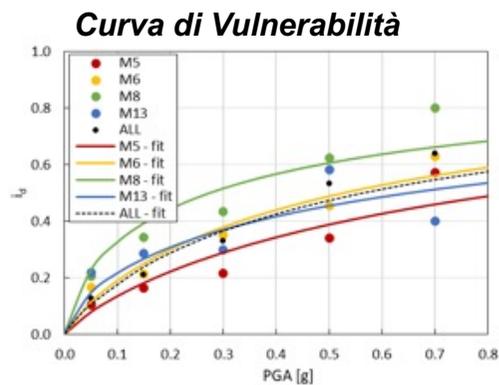
Database di 633 chiese il cui danno è stato rilevato a seguito del sisma del Centro Italia 2016/17

Aula



Osservazioni

- Vulnerabilità fuori piano dell'aula (M5) tendenzialmente minore di quella globale, mentre nel piano (M6) in linea con quella globale.
- Meccanismo M8 delle volte più vulnerabile dell'andamento globale



Elaborazioni da dati osservazionali

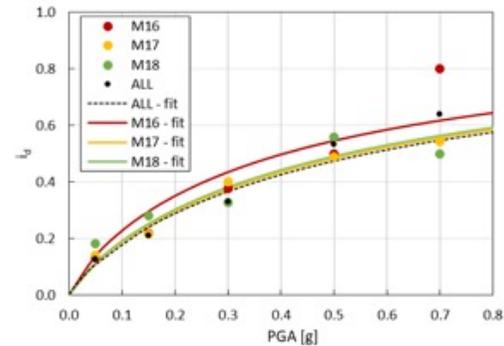
Analisi di vulnerabilità svolta su chiese a pianta semplice a una navata

Database di 633 chiese il cui danno è stato rilevato a seguito del sisma del Centro Italia 2016/17

Abside



Curva di Vulnerabilità



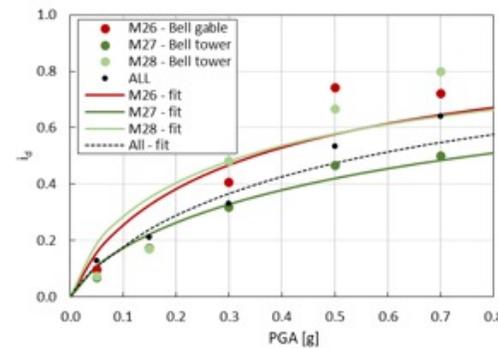
Osservazioni

- Vulnerabilità dell'abside in linea con quella globale

Torre campanaria



Curva di Vulnerabilità



- Vulnerabilità cella campanaria (M28) e vela campanaria (M26) maggiore di quella globale
- Vulnerabilità torre campanaria (M27) in linea con quella globale

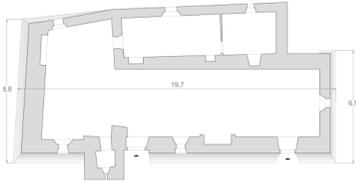
Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

- **OSSERVAZIONE SU SINGOLI CASI STUDIO (CREAZIONE SCHEDA RILEVAZIONE)**

ANAGRAFICA CHIESA ESAMINATA			
IDENTIFICAZIONE DEL BENE: (Nome, località, indirizzo)	Madonna della Maina, Vallinfante, comune di Castelsantangelo sul Nera (MC)		
Coordinate GPS Longitudine	13.1793100	Coordinate GPS Latitudine	42.8903100
Anno/periodo di costruzione	XVII secolo - Ultima trasformazione circa 2000		

DESCRIZIONE CASO STUDIO	
DESCRIZIONE SOMMARIA CHIESA:	 <p>Chiesa di piccole dimensioni a una navata (10,00m x 5,00m) con abside coperto da volta a botte ribassata. Presenta una facciata a doppio spiovente (altezza 4,50m) in cui, oltre all'apertura principale, sono presenti tre finestre, due ai lati dell'entrata, e una posta al di sopra di essa. La copertura è costituita da travi lignee e tavelle con cappe in cls. È presente una vela campanaria in corrispondenza della facciata.</p>

ANAGRAFICA CHIESA ESAMINATA			
IDENTIFICAZIONE DEL BENE: (Nome, località, indirizzo)	San Giovanni Battista, Macchie, comune di Castelsantangelo sul Nera (MC)		
Coordinate GPS Longitudine	13.1805000	Coordinate GPS Latitudine	42.8958500
Anno/periodo di costruzione	XVI secolo		

DESCRIZIONE CASO STUDIO	
DESCRIZIONE SOMMARIA CHIESA:	 <p>La chiesa presenta una geometria regolare, composta da una navata a L di lunghezza 20,00m e larghezza 6,00m-8,50m. All'aula è annessa su un lato una piccola sacrestia. La copertura è a capriate (5 in totale) e travi lignee con tavelle. Le facciate, così come la parete laterale principale (est) presentano una forma trapezoidale di notevoli dimensioni che fungono da contrafforti.</p> 

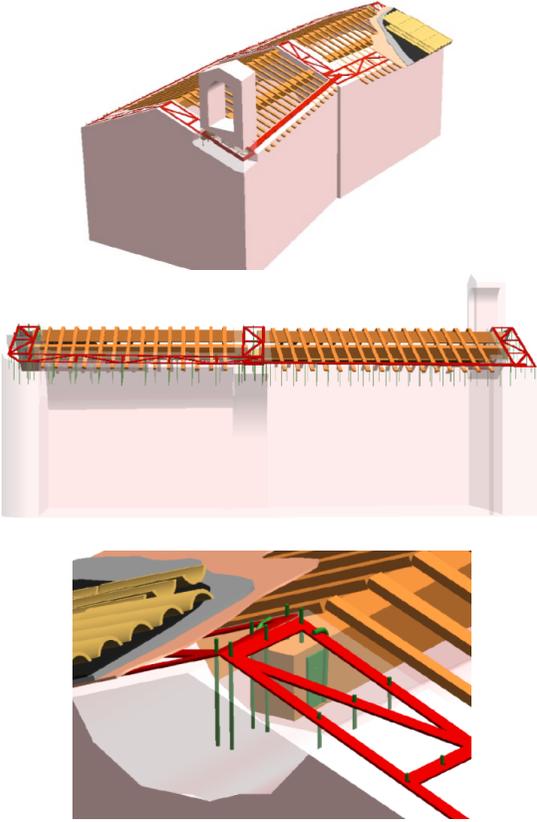
ANAGRAFICA CHIESA ESAMINATA			
IDENTIFICAZIONE DEL BENE: (Nome, località, indirizzo)	San Sebastiano, Castelsantangelo sul Nera (MC)		
Coordinate GPS Longitudine	13.1537579	Coordinate GPS Latitudine	42.8940477
Anno/periodo di costruzione	XVI secolo (1580) - Ultima trasformazione circa 2000		

DESCRIZIONE CASO STUDIO	
DESCRIZIONE SOMMARIA CHIESA:	 <p>Chiesa di piccole dimensioni annessa ad un complesso di fabbricati di civile abitazione. Presenta una struttura a navata unica (8,20m x 5,90m) con abside di forma semicircolare (raggio di 3,00m) e due ambienti laterali annessi: una cappella (4,30m x 3,60m) e una sagrestia. Un primo arco a tutto sesto scandisce la navata in due campate, mentre un secondo arco trionfale delimita la zona presbiteriale, coronata da una semicupola. La cappella laterale presenta una volta a botte ribassata. La facciata è di forma quadrangolare (altezza 9,00m) con un rosone di forma semicircolare posto al di sopra del portone d'ingresso. La copertura è lignea e si presenta con due puntoni spingenti in facciata. Non è presente nessun tipo di struttura campanaria.</p>

Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

- **OSSERVAZIONE SU SINGOLI CASI STUDIO (CREAZIONE SCHEDA RILEVAZIONE)**

CHIESE ANALIZZATE MEDIANTE SCHEDA DI OSSERVAZIONE DEI DANNI	2
2.2.1 S. Francesco, Tolentino -MC- (POLIMI)	2
2.2.2 S. Salvatore in Acquapagana -MC- (POLIMI)	3
2.2.3 Santa Maria nuova, Tolentino -MC- (POLIMI)	4
2.2.4 Chiesa di Santa Scolastica, Norcia -PG- (UNICT)	4
2.2.5 Chiesa di Santo Stefano, Nottoria -PG- (UNICT).....	5
2.2.6 Chiesa di San Giovanni Battista, San Severino Marche (MC) – (UNINA).....	6
2.2.7 Chiesa di Santa Croce, San Severino Marche (MC) – (UNINA).....	6
2.2.8 Chiesa di Santa Maria Assunta, San Severino Marche (MC) – (UNINA).....	7
2.2.9 Chiesa di San Giovanni Evangelista, San Severino Marche (MC) – (UNINA).....	7
2.2.10 Chiesa di San Martino dei Gualdesi, Castelsantangelo sul Nera (MC) – (UniPDb/ITC-CNR).....	8
2.2.11 San Sebastiano, Castelsantangelo sul Nera (MC) – (UniPDb/ITC-CNR)	9
2.2.12 San Martino, Gualdo, Castelsantangelo sul Nera (MC) – (UniPDb/ITC-CNR).....	9
2.2.13 San Vittorino, Nocria, Castelsantangelo sul Nera – (UniPDb/ITC-CNR)	10
2.2.14 Santa Lucia, Rapegna, Castelsantangelo sul Nera (MC) – (UniPDb/ITC-CNR).....	11
2.2.15 Santo Stefano, Castelsantangelo sul Nera (MC) – (UniPDb/ITC-CNR)	12
2.2.16 Madonna della Maina, Vallinfante, Castelsantangelo sul Nera (MC) – (UniPDb/ITC-CNR)	13

SCHEMA DELL'INTERVENTO	
EVENTUALI RILEVAZIONI SVOLTE DALLA UR IN SITO / COMMENTI SULL'INTERVENTO	La soletta in cls. ha permesso alla copertura di non venire danneggiata, ma il cordolo metallico con le relative barre iniettate ha portato la muratura di entrambe le pareti laterali a lesionarsi orizzontalmente in corrispondenza della terminazione di queste ultime.

Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

- OSSERVAZIONE SULLA BASE DI DaDo

ID		NOME		CATEGORIA		MATERIALE		STATO		DANNI		INTERVENTI		OBSERVAZIONI		RIFERIMENTI	
NUMERO	PROVINCIA	COMUNE	INDICAZIONE	CLASSE	TECNOLOGIA	STATO	TECNOLOGIA	STATO	TECNOLOGIA	STATO	TECNOLOGIA	STATO	TECNOLOGIA	STATO	TECNOLOGIA	STATO	TECNOLOGIA
202101-01	AV	Castellana Grotte	Chiesa di S. Maria	1	Cemento	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
202101-02	AV	Castellana Grotte	Chiesa di S. Maria	1	Cemento	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
202101-03	AV	Castellana Grotte	Chiesa di S. Maria	1	Cemento	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
202101-04	AV	Castellana Grotte	Chiesa di S. Maria	1	Cemento	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
202101-05	AV	Castellana Grotte	Chiesa di S. Maria	1	Cemento	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

1. COPERTURA
LATERO
CEMENTO



2. COPERTURA
ACCIAIO



3. RIFACIMENTO
TETTO IN
LEGNO



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

TIRANTI – PASSIVI

Tiranti sempre efficaci

Analisi di possibili miglioramenti nella progettazione



S. Maria Assunta – San Severino

TIRANTI – ATTIVI

Tiranti che contrastano le spinte di archi e che hanno dimostrato di essere sempre efficaci



S. Salvatore in Acquapagana -MC-

COPERTURE PESANTI

Le coperture pesanti non mostrano miglioramenti del comportamento o quasi sempre rendono più debole la struttura.



S. Scolastica Norcia - PG-



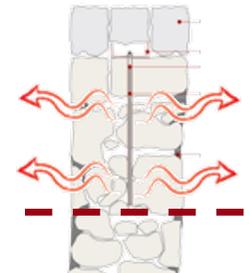
S. Martino, Gualdo, CSN

CORDOLATURE

Problematiche emerse da valutare

1. Continuità della cordolatura
2. Rigidezza flessionale
3. Connessione con la muratura sottostante.

Efficacia collegata a diverse questioni da valutare tutte contemporaneamente



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

TIRANTI – PASSIVI ✓

Nelle totalità delle chiese osservate hanno mostrato di essere molto efficaci e di contrastare i meccanismi.

S. Maria Assunta – San Severino



! Una limitazione dell'efficacia si osserva con interassi ampi

S. Sebastiano – CSN



S. Giovanni E. – San Severino



TIRANTI – ATTIVI ✓

contenimento delle spinte e migliore risposta sismica nel piano dell'arco.

S. Pietro, Vallinfante CSN -MC-



S. Salvatore in Acquapagana -MC-

Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

COPERTURE PESANTI

Coperture troppo rigide e pesanti hanno sortito effetti dannosi o in altri casi non hanno risolto le vulnerabilità intrinseche per le quali erano stati progettati rilevandosi quindi **inefficaci** o talvolta **dannosi**.

S. Martino, Gualdo, CSN



S. Scolastica Norcia - PG-



S. Stefano, Nottoria - PG-



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

CORDOLATURE

La presenza del cordolo in c.a. pare aver giocato un ruolo positivo nel trattenimento delle parti mentre in altri casi tale valutazione sembra essere opposta.

Le cordolature «leggere» fatte con profili metallici o barre di armatura nel cordolo sembrano avere un effetto mitigante e di trattenimento ed essere pertanto **efficaci**

Santo Stefano, CSN - MC -



San Vittorino, Nocria, CSN - MC -



Madonna della Maina, Vallinfante, CSN - MC -



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

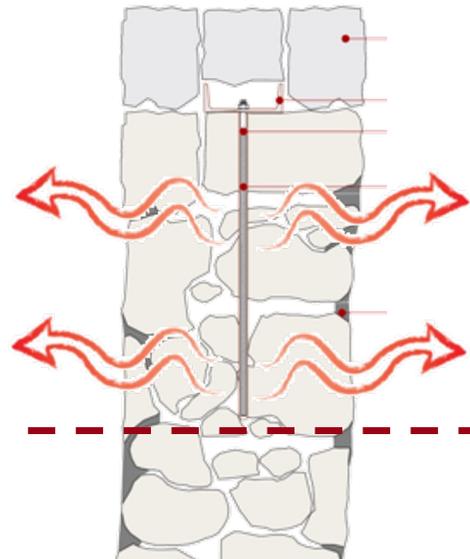
CORDOLATURE

Il danneggiamento di cordoli, anche leggeri fatti in posizione centrale e con connettori in profondi porta ad osservare alcune questioni:

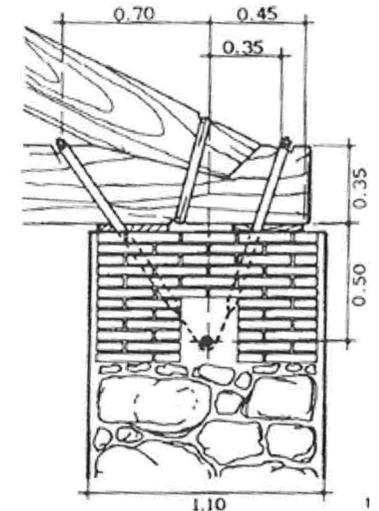
- l'esecuzione è importante e molto spesso le barre verticali nella muratura risultano **prive di adesivo**
- la barra centrale sembra sortire più un effetto **separatore** della muratura
- Parrebbe più auspicabile un approccio alla Giuffré per trattenere il muro.



San Martino dei Gualdesi, CSN



Antonio Giuffré
Leggendo il libro delle antiche
architetture



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

CORDOLATURE

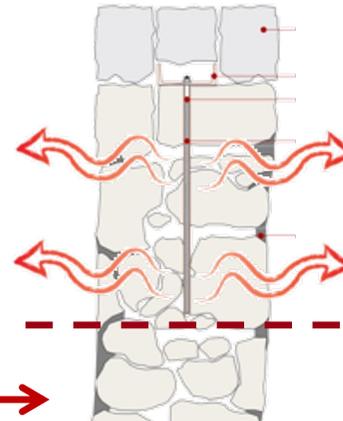
1) Continuità della cordolatura



2) Rigidezza flessionale

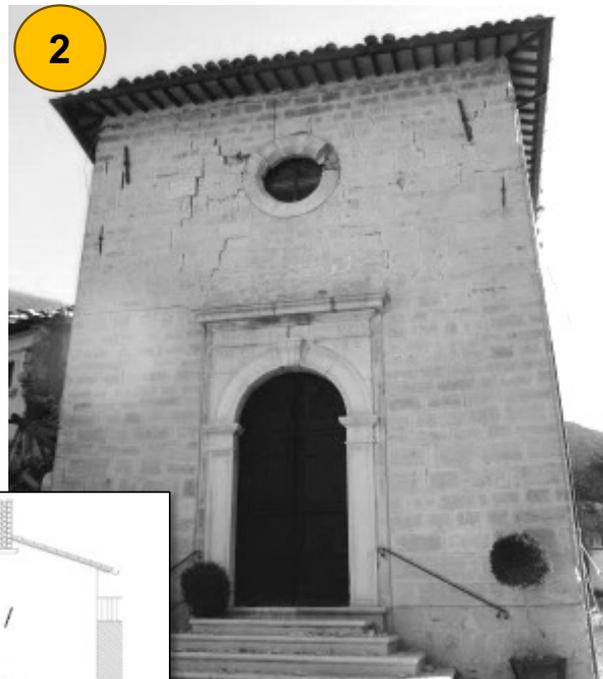


3) Connessione con la muratura sottostante

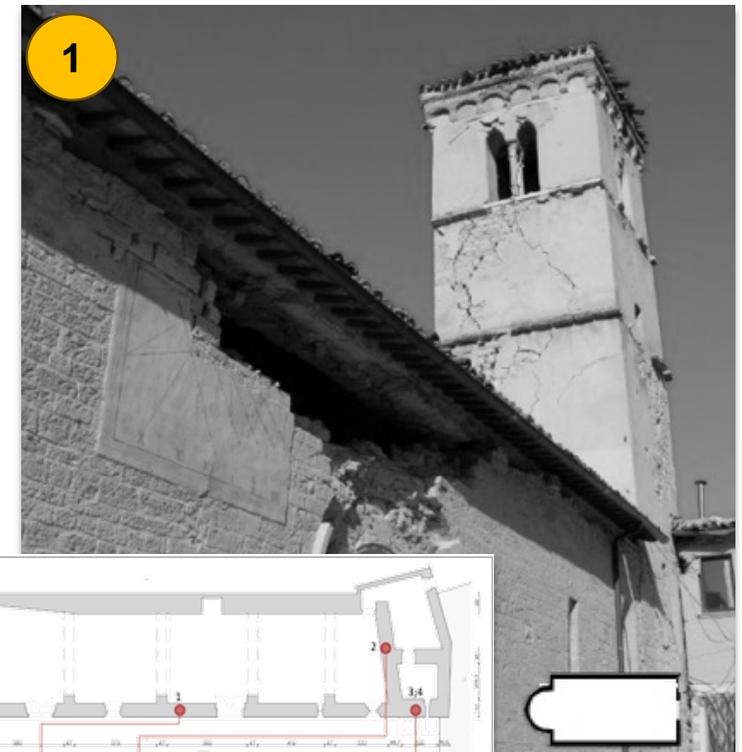
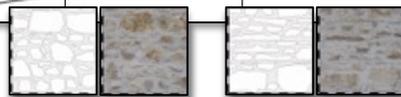
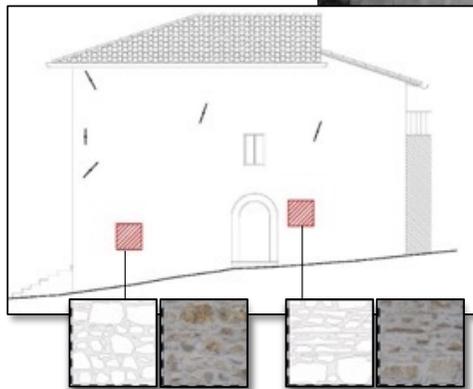


Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

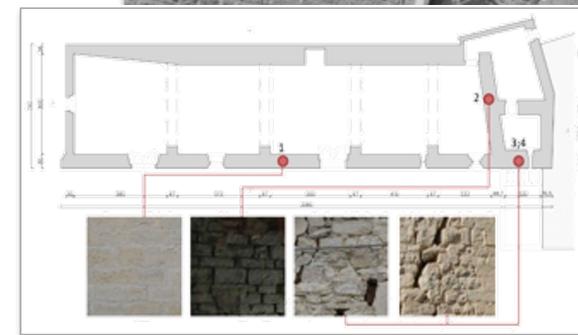
MODELLAZIONE NUMERICA



San Sebastiano, Castel Sant'Angelo sul Nera



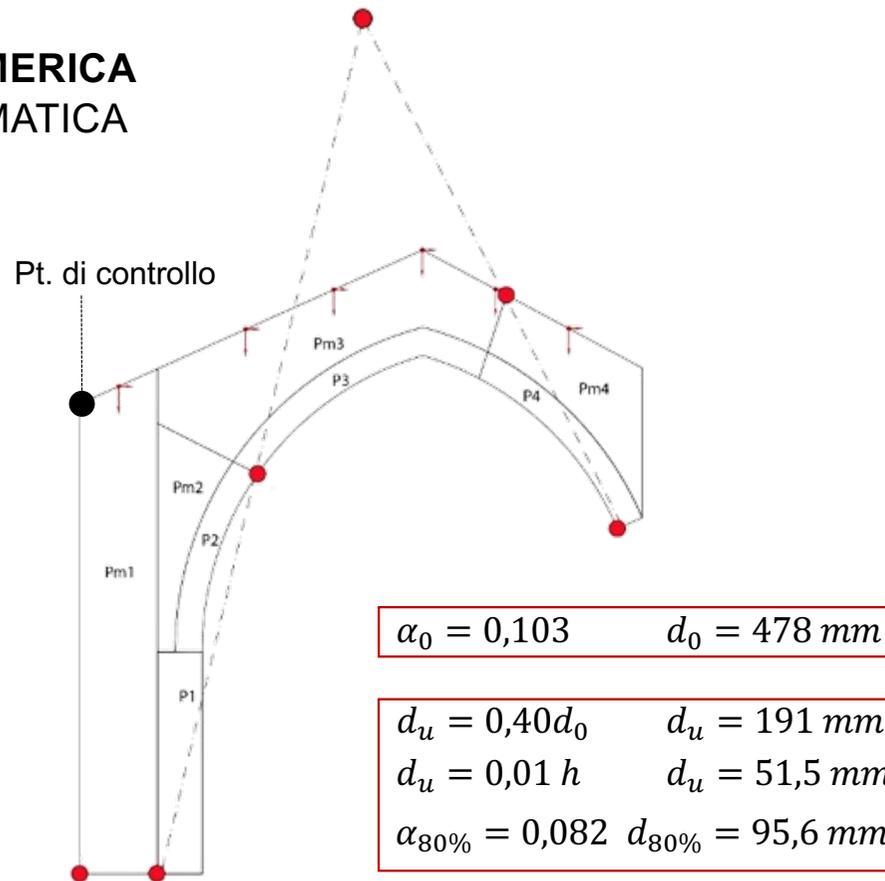
San Martino dei Gualdesi, Castel Sant'Angelo sul Nera



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

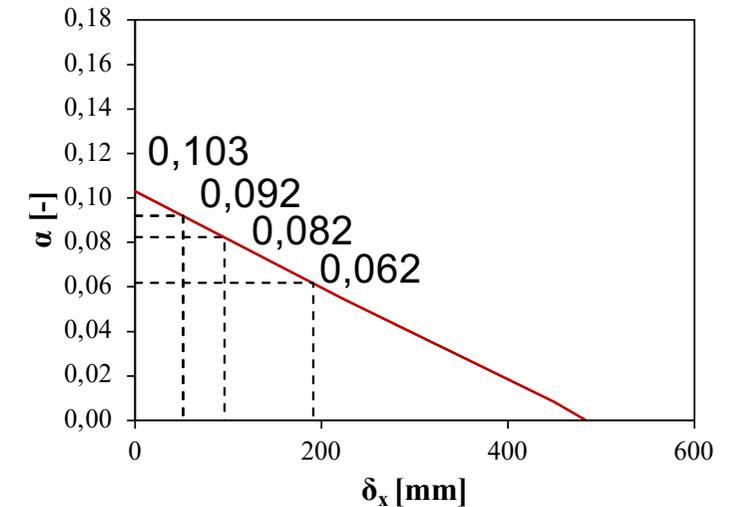
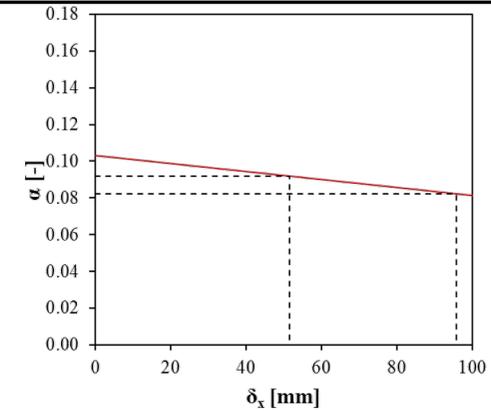
MODELLAZIONE NUMERICA

➤ ANALISI CINEMATICA



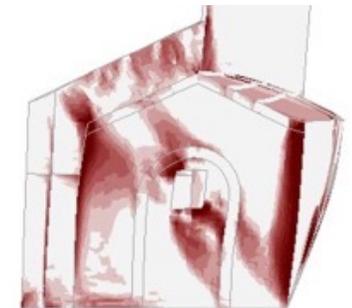
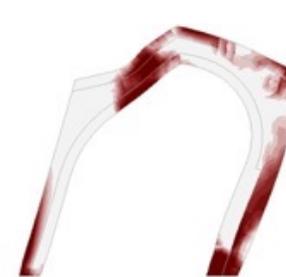
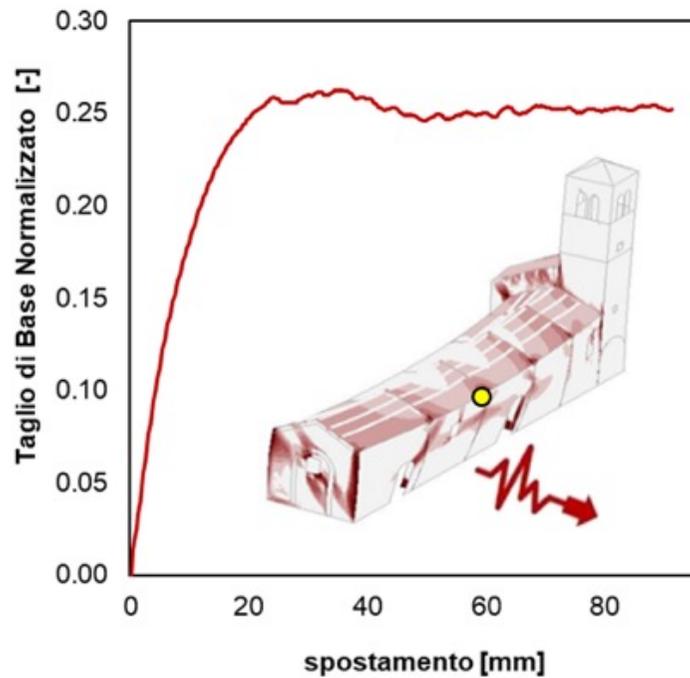
San Martino dei Gualdesi, Castel Sant'Angelo sul Nera

1



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

➤ MODELLO NON RINFORZATO



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

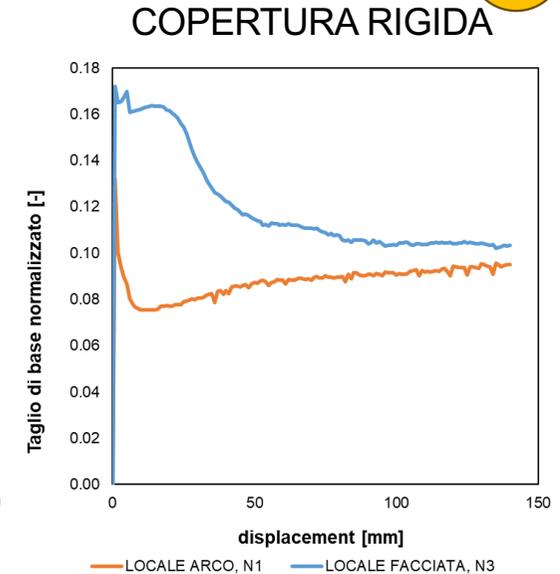
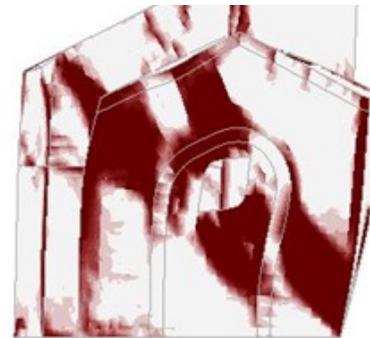
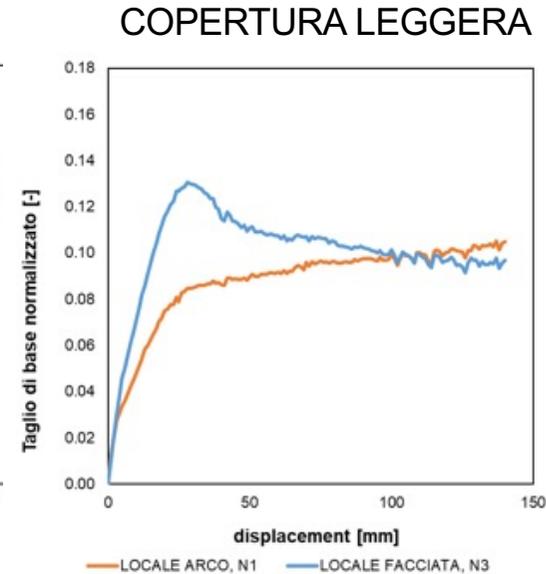
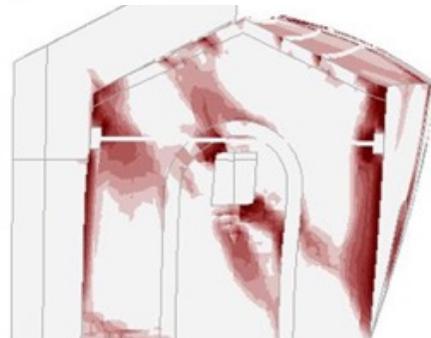
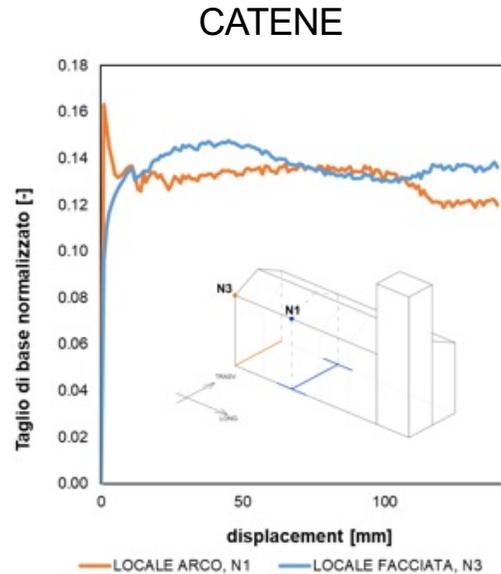
San Martino dei Gualdesi, Castel Sant'Angelo sul Nera

1

➤ MODELLO NON RINFORZATO

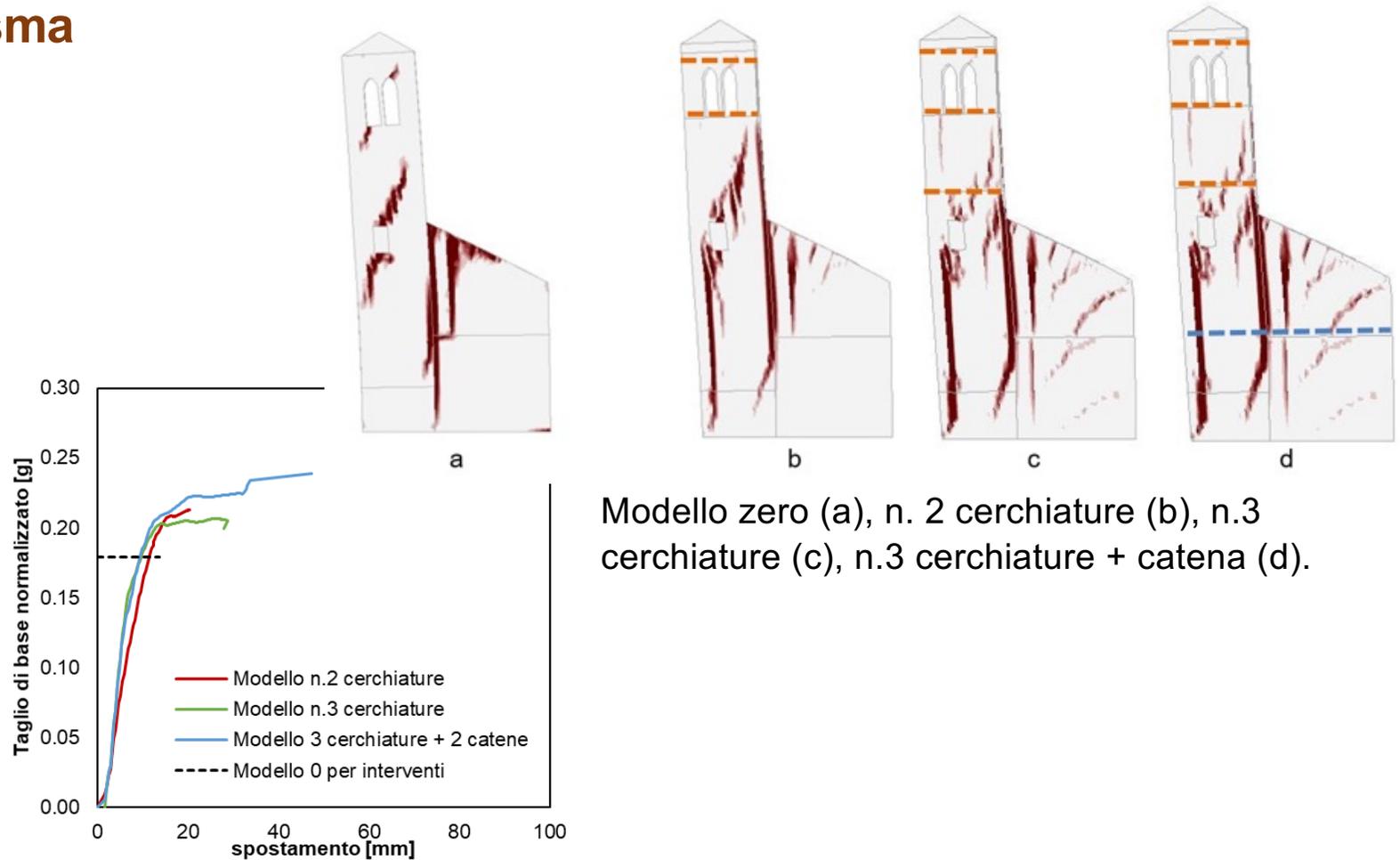
➤ **MODELLO RINFORZATO:**
CATENE,
COPERTURA LEGGERA,
COPERTURA PESANTE

Confronto della percentuale di taglio agente totale su ciascun elemento all'avanzare dell'analisi.



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

- MODELLO NON RINFORZATO
- **MODELLO RINFORZATO:**
CERCHIATURE
CELLA
CAMPANARIA

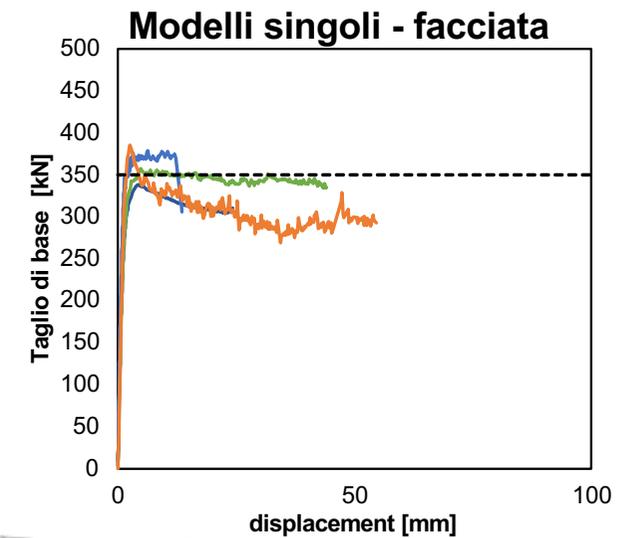
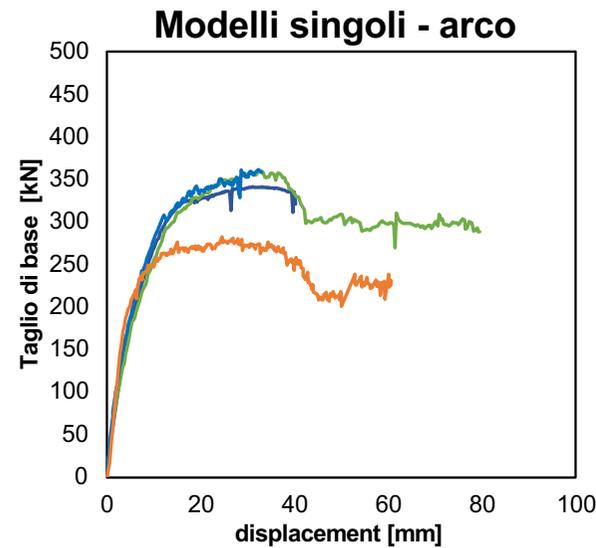
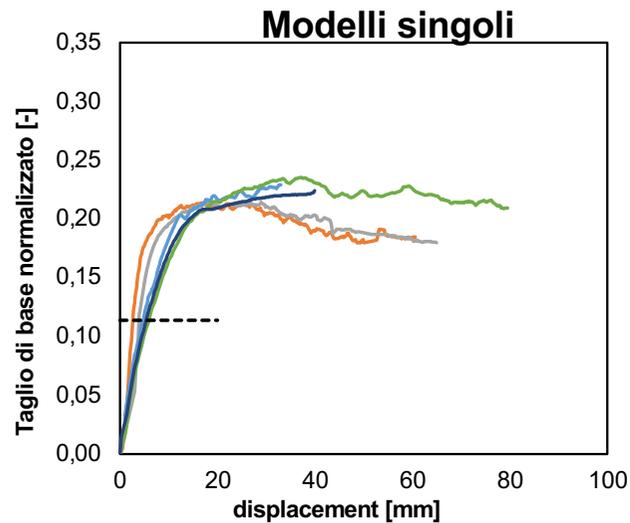


Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

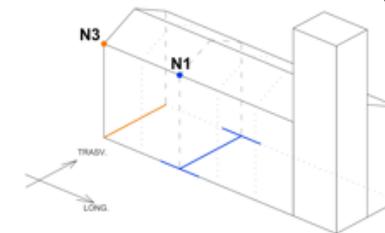
San Martino dei Gualdesi, Castel Sant'Angelo sul Nera

1

➤ CONFRONTI TRA I MODELLI

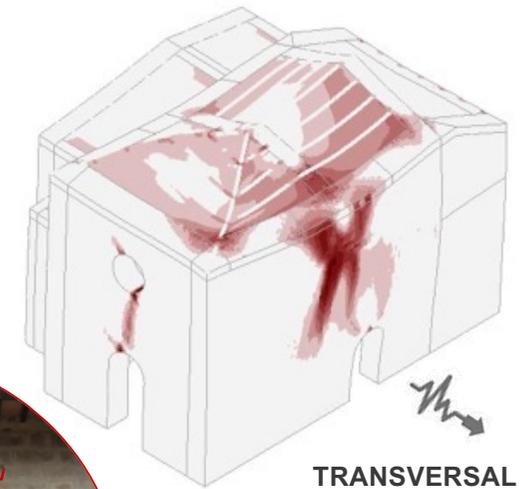
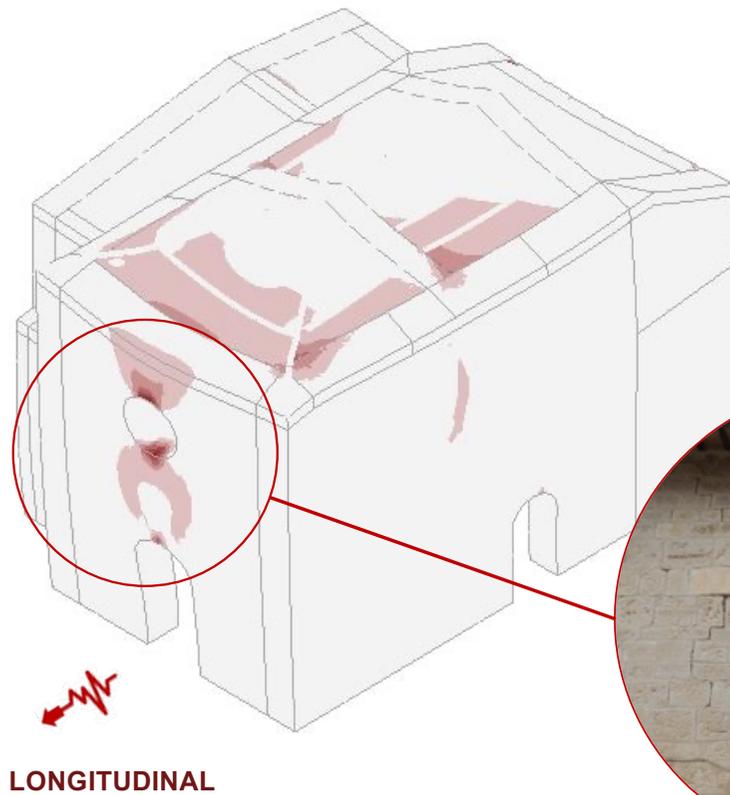
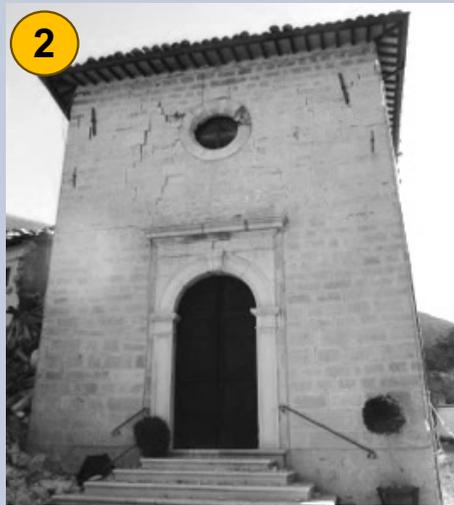


- Rigida
- Meno rigida
- Iniezioni
- Catene
- Cordolo e cerchiature
- - - Mod. 0



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

➤ MODELLO NON RINFORZATO



EI
1.00e-03
8.75e-04
7.50e-04
6.25e-04
5.00e-04
3.75e-04
2.50e-04
1.25e-04
0.00e+00



San Sebastiano, Castel Sant'Angelo sul Nera

2

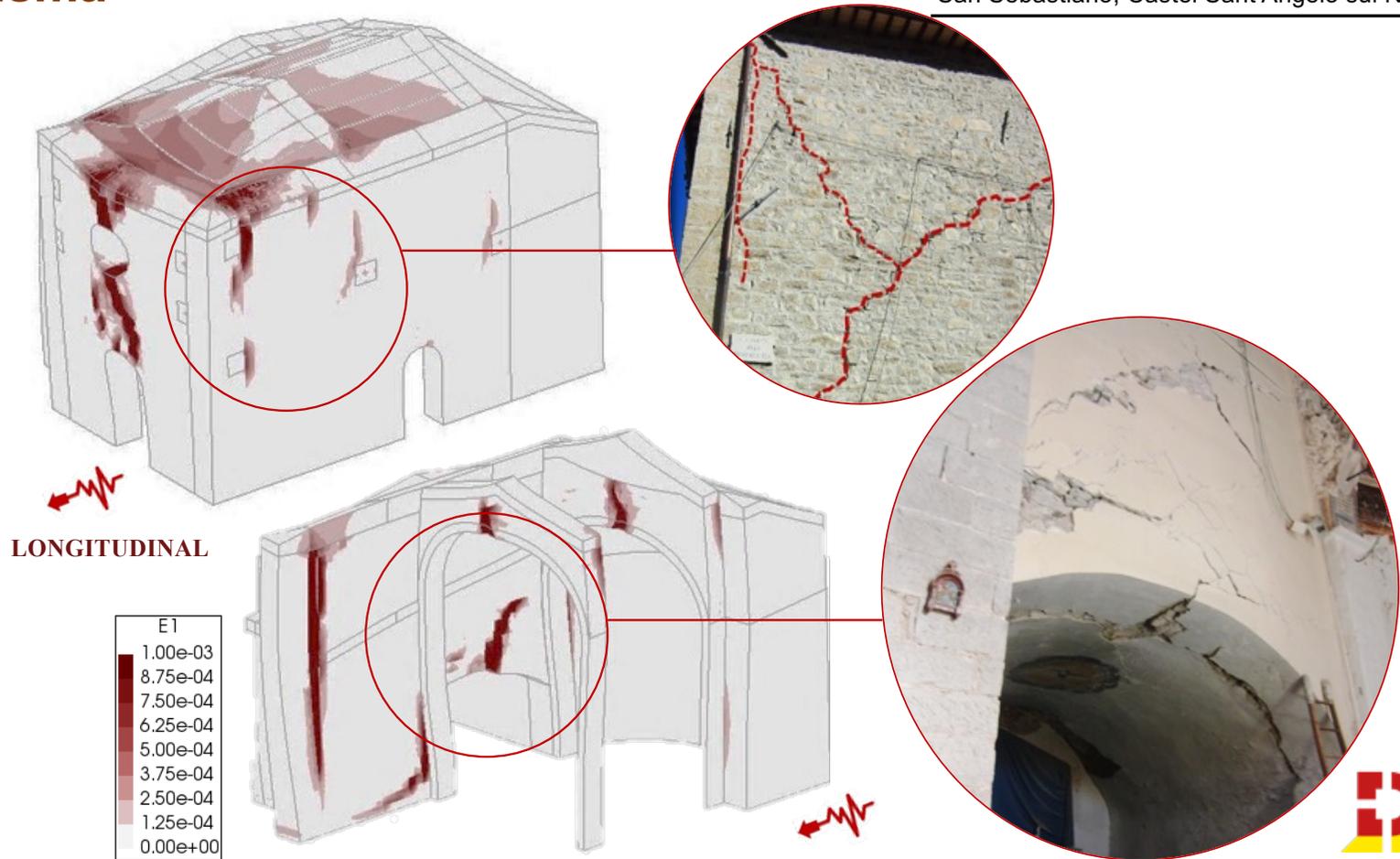
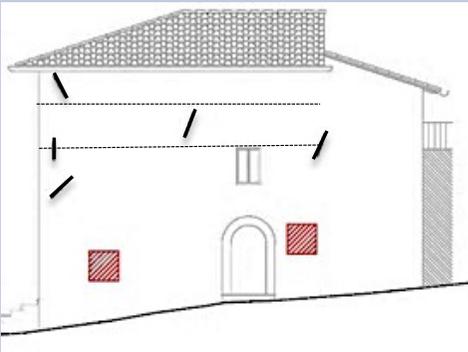
Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

San Sebastiano, Castel Sant'Angelo sul Nera

2

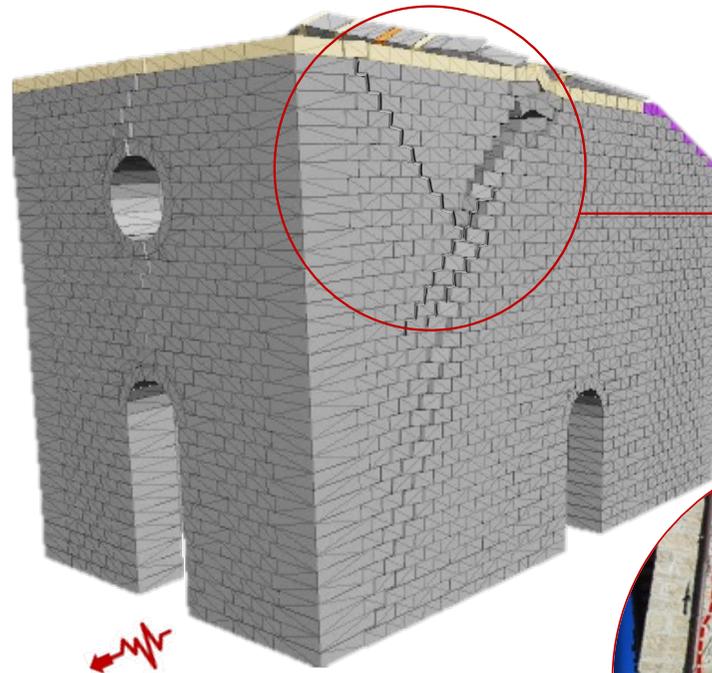
➤ MODELLO NON RINFORZATO

➤ **MODELLO RINFORZATO: CATENE**



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

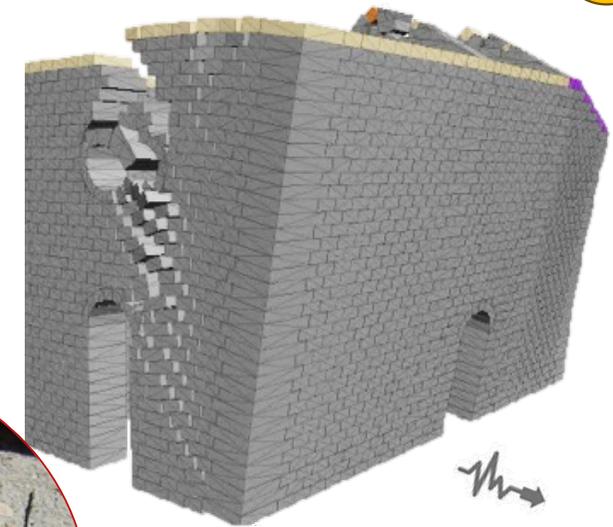
➤ MODELLO NON RINFORZATO



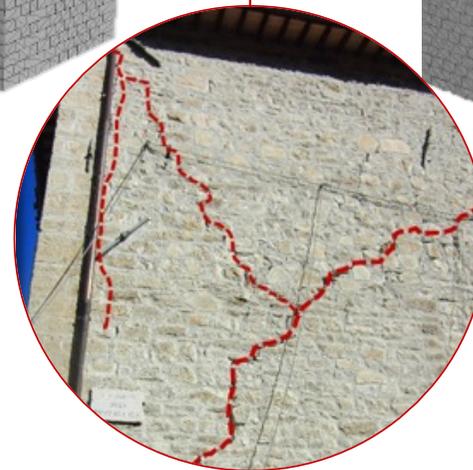
LONGITUDINAL

San Sebastiano, Castel Sant'Angelo sul Nera

2

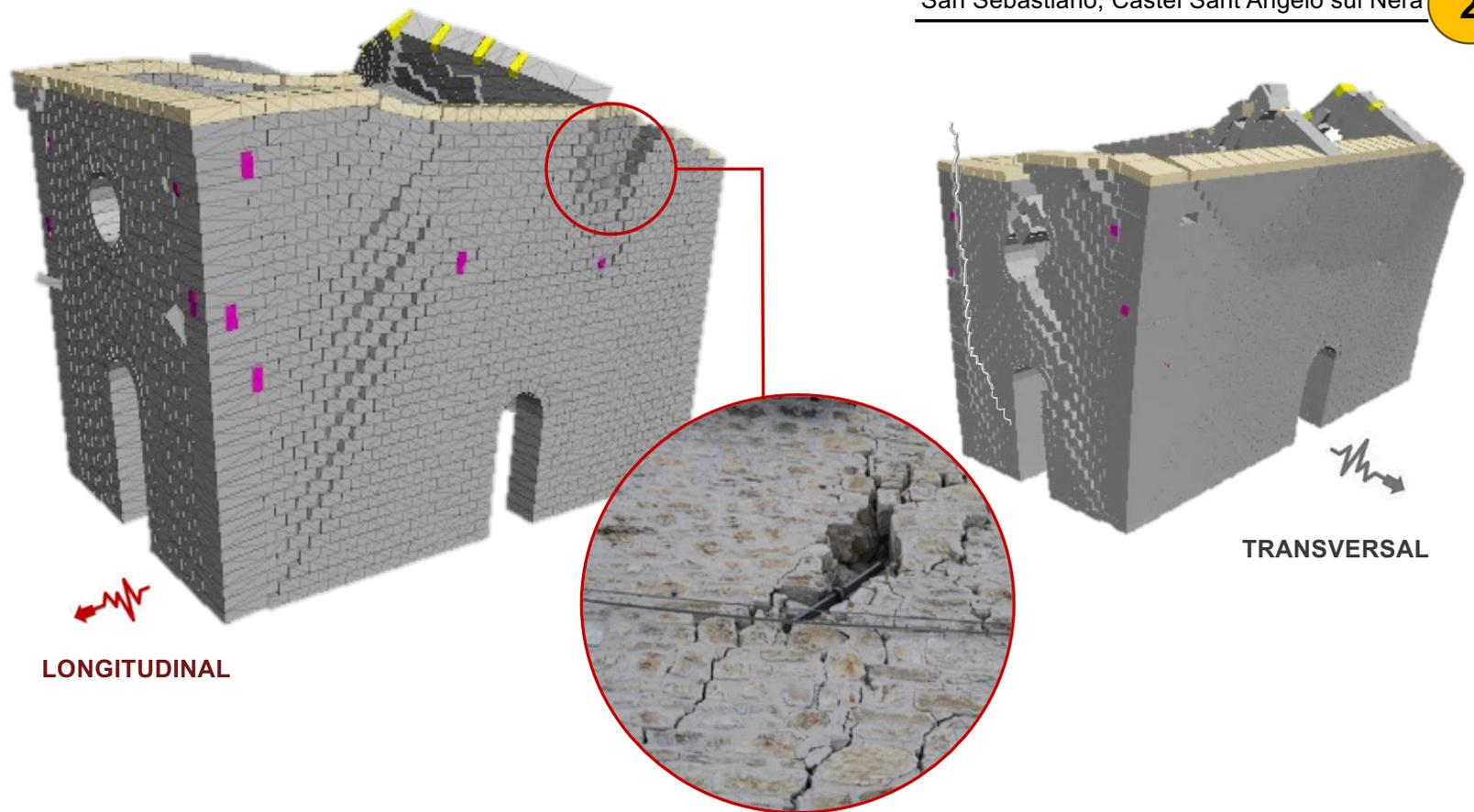
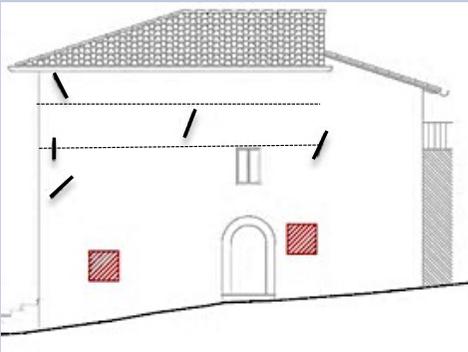


TRANSVERSAL



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

- MODELLO NON RINFORZATO
- **MODELLO RINFORZATO: CATENE**



San Sebastiano, Castel Sant'Angelo sul Nera

2

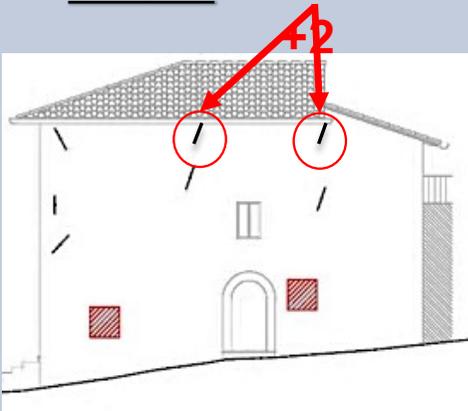
Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

San Sebastiano, Castel Sant'Angelo sul Nera

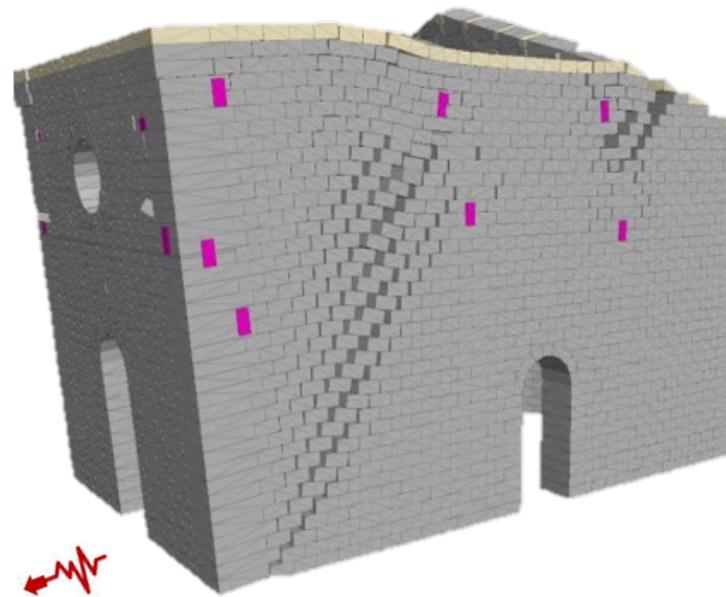
2

➤ MODELLO NON RINFORZATO

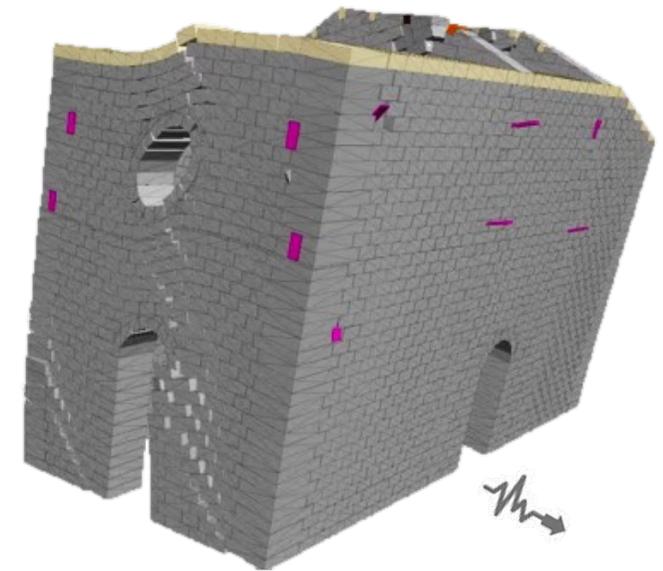
➤ MODELLO RINFORZATO: catene



L'inserimento delle catene aggiuntive inibisce il meccanismo di flessione ma attiva il meccanismo di ribaltamento fuori piano della parete longitudinale.



LONGITUDINAL



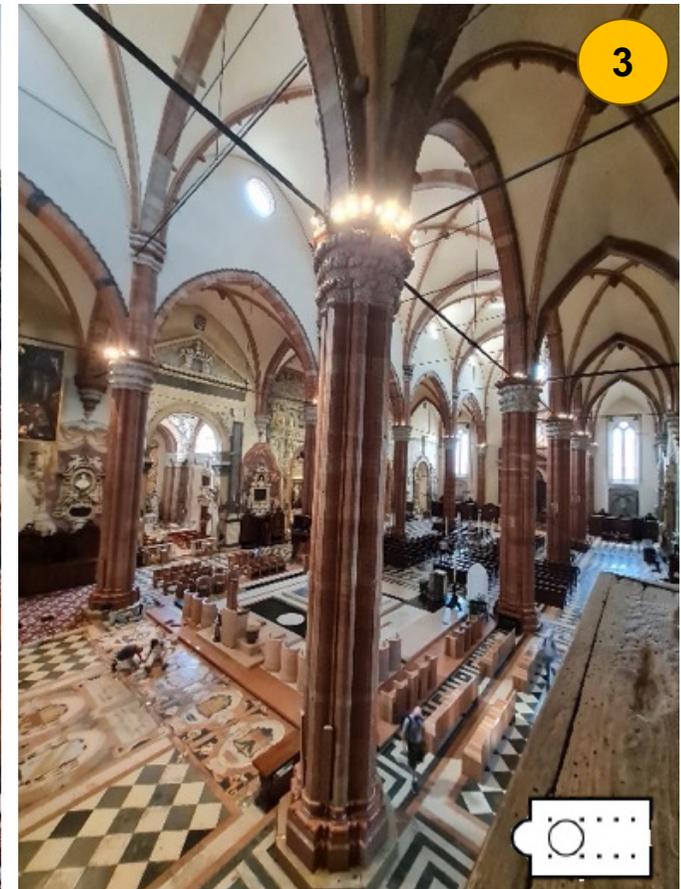
TRANSVERSAL

Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

MODELLAZIONE NUMERICA



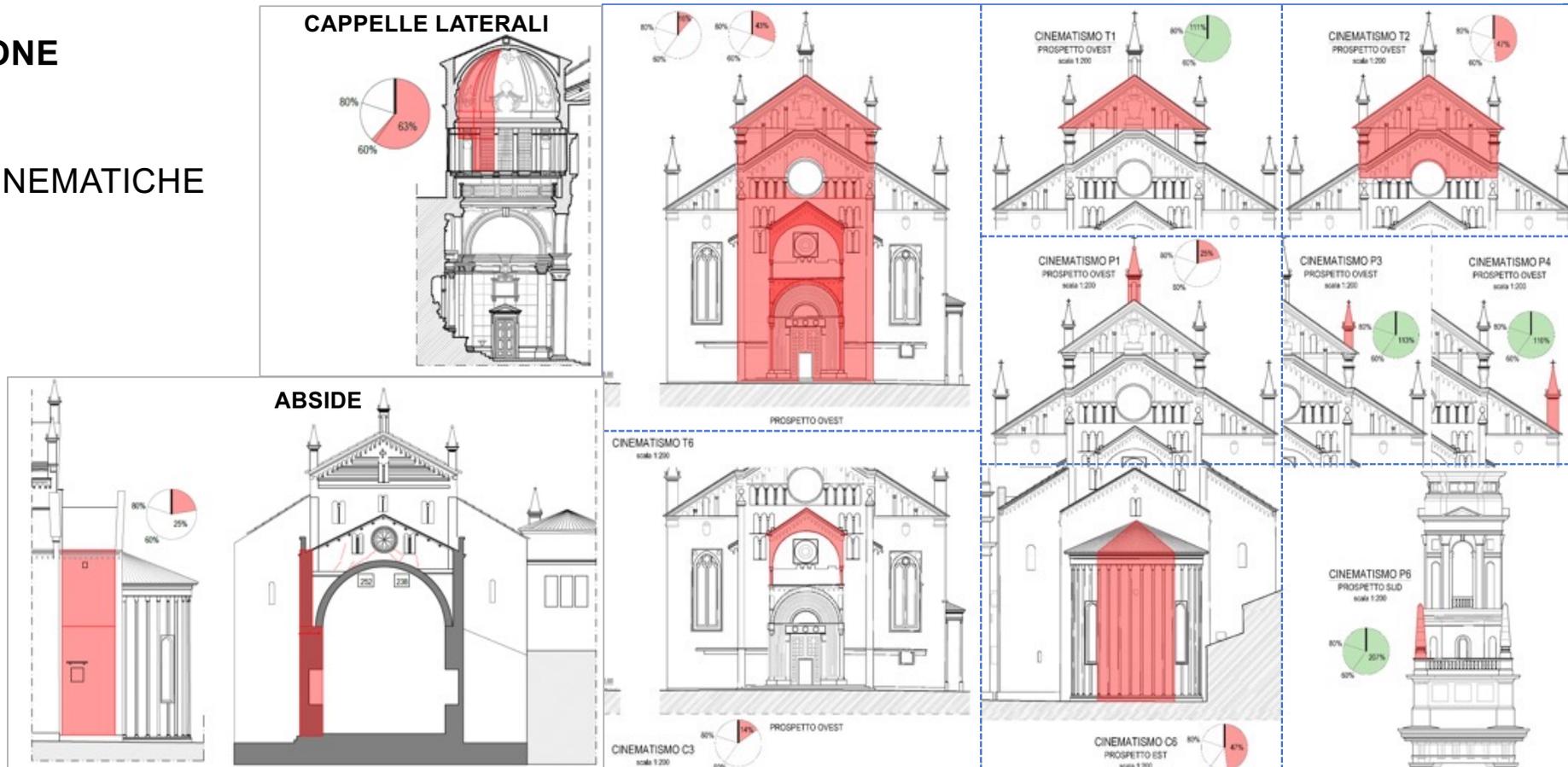
Cattedrale di Santa Maria Assunta, Verona



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

MODELLAZIONE NUMERICA

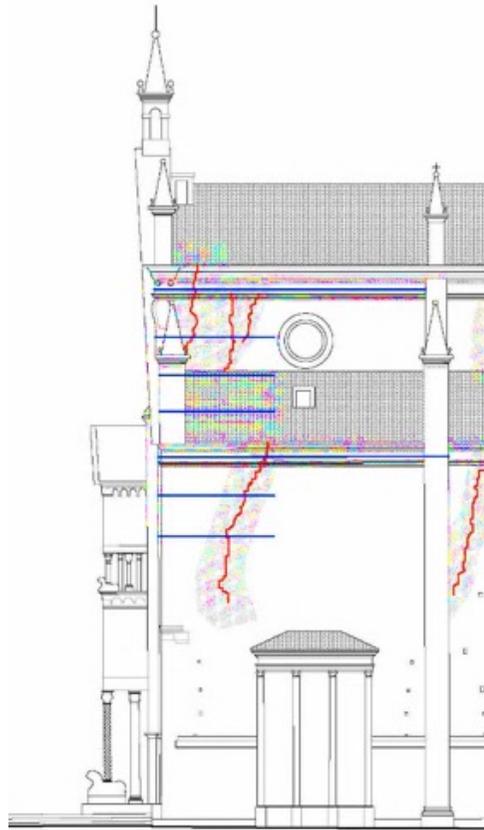
➤ ANALISI CINEMATICHE



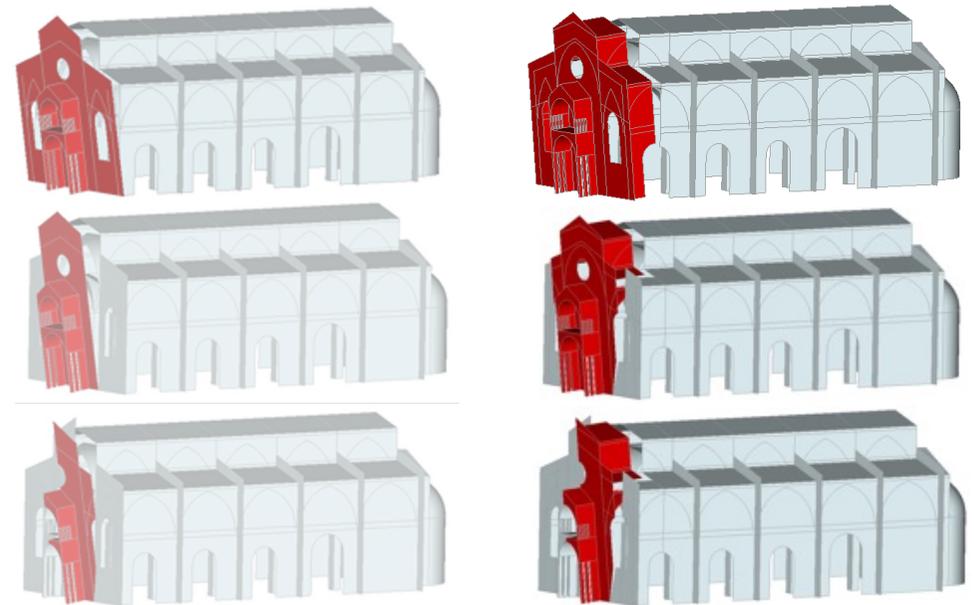
Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

MODELLAZIONE NUMERICA

➤ ANALISI CINEMATICHE

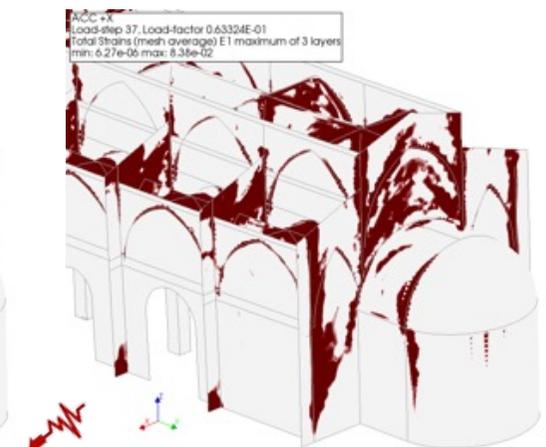
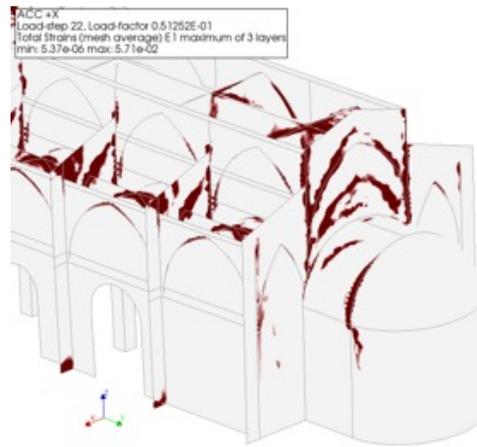
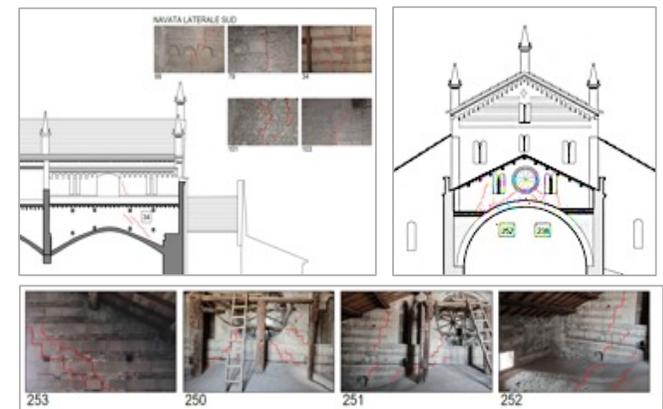
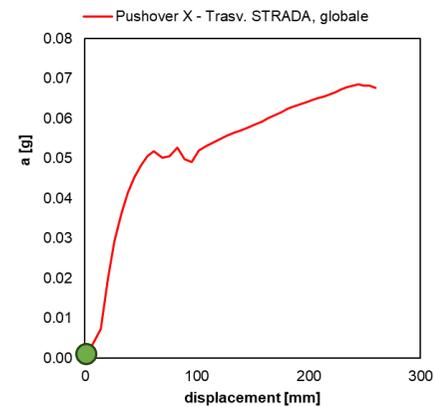
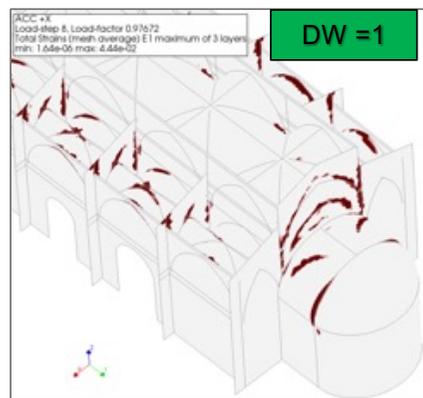


MACROELEMENTO	α	SLV		
		$a_{g,CAPACITA'}$	$a_{g,SLV}$	Verifica
Ci // L Ci	لا	لا	يو	نعم <input type="checkbox"/>
Ci // L Ci	ى	ى	يو	و <input type="checkbox"/>
Ci // L Ci	ي	ي	يو	نعم <input type="checkbox"/>
Ci // L Ci \square t wh \square wh لله	و	ى	يو	ي <input type="checkbox"/>
Ci // L Ci \square t wh \square wh لله	ى	ي	يو	نعم <input type="checkbox"/>



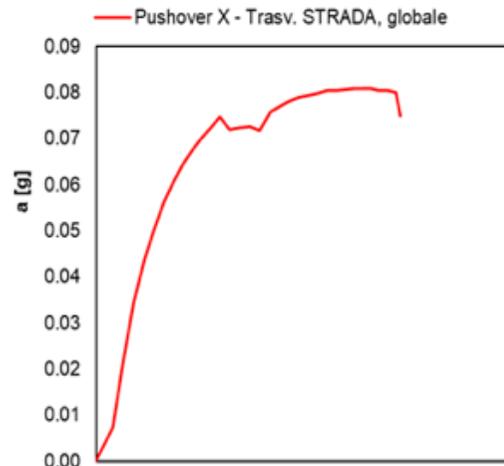
Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

MODELLO NON RINFORZATO

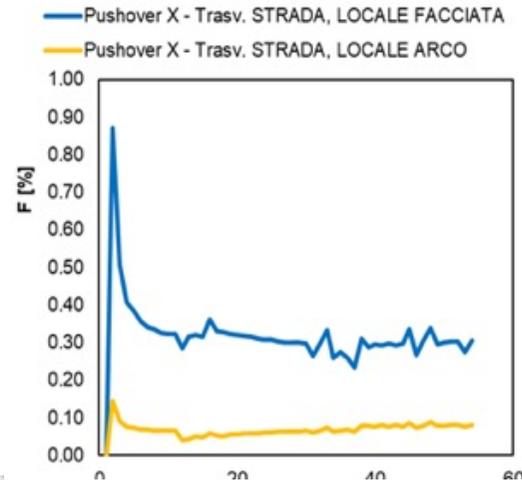


Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

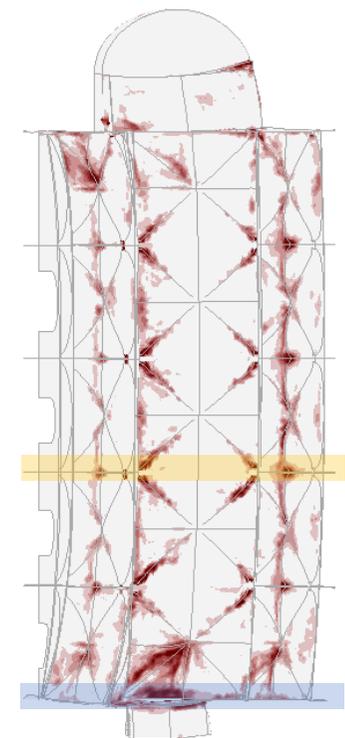
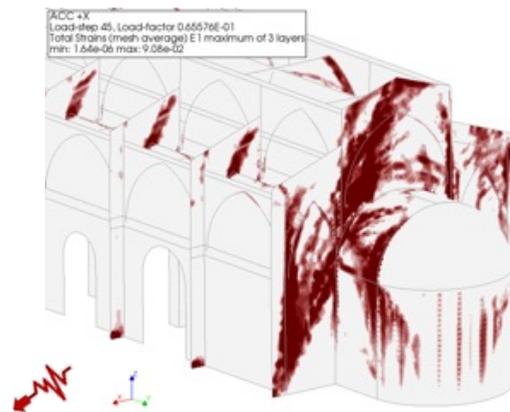
- MODELLO NON RINFORZATO
- **MODELLO RINFORZATO: COPERTURA**



ACC +X
 Load-step 45, Load-factor 0.65576E-01
 Total Strains (mesh average) E1 maximum of 3 layers
 min: 1.64e-06 max: 9.08e-02

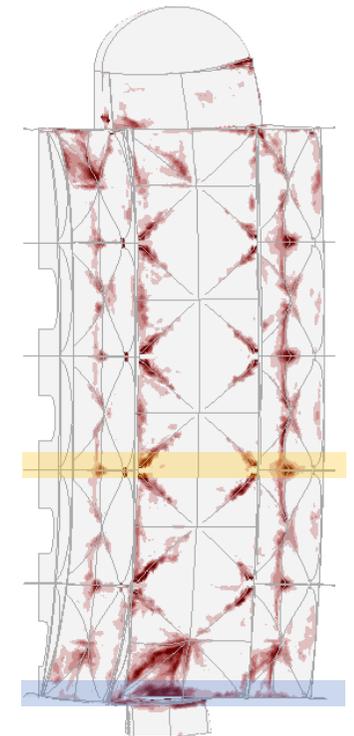
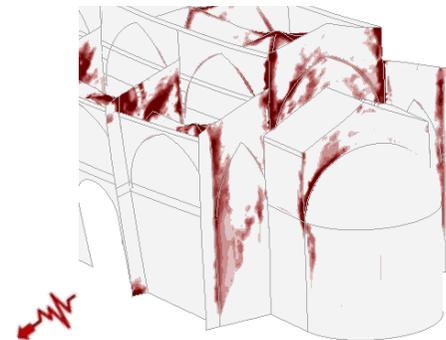
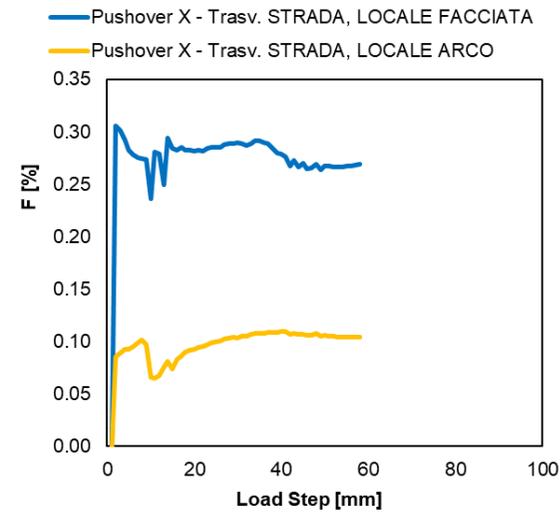
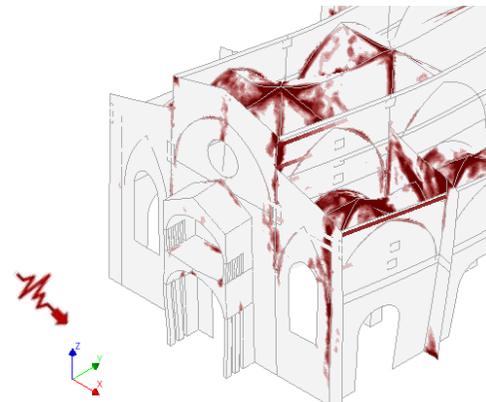
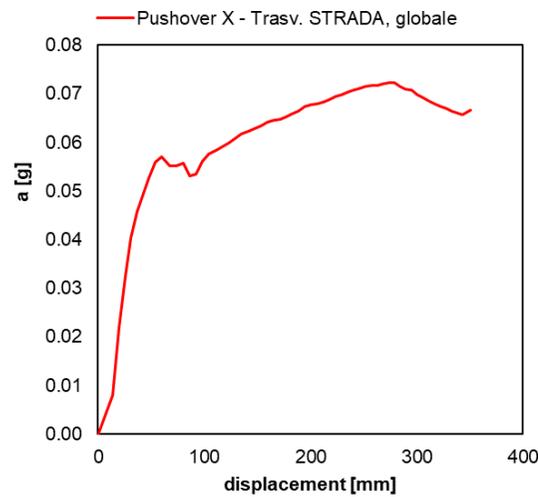


ACC +X
 Load-step 45, Load-factor 0.65576E-01
 Total Strains (mesh average) E1 maximum of 3 layers
 min: 1.64e-06 max: 9.08e-02



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

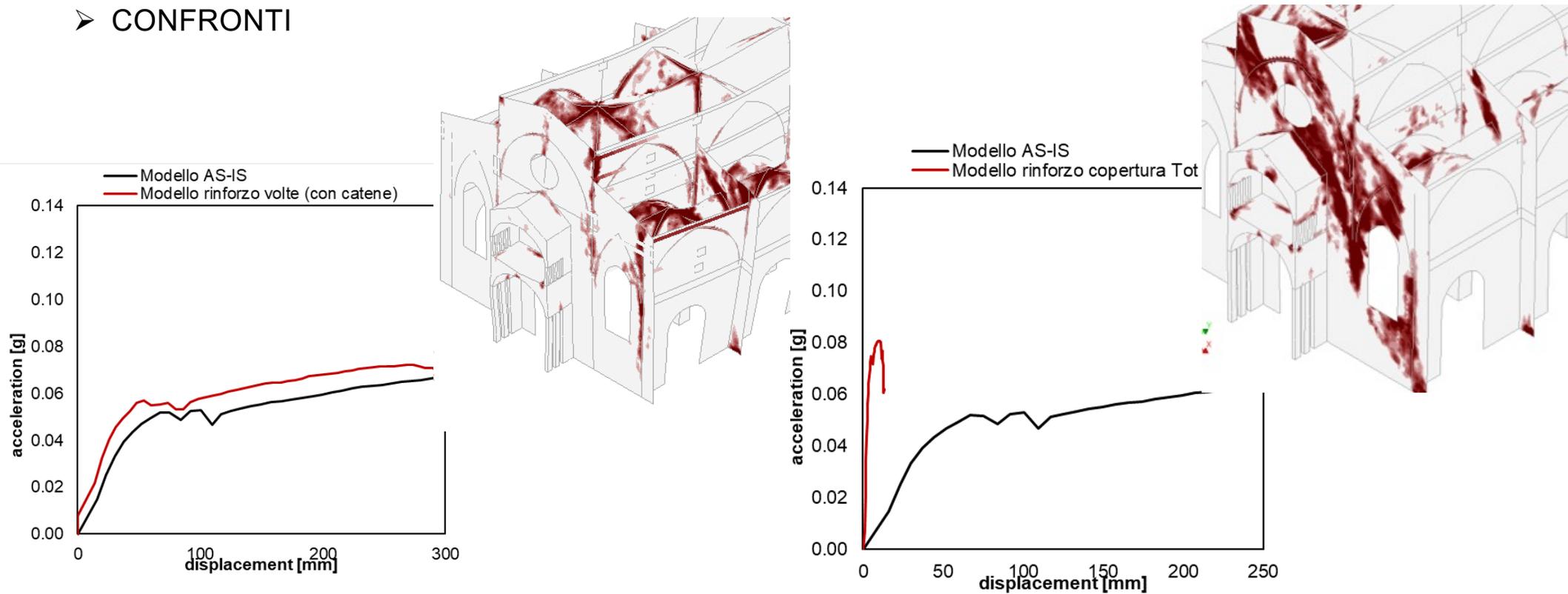
- MODELLO NON RINFORZATO
- **MODELLO RINFORZATO: VOLTE**



Valutazione danneggiamenti ed effetti degli interventi su chiese danneggiate da sisma

MODELLAZIONE NUMERICA

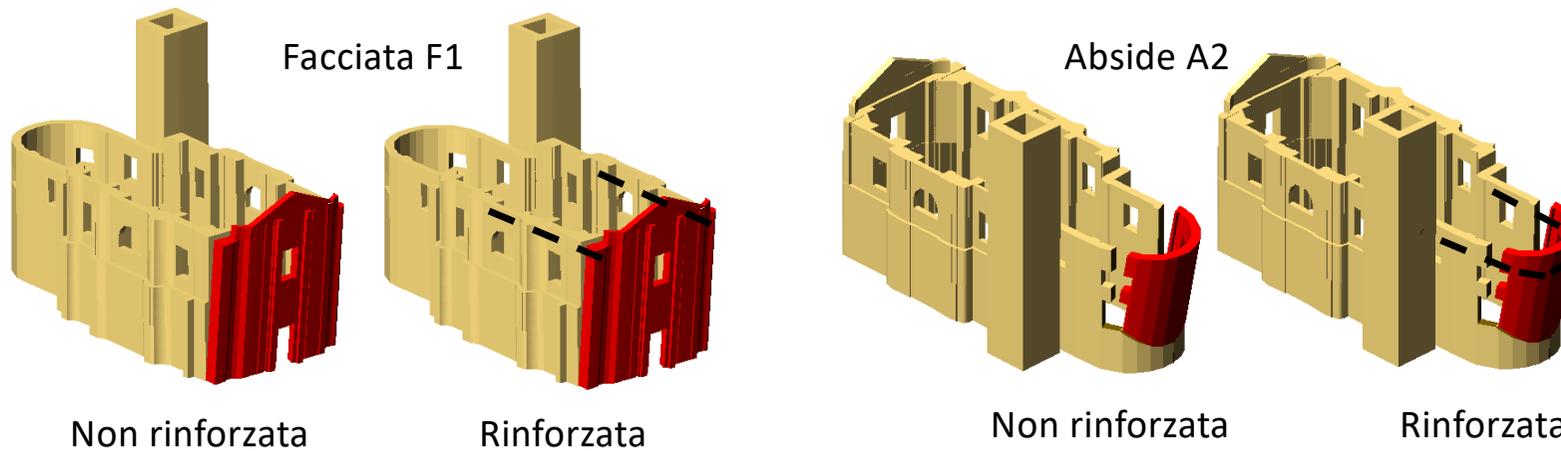
➤ CONFRONTI



Interventi su chiese: casi studio

Chiesa Parrocchiale di Vobarno (BS)

CONNESSIONI: TIRANTI - CERCHIATURE



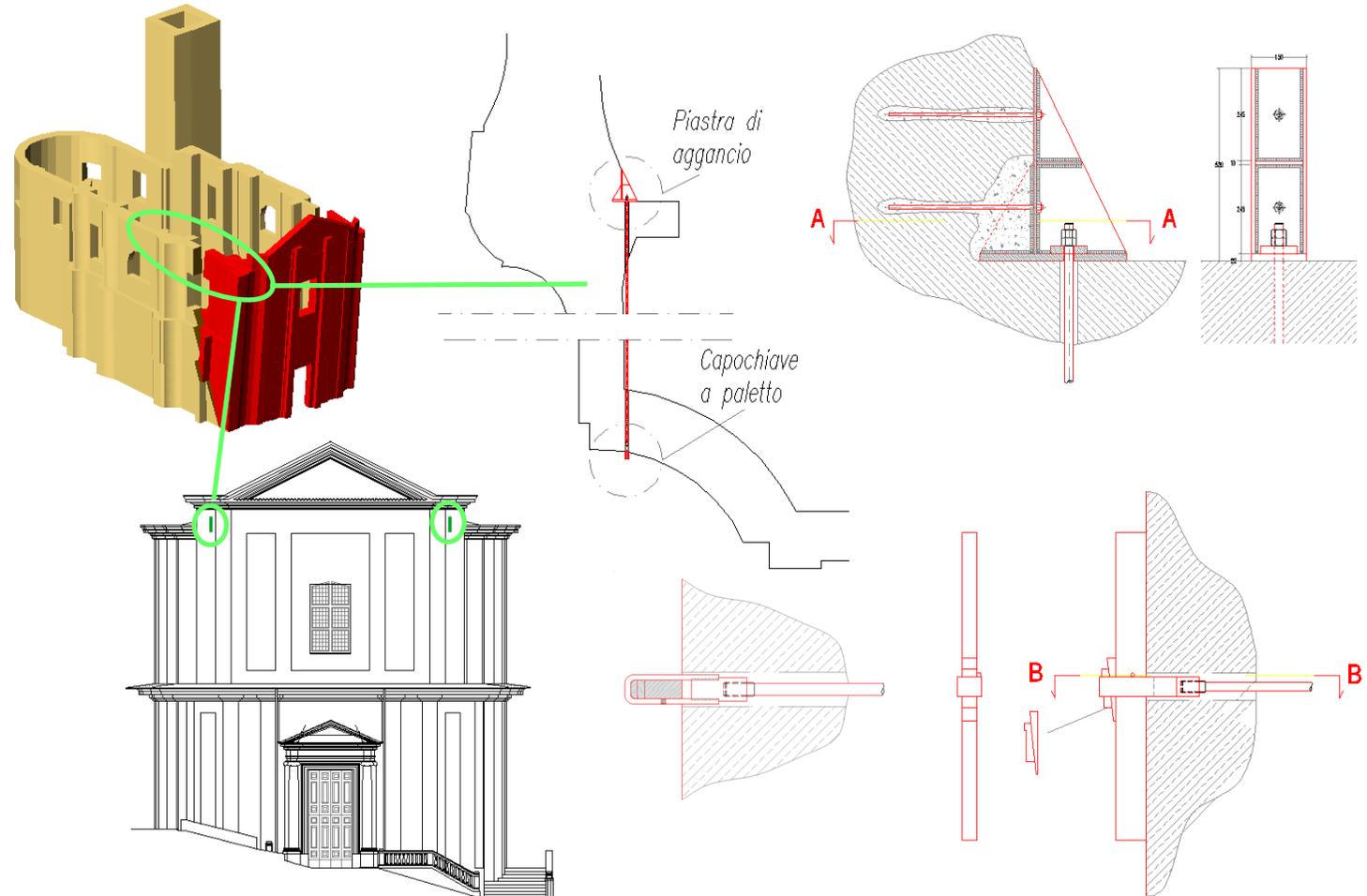
Macroelemento	Capacità (g) Pre intervento	Capacità (g) Post intervento	Incremento %	Domanda sismica (g) definite da normativa	Capacità / Domanda (%) post intervento
Facciata F1	0,083	0,138	66%	0,273	51%
Facciata F2	0,158	0,195	23%	0,280	70%
Facciata superior F1	0,322	0,536	67%	0,375	143%
Abside A1	0,223	0,362	62%	0,289	125%
Abside A2	0,158	0,281	79%	0,277	101%

(da Porto e Casarin, 2006)

Interventi su chiese: casi studio

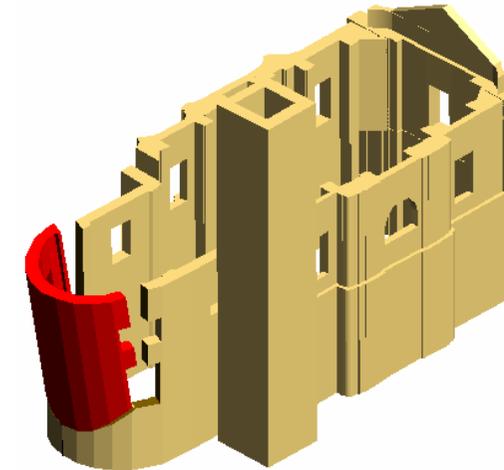
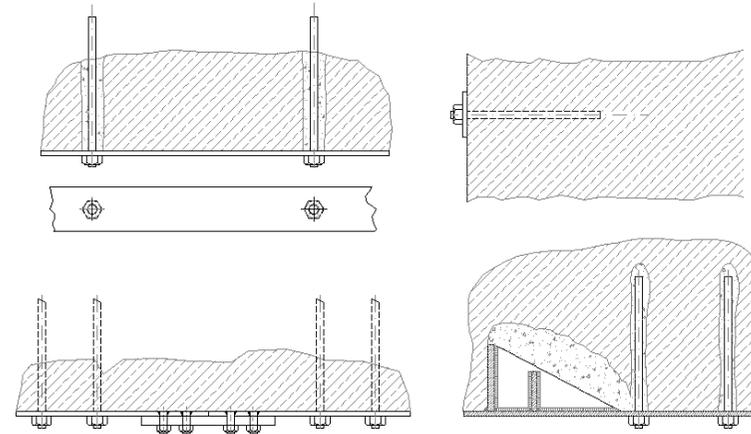
**CONNESSIONI:
TIRANTI -
CERCHIATURE**

Chiesa Parrocchiale di Vobarno (BS)

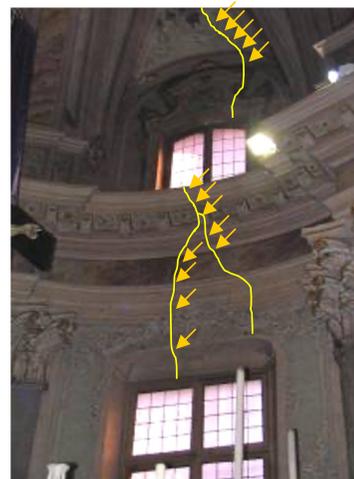
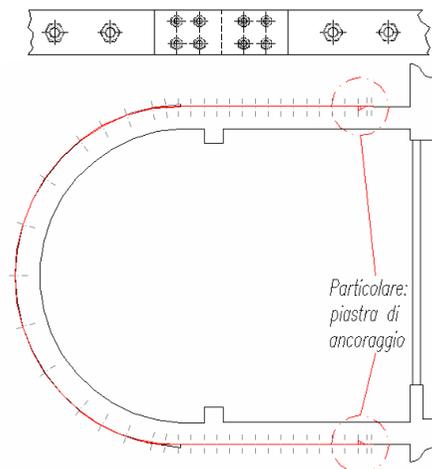


Interventi su chiese: casi studio

**CONNESSIONI:
TIRANTI -
CERCHIATURE**



Chiesa Parrocchiale di Vobarno (BS)



Interventi su chiese: casi studio

CONNESSIONI: TIRANTI - CERCHIATURE

Chiesa di S.ta Corona, VI



MESSA IN SICUREZZA DELLA
FACCIATA E DELLE PRIME TRE
CAMPATE

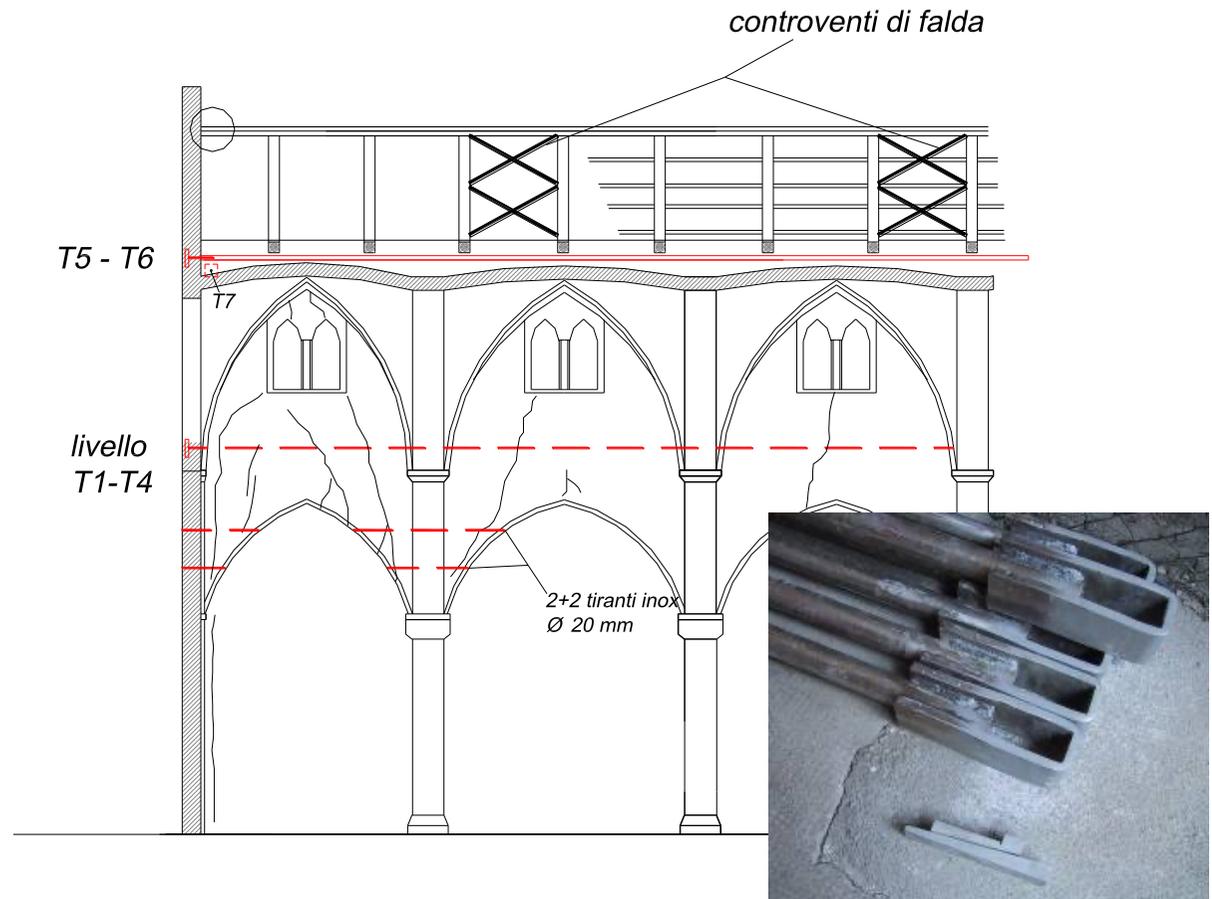
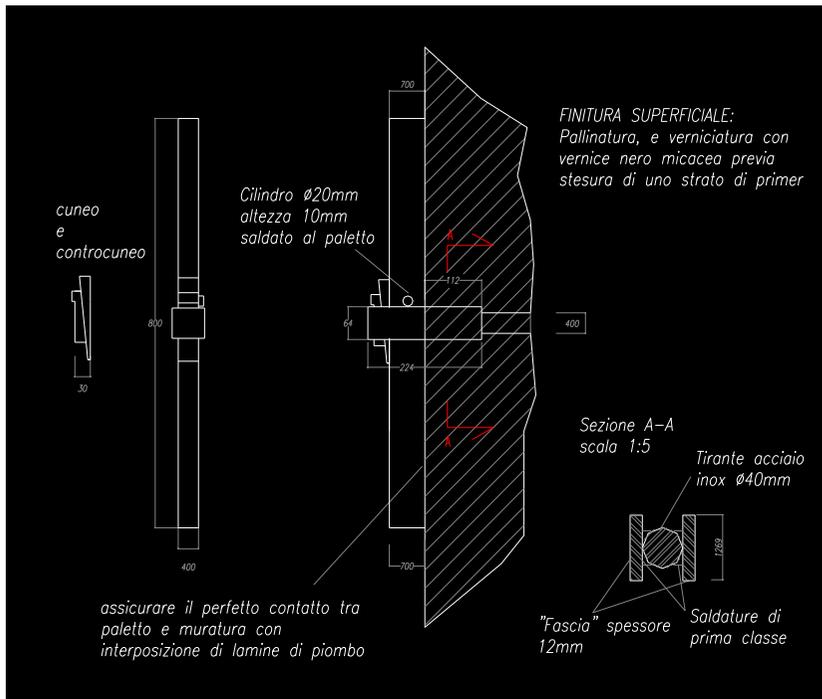
(Bettio e Modena, 2006)

Interventi su chiese: casi studio

CONNESSIONI: TIRANTI - CERCHIATURE

Chiesa di S.ta Corona, VI

CERCHIATURE METALLICHE

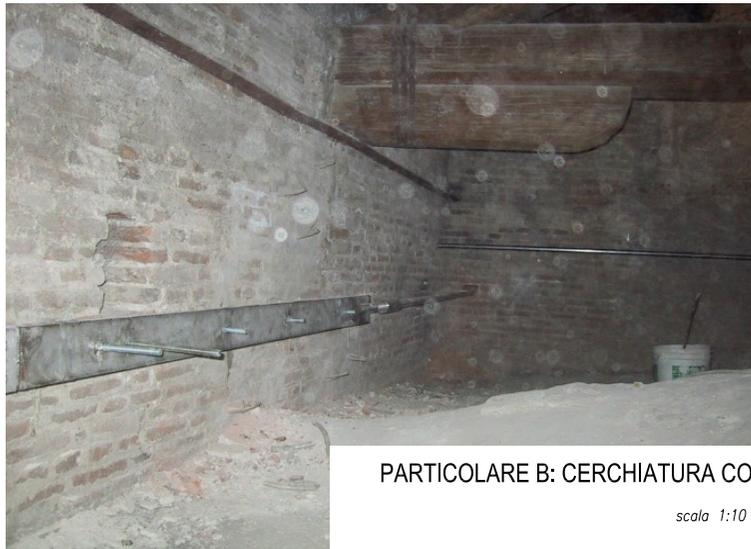


Particolare tipo capochiave di ancoraggio

Interventi su chiese: casi studio

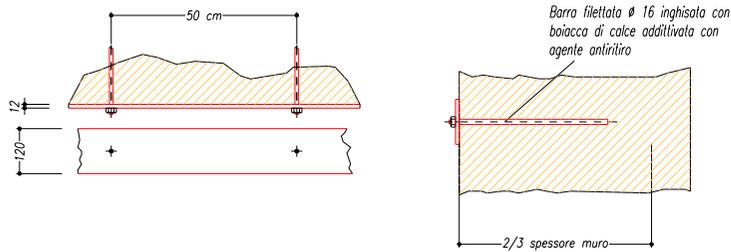
CONNESSIONI: TIRANTI - CERCHIATURE

INSERIMENTO TIRANTI: sottotetto navata centrale



PARTICOLARE B: CERCHIATURA CON PIATTO INOX 120X12 mm

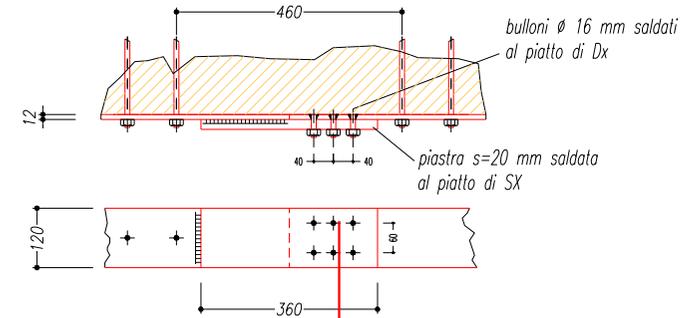
scala 1:10



PARTICOLARE GIUNZIONI

Chiesa di S.ta Corona, VI

scala 1:10

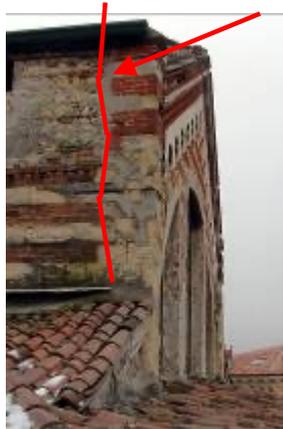


Interventi su chiese: casi studio

CONNESSIONI: TIRANTI - CERCHIATURE

S.M.in Organo (VR)

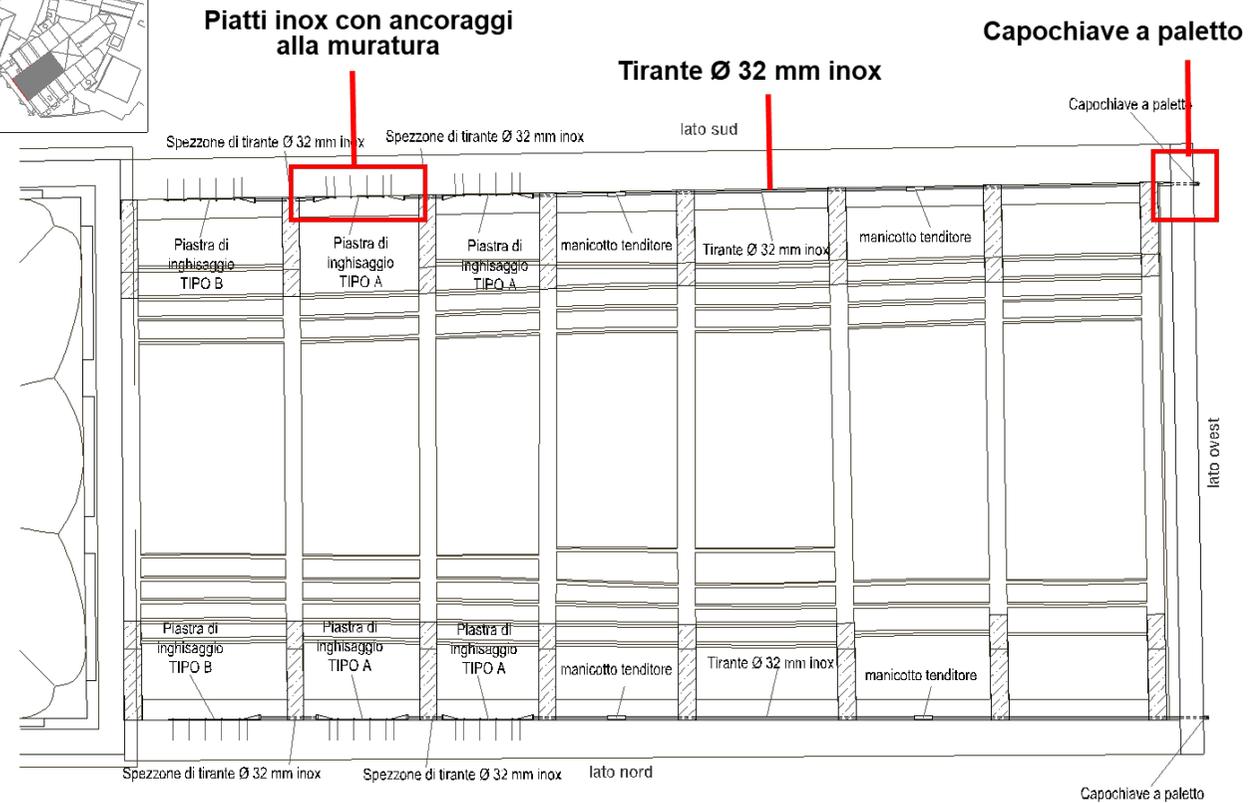
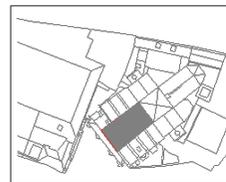
Navata centrale



Particolari distacco frontone



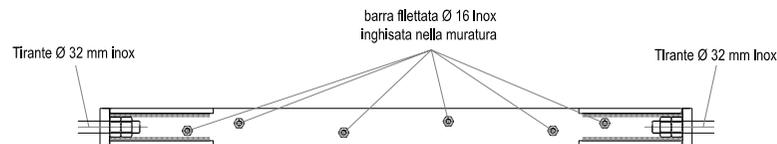
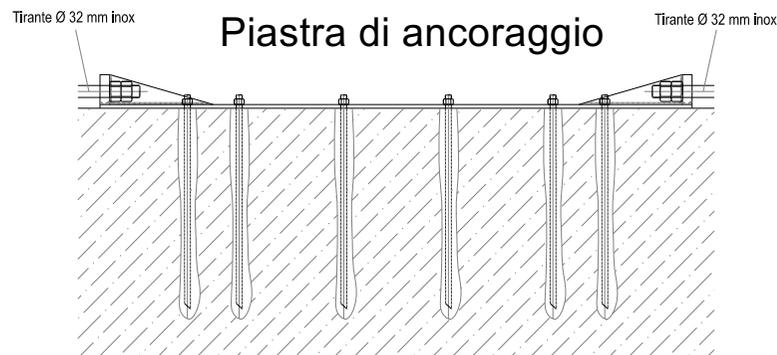
(C. Modena)



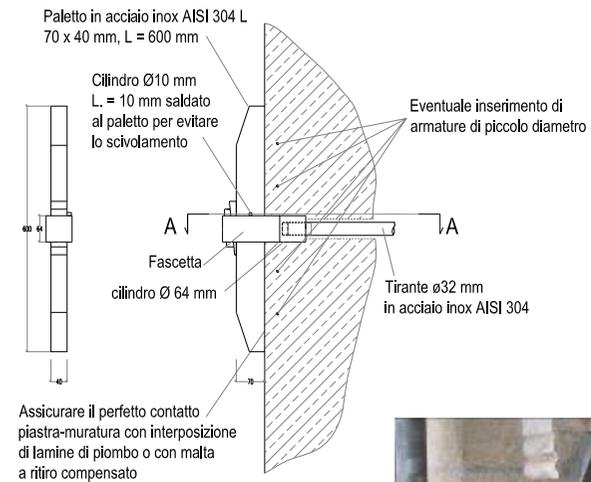
Interventi su chiese: casi studio

CONNESSIONI: TIRANTI - CERCHIATURE

S.M.in Organo (VR)



Capochiave a paletto



Interventi su chiese: casi studio

S.M.in Organo (VR)

CONNESSIONI: CERCHIATURE



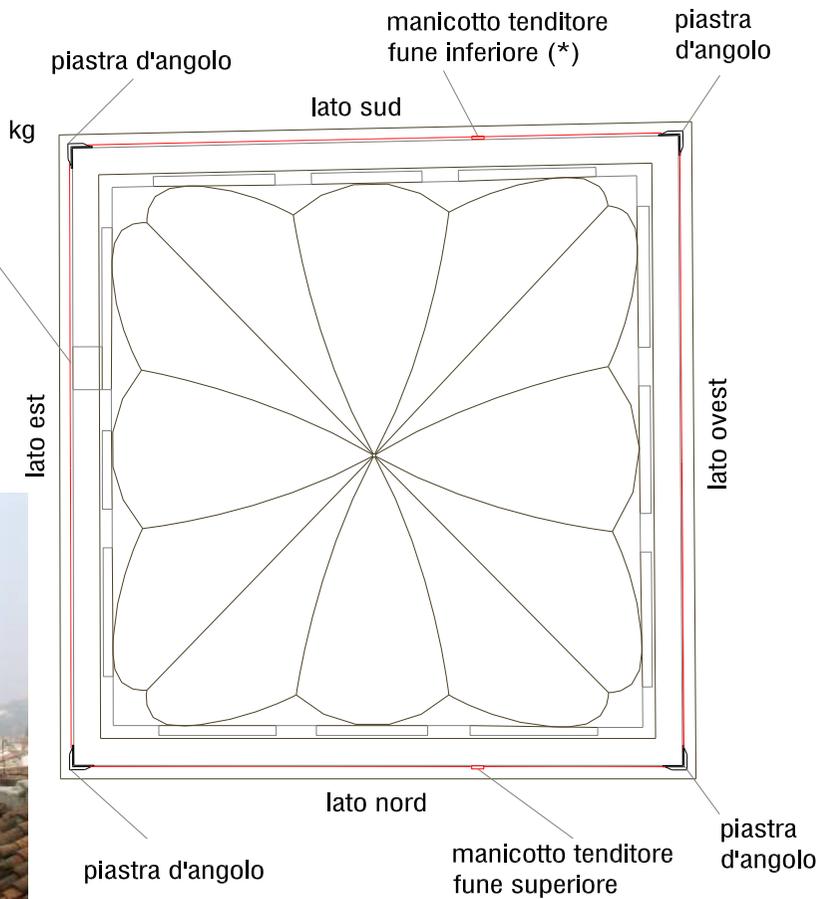
TIBURIO

Lesioni della muratura



Degrado delle catene esistenti

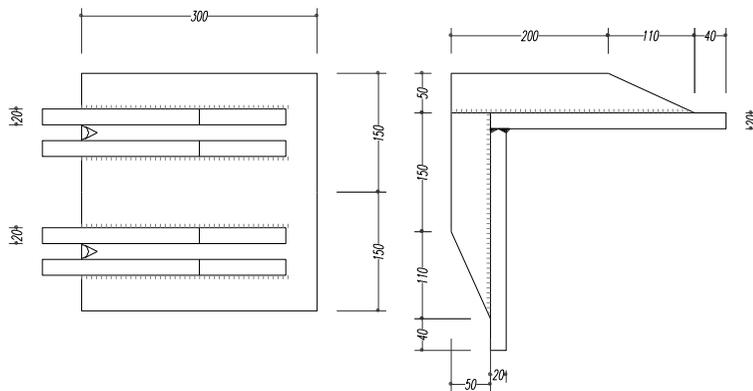
coppia di funi Ø16 mm
 in acciaio inox AISI 316
 tipo 7x19 di Gaudenzi o
 equivalente
 carico rottura min. 17050 kg



Interventi su chiese: casi studio

CONNESSIONI: CERCHIATURE

Particolari piastra d'angolo



TIBURIO
Cerchiatura inferiore

Manicotto tenditore

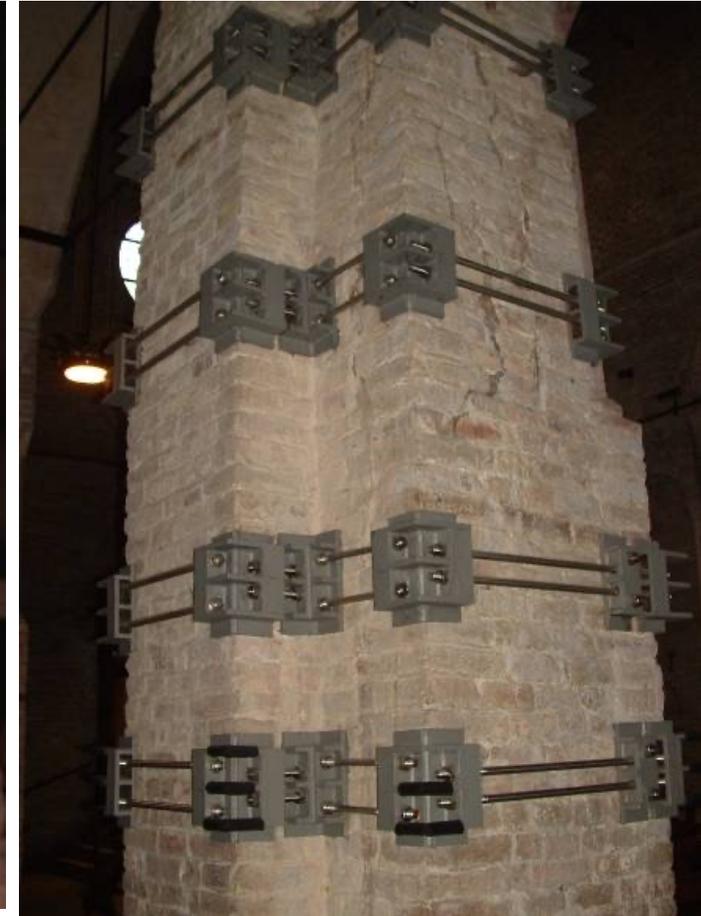
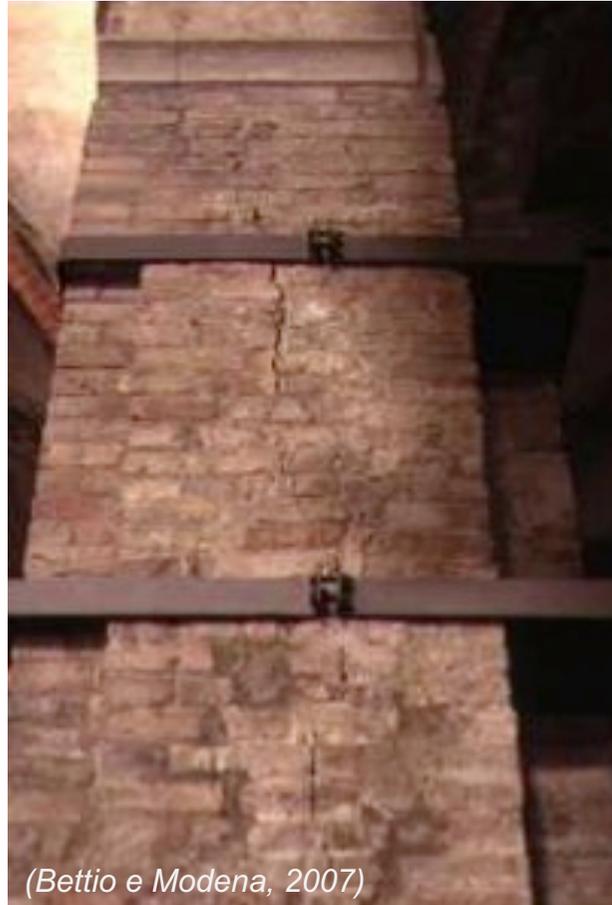


Interventi su chiese: casi studio

RINFORZO DEI PILASTRI INTERNI



Chiesa di S.Sofia (PD) –
Rinforzo dei pilastri interni



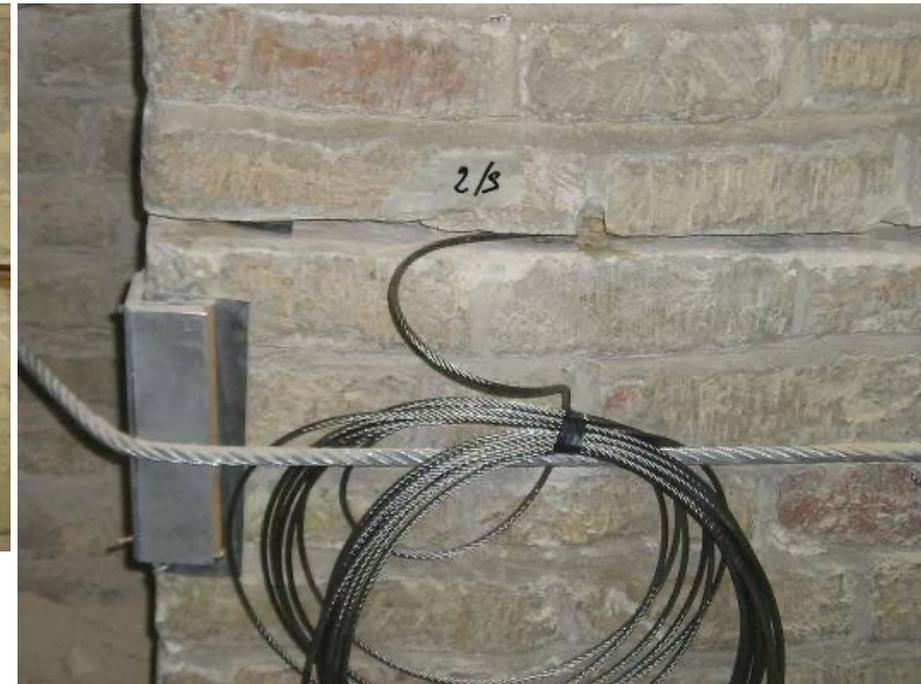
Interventi su chiese: casi studio

RINFORZO DEI PILASTRI INTERNI

Partenza di una delle cerchiature con fune inox ϕ 5 mm messe in opera sul pilastro 2S



Chiesa di S.Sofia (PD) –
Rinforzo dei pilastri interni



Interventi su chiese: casi studio

RINFORZO DEI PILASTRI INTERNI

Intervento di stuccatura
finale del pilastro da
parte dei restauratori

Sistema di tesatura
della fune inox ϕ 5 mm

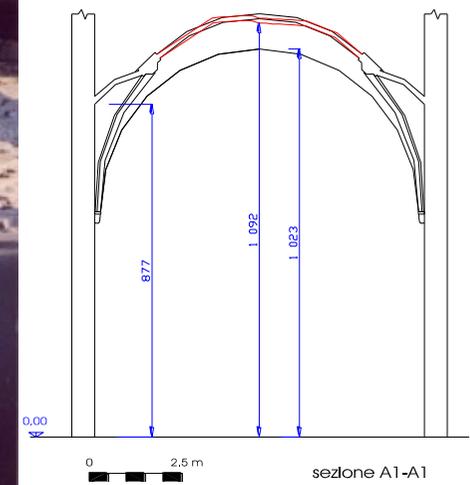
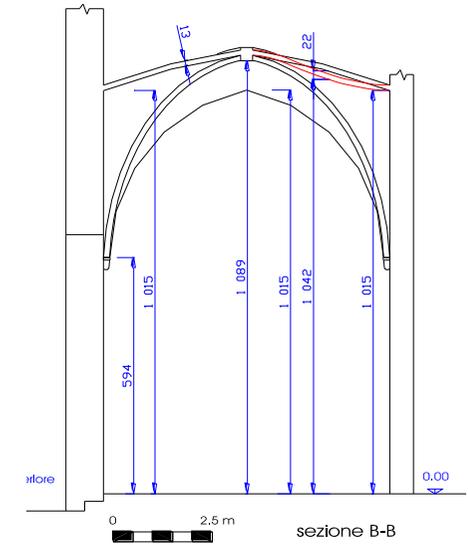


Interventi su chiese: casi studio

PLACCAGGIO CON MATERIALE COMPOSITO FRP



Verona, San Fermo

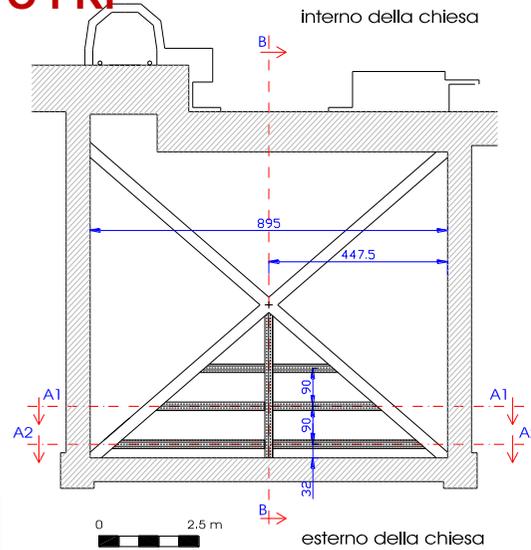
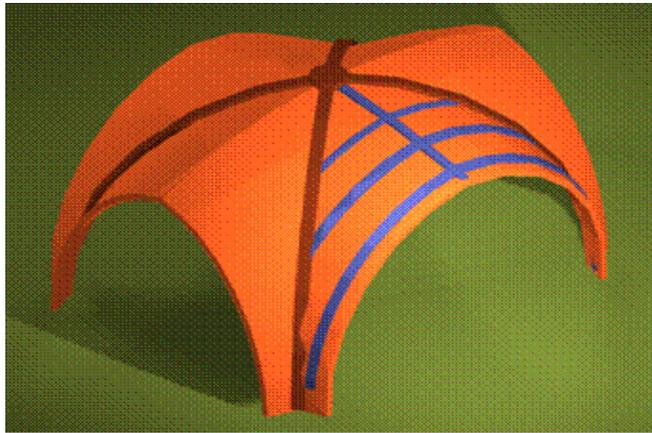


(da Porto, Modena, 2001)

Interventi su chiese: casi studio

PLACCAGGIO CON MATERIALE COMPOSITO FRP

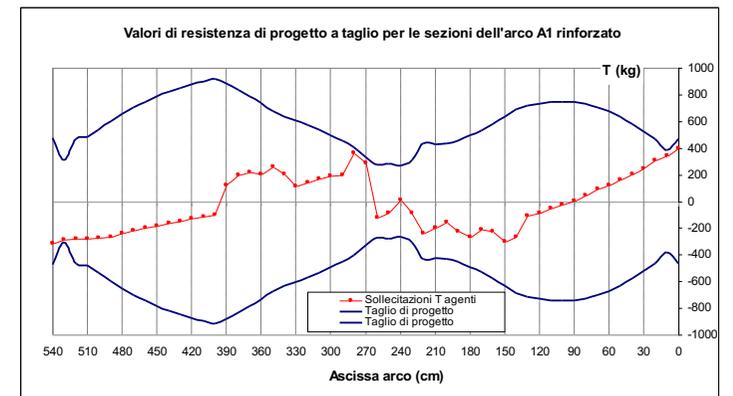
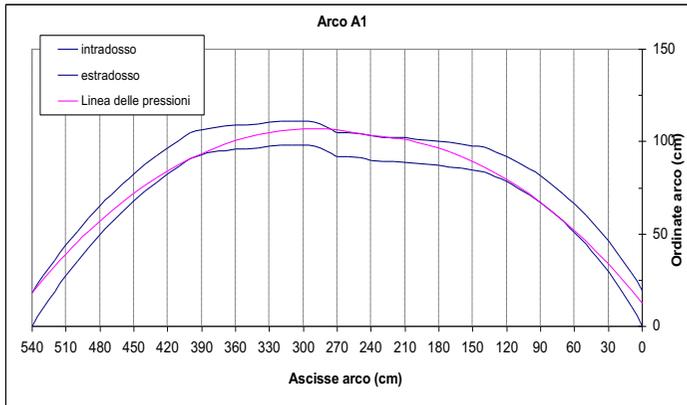
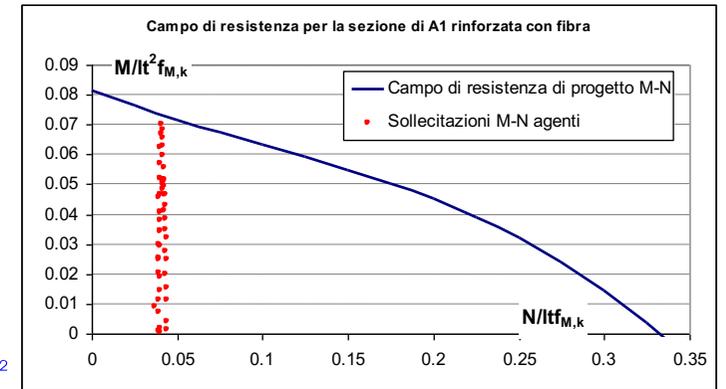
Verona,
San Fermo



RINFORZO ESTRADOSSALE

Laminati in GFRP

B= 20 cm



Interventi su chiese: casi studio

SCUCI-CUCI E REGOLARIZZAZIONE DELLA SUPERFICIE DI APPLICAZIONE DELL'FRP



Interventi su chiese: casi studio

SCUCI-CUCI E REGOLARIZZAZIONE DELLA SUPERFICIE DI APPLICAZIONE DELL'FRP

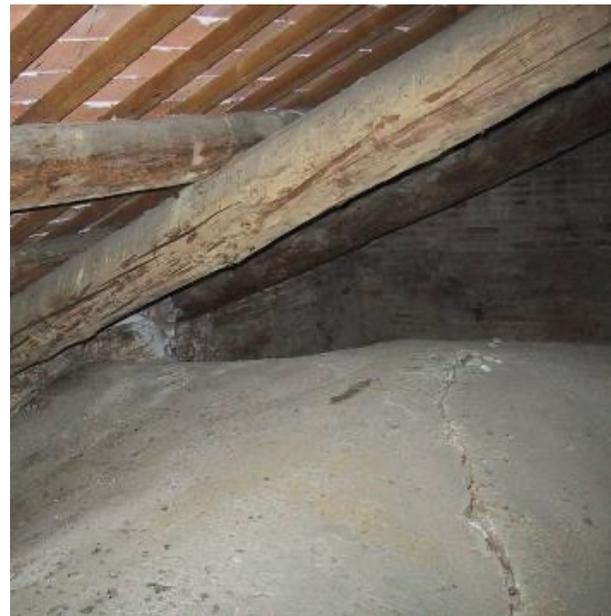


Interventi su chiese: casi studio

INIEZIONE DELLE LESIONI ALL'ESTRADOSSO E ALL'INTRADOSSO



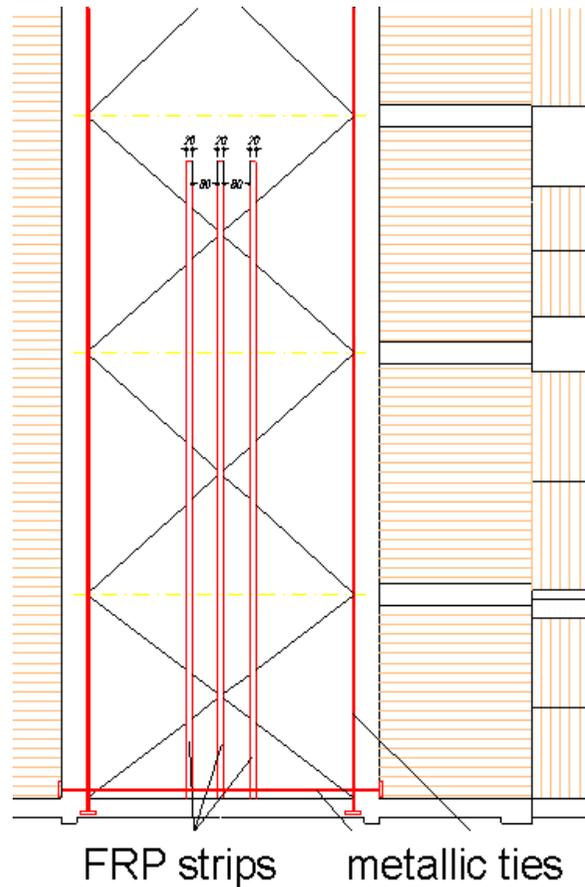
Chiesa di Santa Corona (VI)



Interventi su chiese: casi studio

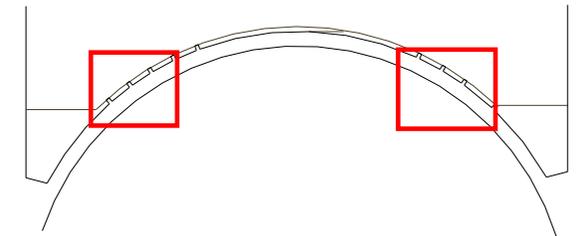
INIEZIONE DELLE LESIONI ALL'ESTRADOSSO E ALL'INTRADOSSO

Chiesa di Santa Corona (VI)

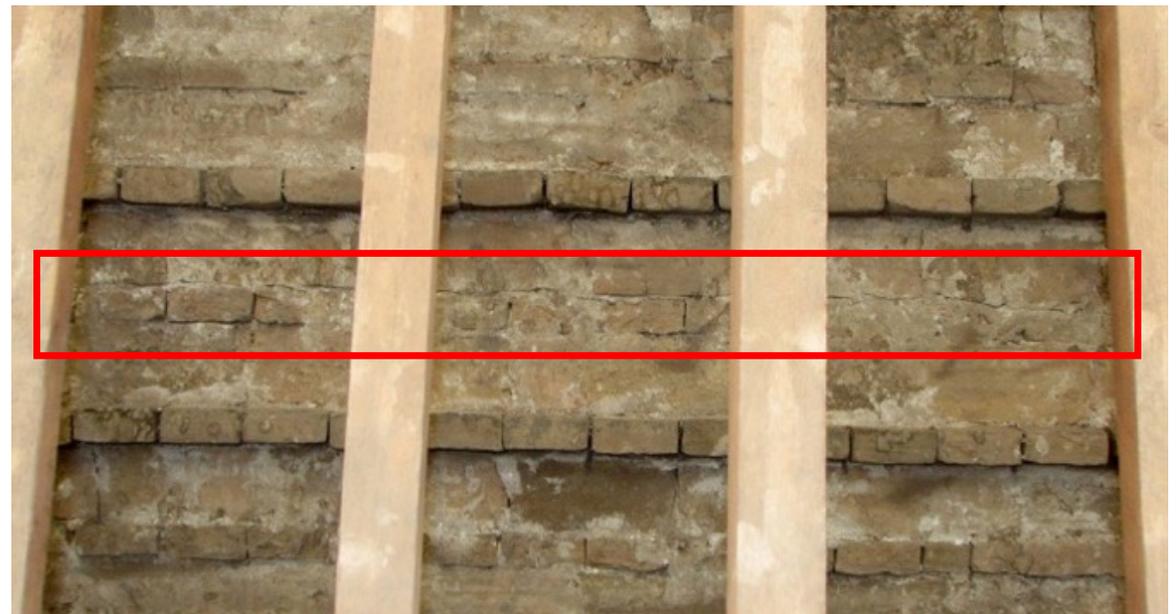


Interventi su chiese: casi studio

RINFORZO DELLE VOLTE CON FRP

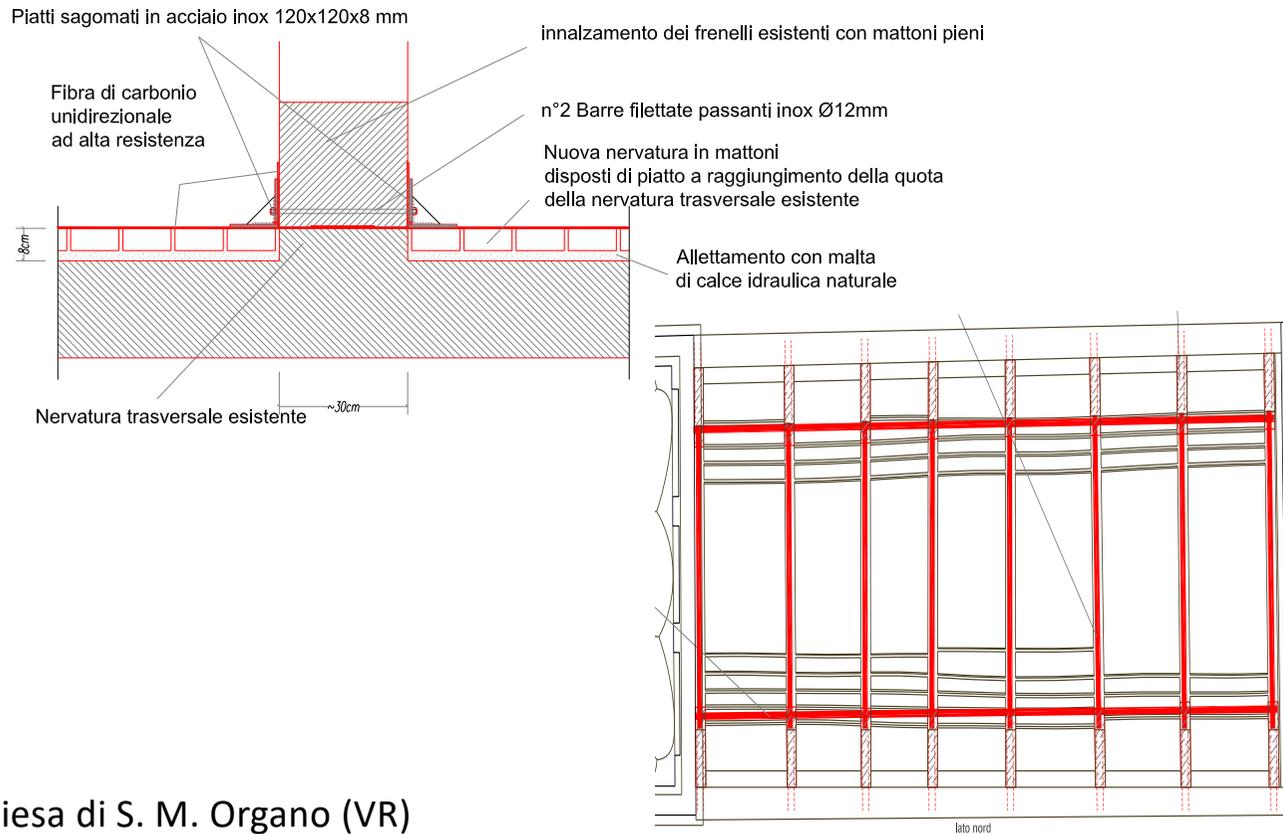


Chiesa di S. M. Organo (VR)

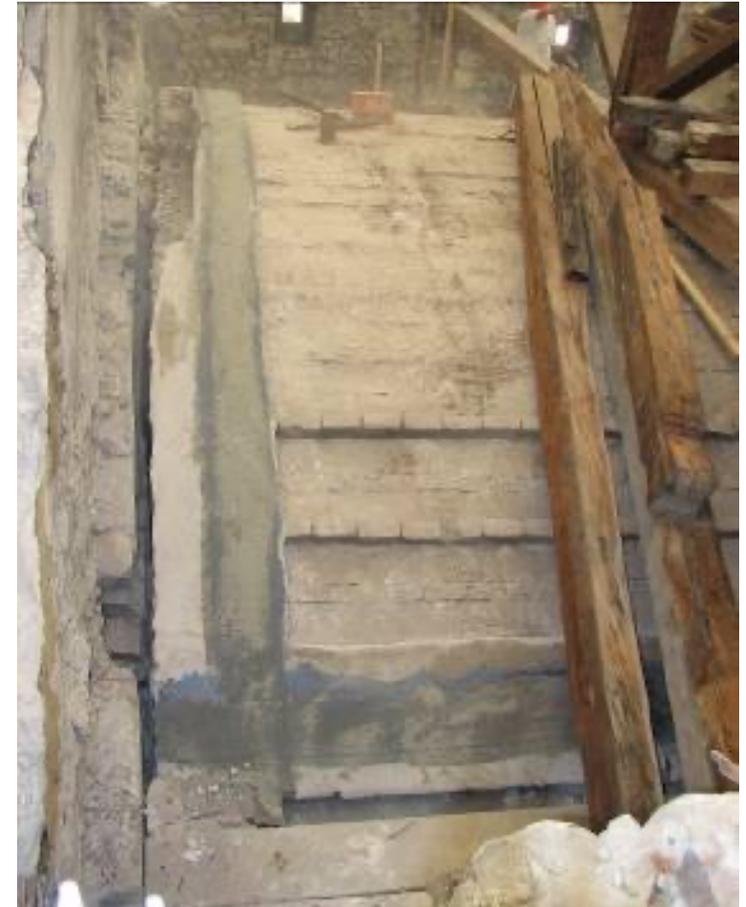


Interventi su chiese: casi studio

RINFORZO DELLE VOLTE CON FRP

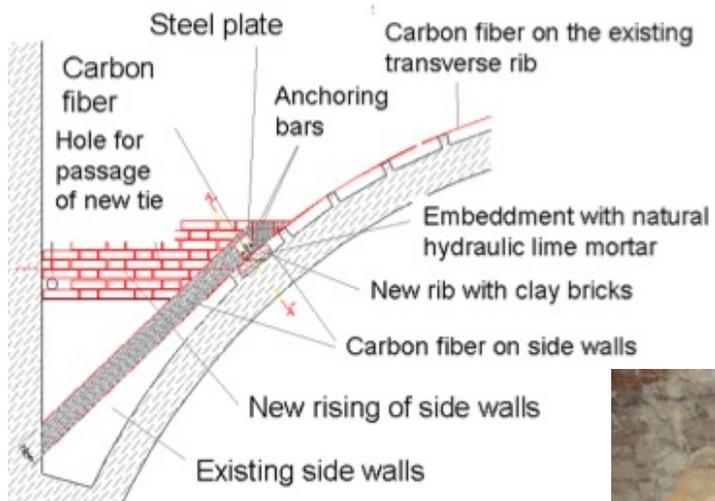


Chiesa di S. M. Organo (VR)



Interventi su chiese: casi studio

RINFORZO DELLE VOLTE CON FRP



Chiesa di S. M. Organo (VR)

Interventi su chiese: casi studio

INTERVENTI SU COPERTURE

Controventamento con croci in acciaio inserite all'intradosso

- Non richiede in generale lo smontaggio delle falde di copertura;
- Può non essere accettata per coperture a vista (impatto visivo);
- Eventuali problemi legati alla resistenza al fuoco;
- Costi generalmente più elevati rispetto al tavolato e nastri in acciaio avvitati;

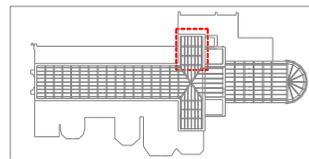
Chiesa di S. Corona (VI)



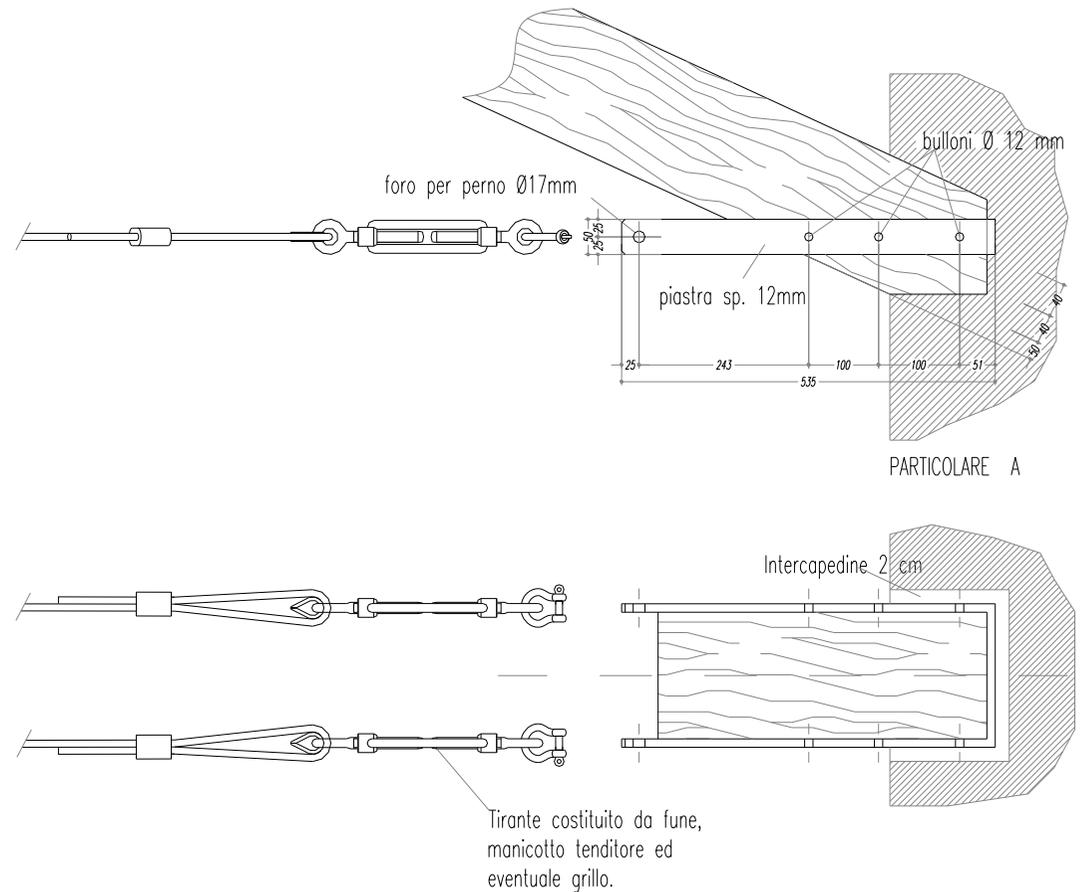
Interventi su chiese: casi studio

INTERVENTI SU COPERTURE

Controventamento con croci in acciaio inserite all'intradosso



Chiesa di S. Corona (VI)



Interventi su chiese: casi studio

INTERVENTI SU COPERTURE

Controventamento con croci in acciaio inserite all'intradosso

Chiesa di S. Corona (VI)



Interventi su chiese: casi studio

INTERVENTI SU COPERTURE

Protesi teste di capriate degradate

Chiesa di S. Corona (VI)

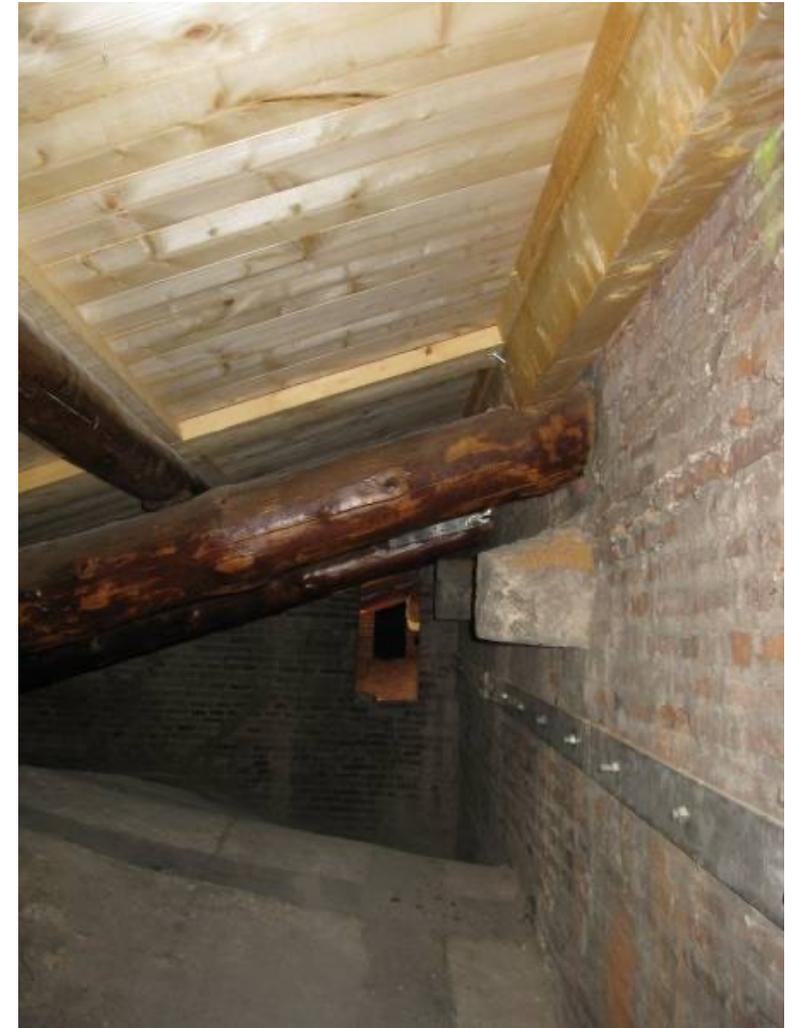


Interventi su chiese: casi studio

INTERVENTI SU COPERTURE

- Controventamento con tavolato e nastri forati
- Irrigidimento orditura secondaria con tavoloni fissati con viti
- Ancoraggi alle murature

Chiesa di S. Corona (VI)



Interventi su chiese: casi studio

INTERVENTI SU COPERTURE

- Controventamento con tavolato e nastri forati
- Irrigidimento orditura secondaria con tavoloni e viti
- Ancoraggi alle murature





Rete dei Laboratori Universitari
di Ingegneria Sismica e Strutturale



6/13
OTTOBRE
2024

#settimanadiPC

SCUOLA DI INGEGNERIA STRUTTURALE – RELUIS

Bologna, 9-11 ottobre 2024

GRAZIE PER L'ATTENZIONE!

**EFFICACIA DI INTERVENTI DI MIGLIORAMENTO SISMICO PER EDIFICI DI CULTO: EVIDENZE
DAI RECENTI TERREMOTI E DALLA MODELLAZIONE DI CASI REALI**

Prof. Ing. Francesca da Porto