

MECCANISMI DI COLLASSO IN ZONA SISMICA PER MACROELEMENTI STRUTTURALI DELLA EDILIZIA STORICA ED AZIONE BLOCCANTE MEDIANTE FRP

Angelo Di Tommaso – Daniela Bufo

Sommario

L'edilizia celebrativa religiosa in tutte le civiltà annovera templi che sono morfologicamente caratterizzati da grandi aule assembleari. Lo spazio interno è delimitato da macroelementi strutturali (parete laterale, paramento di facciata, abside, cupola, volta a crociera, arco trionfale, etc...) che con le loro aggregazioni costituiscono l'organismo strutturale della costruzione. In molti paesi tali costruzioni, quasi sempre di muratura, hanno dovuto resistere a frequenti terremoti. L'analisi dei danni riscontrati a seguito di terremoti ha evidenziato per ogni macroelemento alcuni "meccanismi di collasso" peculiari e ricorrenti. Per la costruzione, resistere al sisma significa che ogni macroelemento strutturale sopravvive al conato di attivazione di un proprio meccanismo di collasso e l'aggregazione dei macroelementi resiste alla attivazione di meccanismi di disaggregazione dei macroelementi stessi.

Il meccanismo di collasso di un macroelemento murario consiste nella formazione di zone di localizzazione spinta della deformazione (fessure o "linee" di frattura) che separano il macroelemento in blocchi quasi rigidi i quali assumono, sotto l'azione del sisma, un cinematismo a cui le forze di inerzia imprimono un moto accelerato che si evidenzia nel "crollo." Le zone di connessione fra i macroelementi della costruzione sono già linee singolari prone a generare meccanismi di disaggregazione per cui un macroelemento può assumere rototraslazioni relative rispetto ai rimanenti.

A contrastare la attivazione del meccanismo sono le dissipazioni energetiche localizzate nelle zone di frattura durante il moto del meccanismo: per la muratura questa dissipazione è di modesta entità. Ciò è legato alla bassa energia di frattura in

un materiale “coesivo” come la muratura (in media circa 80 J/mq), avendo concepito in questo contesto la muratura un materiale con proprietà meccaniche omogeneizzate.

Con questa lettura del problema strutturale è evidente la necessità di poter prevedere i meccanismi di collasso più probabili per i vari macroelementi in cui si ipotizza di scindere idealmente la costruzione e successivamente operare per contrastare o bloccare il moto di questi meccanismi e di quelli di disaggregazione fra macroelementi. Chiaramente eliminando il potenziale verificarsi di un certo numero di meccanismi più probabili si innalza il livello della azione esterna, derivante dal sisma, in grado di generare il collasso; si opera quindi il “miglioramento “ del comportamento al sisma come richiesto dalle raccomandazioni esistenti per le costruzioni storiche tutelate.

In questo lavoro si vuole evidenziare la utilità di una “analisi storica” del comportamento dei macroelementi sotto sisma, “considerando i fenomeni che si sono succeduti nel tempo come una sperimentazione diretta al vero assai indicativa e probante, soprattutto se gli eventi sismici subiti sono stati significativi” (Direttive della Commissione Ballardini, Miarelli et al. 1989). Si formerà una prima base dati seguendo l’approccio menzionato e si introdurrà la tecnica di blocco di un meccanismo mediante fasce di composito FRP (Fiber Reinforced Polymers). In effetti la pratica di rinforzare le costruzioni storiche con FRP è allo stato attuale abbastanza diffusa nel nostro paese, mancano però trattazioni esaustive e condivise di supporto progettuale basate su sistematiche e consistenti teorie.

In realtà è intuibile come la fasciatura con FRP contrasti la formazione di meccanismi, anche se si analizza l’azione bloccante idealizzata con forze di richiusura generate dalle fasce di FRP. Però una lettura in termini energetici meglio evidenzerebbe che durante l’azione di contrasto degli FRP il distacco progressivo dissipa energia costituendo pertanto quell’apporto di energia di frattura utile ad impedire l’evolversi del meccanismo. L’intervento con FRP non modifica il funzionamento statico ordinario del macroelemento, rispetta quindi la concezione originaria del progetto, ma interviene solo per la sollecitazione dinamica

straordinaria derivante dal sisma. La eliminazione di impatti visivi è possibile con vari espedienti o per condizioni specifiche di visibilità da parte dell'osservatore.

1) Introduzione

Gli organismi strutturali dell'edilizia storica religiosa sono caratterizzati da morfologie tipiche in ogni stile architettonico. Una lettura strutturale dell'organismo consente di suddividerlo in "macroelementi"¹ che sotto l'azione sismica manifestano dei comportamenti peculiari nei riguardi dei meccanismi di collasso incipienti o completi sino al crollo. Un catalogo di detti meccanismi, desunto dalla analisi storica dei danni da sisma, suddiviso per macroelemento, consente di formulare le previsioni di comportamento probabile nei riguardi degli stati limite di danno e di collasso. L'intero organismo può infatti esser visto come aggregazione di macroelementi strutturali. I meccanismi di collasso dell'intero organismo possono essere definiti come insieme dei meccanismi propri del singolo macroelemento e dei meccanismi di disaggregazione dei macroelementi fra loro.

Un approccio generale al problema può far riferimento ad una serie di morfologie schematiche della costruzione ciascuna differenziata in relazione ai vari stili architettonici.

L'azione di un sisma, costituita da scuotimento del suolo, è sovente caratterizzata da una direzione dominante oltre alle altre caratteristiche come velocità e accelerazioni al suolo, contenuti in frequenza, durata etc.

I macroelementi in massima parte sono costituiti da solidi murari "bidimensionali" nella accezione tradizionale del termine che si riferisce ad elementi della geometria euclidea (superfici piane o curve) dotati però di spessore: due dimensioni sono

¹A. De Colle, F. Doglioni, L. Mazzorana, *L'osservazione per macroelementi*, in F. Doglioni, A. Moretti, V. Petrini (a cura di), *Le chiese e il terremoto. Dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro, verso una politica di prevenzione*, Edizioni LINT, Trieste, 1994.

preponderanti rispetto alla terza (spessore). Nella fase di formazione dei meccanismi che preludono al collasso per cinematismo sono individuabili le “linee di frattura” che verranno caratterizzate in seguito. Le linee di frattura diffuse a rete irregolare definiscono una partizione in blocchi (corrispondenti a superfici piane o curve delimitate da poligonali) schematizzabili come rigidi i quali possono assumere un cinematismo che costituisce il moto di collasso. Nel modello meccanico in esame si assume la muratura come materiale isotropo con proprietà omogeneizzate. Queste schematizzazioni del reale sono particolarmente funzionali allo studio del fenomeno di collasso di macroelementi derivante da azioni sismiche. Infatti le forze di inerzia legate al moto relativo dei blocchi possono determinare la perdita di equilibrio del sistema; si coglie così con queste schematizzazioni l’essenza del fenomeno di collasso nella grande maggioranza dei casi. Come tutte le schematizzazioni questa menzionata si applica più o meno bene ai casi reali: ad esempio mentre risponde bene per le murature compatte di mattoni meno bene funziona per le murature a grossi elementi lapidei per le quali l’ipotesi di omogeneità del solido murario si allontana dal reale in quanto le linee di frattura risentono della geometria dei giunti. Ancora meno applicabile questa schematizzazione risulta nei casi di murature “povere” che pervengono al collasso per sbriciolamento. Discorso a parte deve essere fatto per le murature a sacco ove la frattura si presenta come separazione dei paramenti interno ed esterno.

2) Linee di frattura

La **linea di frattura** (L.F.) corrisponde ad una discontinuità acquisita della parete muraria, detta linea è sede di una localizzazione spinta della deformazione. In prossimità della linea di frattura (marcata convenzionalmente sulla superficie media del solido “bidimensionale”) si verificano moti relativi delle particelle di materiale che prima erano a contatto, ossia gli intorni materiali perdono la continuità. All’atto della formazione della linea di frattura si verificano assorbimenti di energia (di frattura) per i fenomeni di distacco e rilascio di energia di deformazione nelle zone in prossimità della linea; in termini tensionali si verificano, nelle vicinanze della

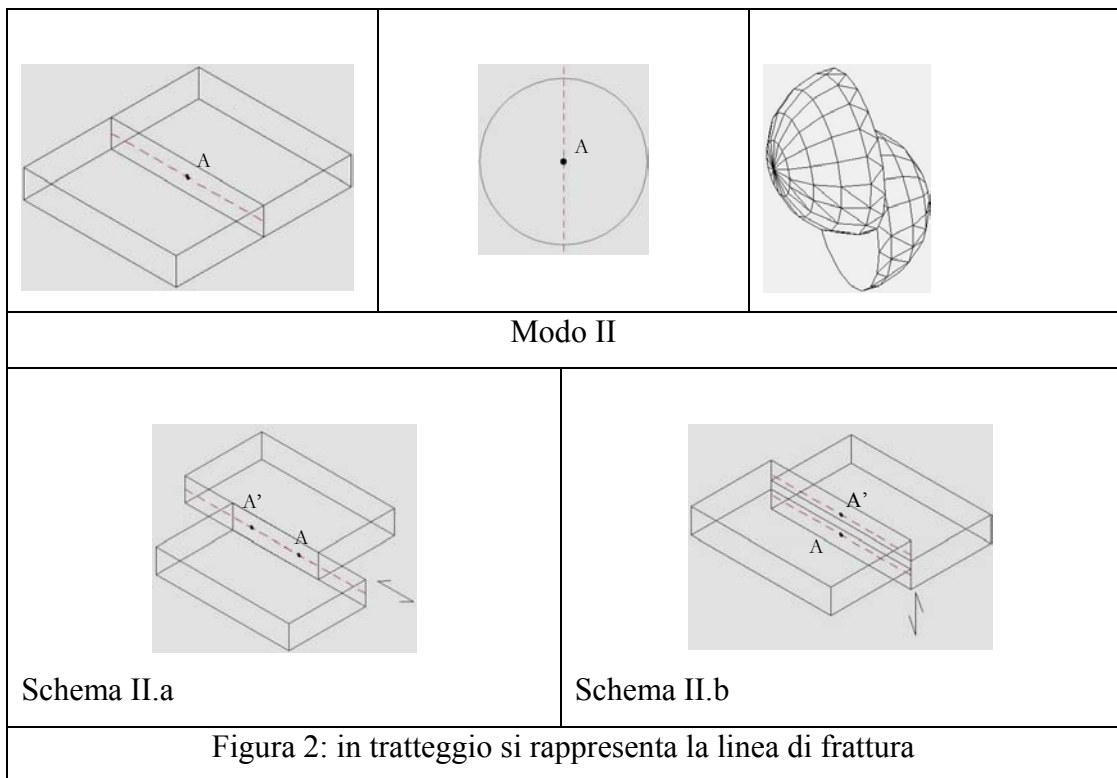
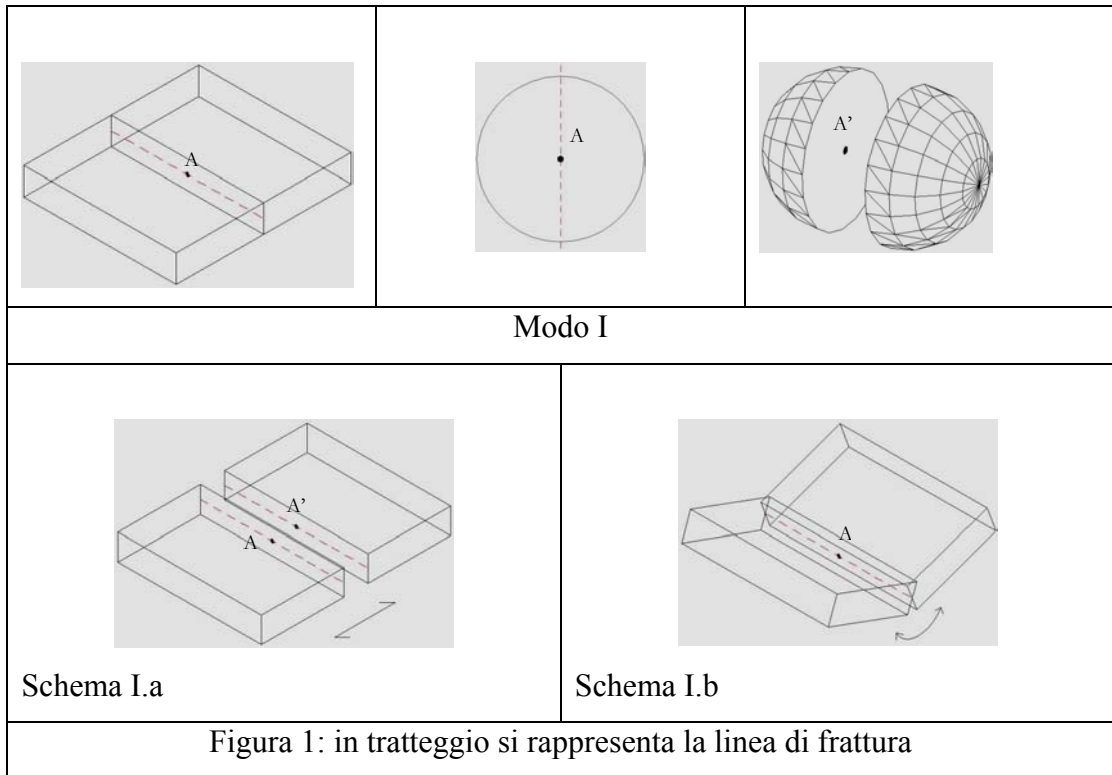
linea, marcate ridistribuzioni, ossia ci si allontana dalla distribuzione che ha originato la fessurazione. La struttura tutta cambia le proprie caratteristiche dinamiche per la presenza delle linee di frattura e quindi cambia l'interazione col moto del suolo. La nuova struttura vulnerata dalle linee di frattura, in fase dinamica dissipa notevole energia lungo le linee di frattura stesse, sede di **scorrimenti relativi**, meno lungo le linee sede di **rotazioni relative**.

Quando in fase di meccanismo incipiente la linea di frattura è sede di prevalenti distacchi diremo che la linea è attiva in **modo I**, quando essa è sede di prevalenti scorrimenti relativi diremo che la linea è attiva in **modo II**. Queste terminologie sono coerenti con quelle tipiche della **meccanica della frattura**.

Agli effetti della attivazione dei meccanismi nei solidi **bidimensionali piani** le linee di frattura possono denominarsi di tipo I.a se corrispondono a traslazione relativa (di apertura) dei blocchi (fig1, schema I.a) e di tipo I.b se corrispondono a rotazione relativa (di apertura) dei blocchi con centri di rotazione relativi disposti lungo la linea stessa (fig 1, schema I.b), ossia moti relativi caratterizzati dal fatto che il paramento murario perde la precedente planarità conseguendo un piano medio "folded" (piegato).

Saranno di tipo II.a se la traslazione dei blocchi rispetta l'appartenenza degli stessi al piano medio primitivo, i movimenti cioè avvengono nel piano (fig 2, schema II.a). Saranno di tipo II.b se la traslazione dei blocchi avviene con moto ortogonale al primitivo piano medio.(fig 2, schema II.b).

Per i solidi bidimensionali "debolmente" curvi (volte) restano validi i concetti espressi, sebbene la cinematica più complessa dei meccanismi esige per la semplificazione alcune ammissioni di compenetrabilità, cosa in generale ammissibile nei casi reali se si considerano gli "schiacciamenti" locali.

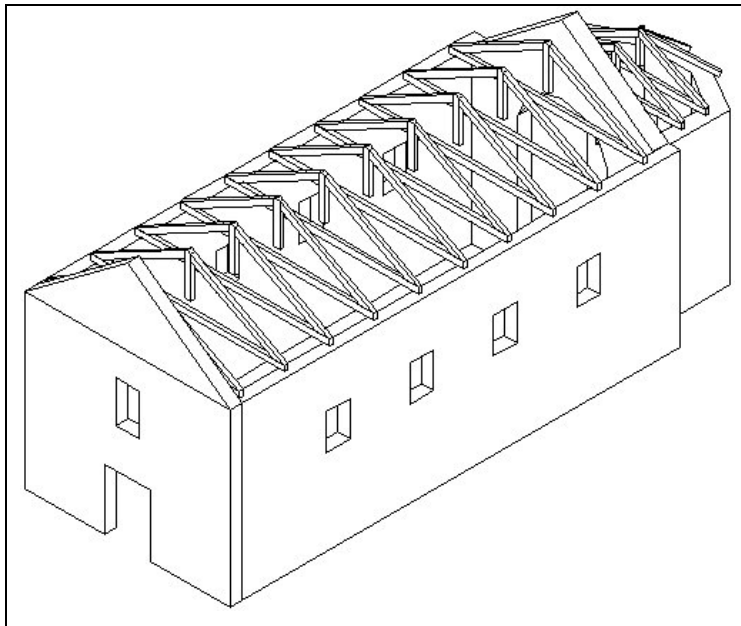


Questa lettura strutturale consente di chiarire la portata di approcci che vogliono valorizzare il modello elastico (agli elementi finiti); indubbiamente il calcolo elastico è di ausilio per modellare la prima fase, precedente alla formazione delle

linee di frattura. Successivamente il discostarsi della struttura dal solido continuo non consente di utilizzare ancora il modello elastico.

3) Analisi di un caso semplice di organismo costituito da navata unica (aula) senza transetto.

Caso di studio ideale (fig.3)



I macroelementi tipici sono (fig.4):

1. La facciata
2. Le pareti laterali
3. L'arco trionfale
4. L'abside

Figura 3

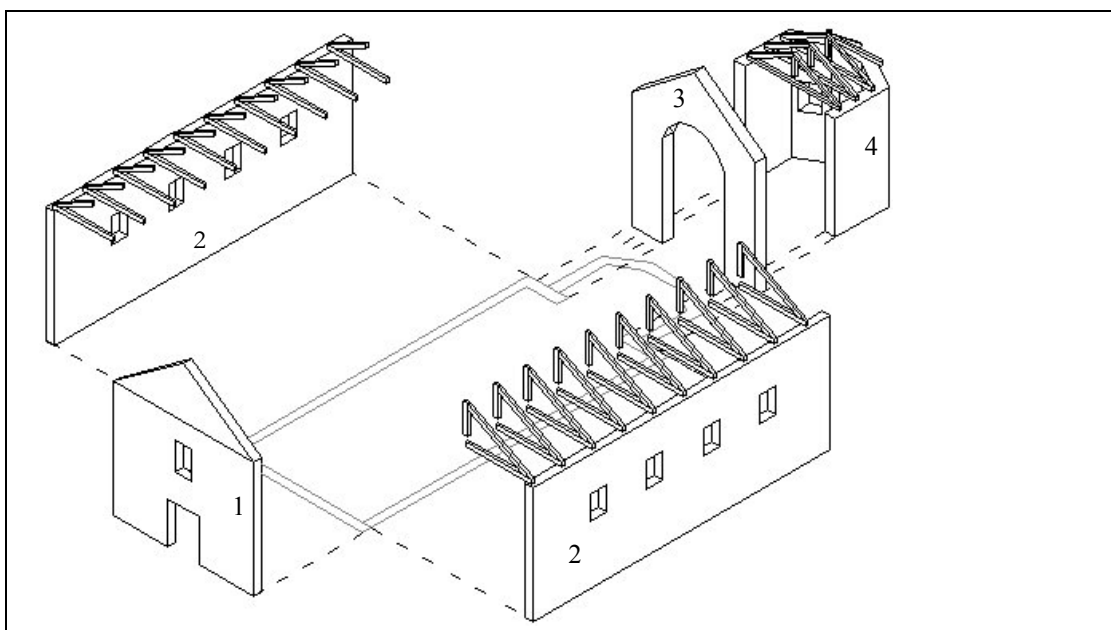


Figura 4

3.1) Direzione dominante del sisma: trasversale.

I macroelementi facciata da un lato, arco trionfale e abside dall'altro assorbono azioni forza più rilevanti e presentano meccanismi di collasso tipici. La facciata tende a presentare linee di frattura, nel piano (medio) della facciata stessa, attive in modo II.a (fig.5). L'arco trionfale tende generalmente a presentare il meccanismo a cerniere alternate, modificato eventualmente dalle geometrie del timpano e dei piedritti (fig.6).

L'abside presenta, nella maggiorparte delle volte, un coacervo di linee di frattura attive in vari modi con meccanismi nel piano e fuori del piano (rilevante è l'influenza della geometria della copertura dell'abside, a semicupola oppure a tetto ligneo) -fig.7.



Figura 5: macroelemento facciata. Immagine fotografica riferita ad una chiesa danneggiata dal terremoto dell'Umbria nel 1997

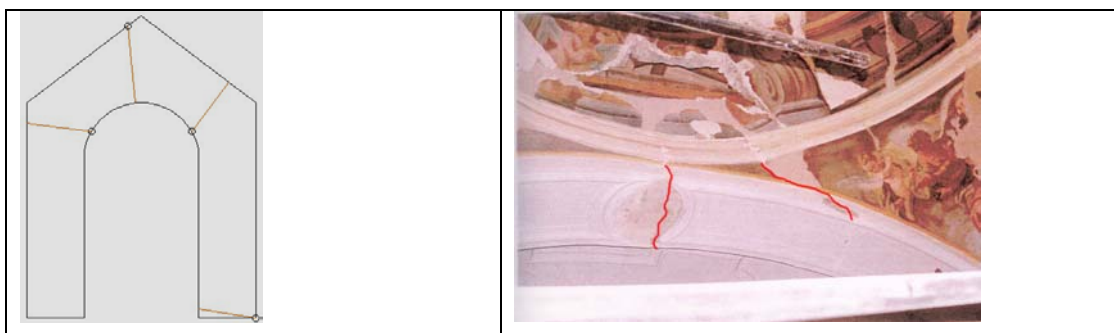


Figura 6: macroelemento arco trionfale. Meccanismo con cerniere e immagine fotografica riferita ad una chiesa danneggiata da terremoto del Molise nel 2002

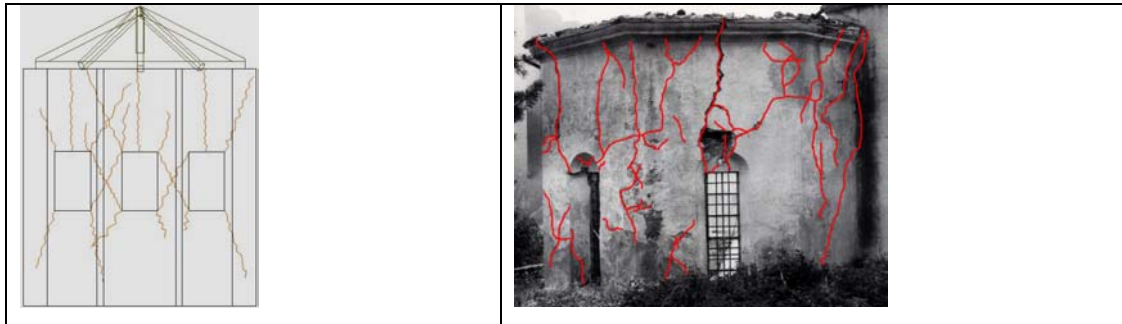


Figura 7: macroelemento abside. Immagine fotografica riferita ad una chiesa danneggiata dal terremoto del Friuli nel 1976

Per le pareti laterali bisogna distinguere i due casi: copertura a sole capriate oppure copertura a volte e capriate superiori. Nel primo caso le pareti laterali sono praticamente scollegate in sommità, per cui il macroelemento parete denuncia meccanismi di collasso fuori dal piano (linee di frattura attive in modo I.b) e le capriate perdono un appoggio per cui crollano rigidamente (fig.8). Altresì sono possibili distacchi fra macroelemento facciata e macroelemento parete laterale (meccanismo di disaggregazione).

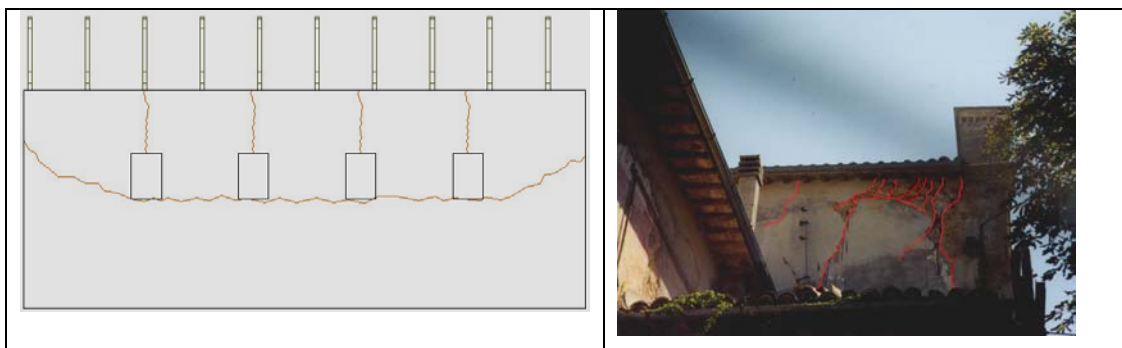


Figura 8: macroelemento parete laterale. Immagine fotografica riferita ad una chiesa danneggiata dal terremoto dell'Umbria nel 1997

Più complesso è il comportamento della navata con copertura a volta: innanzitutto si deve distinguere la copertura con volta a botte (unghiata) con catene di bilanciamento della spinta oppure la copertura con volte a crociera con catene. La casistica è però ampia dovendo annoverare anche i casi di spinte assorbite da contrafforti o cappelle laterali irrigidenti.

Nei casi di presenza del transetto, questo assorbe forze rilevanti nel piano delle pareti confinanti il transetto stesso che presenterebbero meccanismi nel piano,

comunque la presenza del transetto modifica radicalmente la distribuzione delle azioni trasversali.

Le navate coperte con volte a crociera e tetto sovrastante poggiante sui muri laterali, hanno punti deboli nell'attacco fra volta e facciata e all'attacco fra volta e transetto, se esistente (caso verificatosi per S. Francesco di Assisi – fig.9). A questo proposito dalla letteratura (Croci) si apprende che le massime accelerazioni al suolo, in direzione trasversale alla navata, sono state stimate in 0,19 g mentre quelle all'altezza delle volte della basilica superiore (ove si sono avuti i crolli) la stima delle accelerazioni massime (orizzontali) è di 0,60 g con amplificazione pari a $0,60/0,19$ rispetto al suolo. Le accelerazioni di progetto, a cui andrebbero sottoposte le volte rinforzate, sono state fissate in 1,20 g.

Questa impostazione è coerente con la recente Ordinanza della Protezione Civile (n.° 3274 del 20/03/2003) nella quale si legge al punto 11.1 : “Per gli edifici di speciale importanza artistica,omissis.....è richiesto di calcolare i livelli di accelerazione del suolo corrispondenti al raggiungimento di ciascuno stato limite previsto per la tipologia strutturale dell'edificio, nella situazione precedente e nella situazione successiva all'eventuale intervento”.

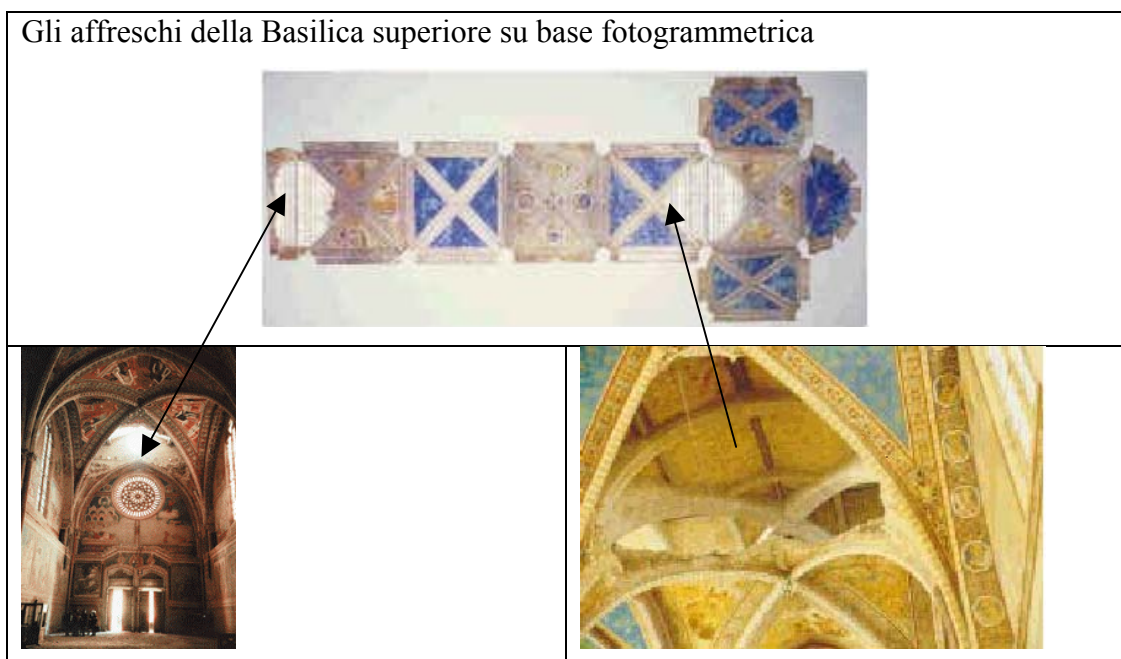


Figura 9

3.2) Direzione dominante del sisma: longitudinale

Le pareti laterali (longitudinali) assorbono le azioni forza più rilevanti e spesso evidenziano linee di frattura attive in modo II.a (meccanismi nel piano) – fig.10. La facciata evidenzia linee di frattura attive in modo I.b (meccanismi fuori del piano), tipico è il ribaltamento del timpano in fuori (sovente quando la copertura è a capriate) ovvero il ribaltamento della cimasa (nell'architettura barocca) o del campanile a vela se esistente (fig.11). L'abside tende a staccarsi dall'arco trionfale e si "apre" verso l'esterno (fig.12), ossia subisce dilatazioni con discontinuità (fessure) lungo la fascia perimetrale di sommità.

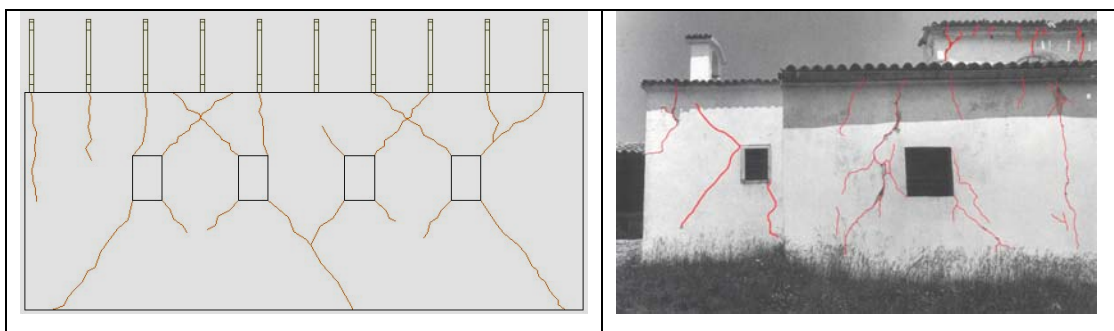


Figura 10: Macroelemento parete laterale. Immagine fotografica riferita ad una chiesa danneggiata dal terremoto del Friuli nel 1976



Figura 11: macroelemento timpano con campanile a vela. Immagine fotografica e rappresentazione del danno riferite ad una chiesa danneggiata dal terremoto dell'Umbria nel 1997

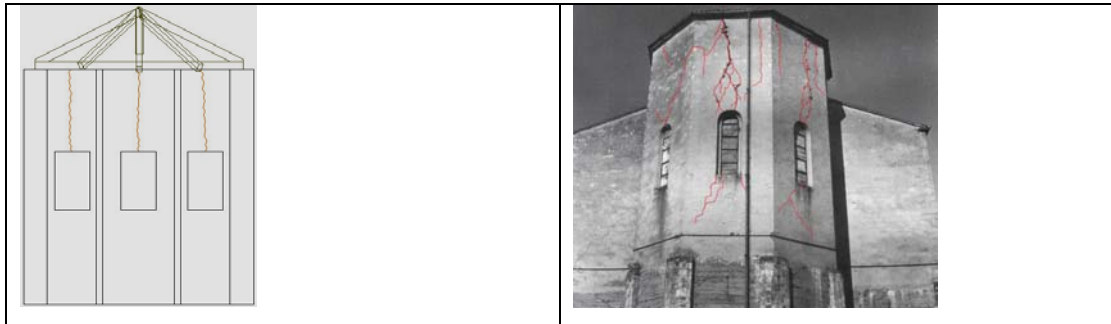


Figura 12: macroelemento abside. Immagine fotografica riferita ad una chiesa danneggiata dal terremoto del Friuli nel 1997

Il caso esaminato di aula senza navate laterali è il più semplice, più frequente è il caso a tre navate, una grande centrale e due laterali. La parete longitudinale della navata centrale, su colonne, si presenta strutturalmente come una trave alta su appoggi puntuali. Essa svolge funzione analoga a quella descritta in precedenza per la parete laterale. Rilevante è considerare se la copertura della stessa navata è a volta oppure a sole capriate. Si possono estendere le considerazioni precedenti sebbene l'organismo è spazialmente (il riferimento è sempre al comportamento strutturale sotto sisma) più complesso. In genere la facciata è maggiormente vincolata per cui i meccanismi fuori del piano sono diversi dal caso precedente. Identiche invece sono le considerazioni per quanto riguarda il timpano.

4) Azione bloccante degli FRP

Individuate le linee di frattura più probabili e i loro Modi di attivazione con i criteri precedentemente esposti, si applica la fasciatura superficiale di FRP a cavallo delle linee stesse tenendo in conto ciascuno dei Modi di possibile attivazione. Si deve considerare che se l'applicazione viene effettuata in corrispondenza della linea "potenziale", ossia senza che questa si sia effettivamente manifestata, il composito disposto con i criteri che si espongono, contribuisce comunque a "ritardare" la apparizione reale della linea, che però può apparire anche sottopelle, cioè in presenza di composito applicato. Il sistema linea di frattura effettiva con composito

applicato per azione che blocca l'attivazione del Modo relativo rappresenta l'obiettivo progettuale in esame.

Per il Modo I, schema I.a, la fasciatura con composito unidirezionale sarà sovrapposta alle due superfici esterne ortogonalmente alla direzione della linea (fig 13).

Per il Modo I, schema I.b, la fasciatura sarà posta sulla faccia della muratura che si apre (fig.14).

Per la linea di frattura attiva in Modo II.a l'azione bloccante si può esplicare con sovrapposizione alle due superfici esterne di fasce diagonali di FRP (fig.15, caso A), oppure di tessuto FRP multi direzionale (fig.15, caso A): questa soluzione si adatta bene anche per contrastare il Modo II.a alternato.

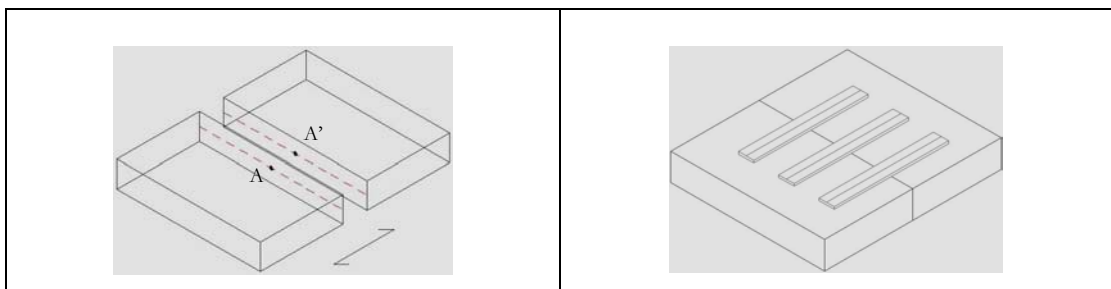


Figura 13

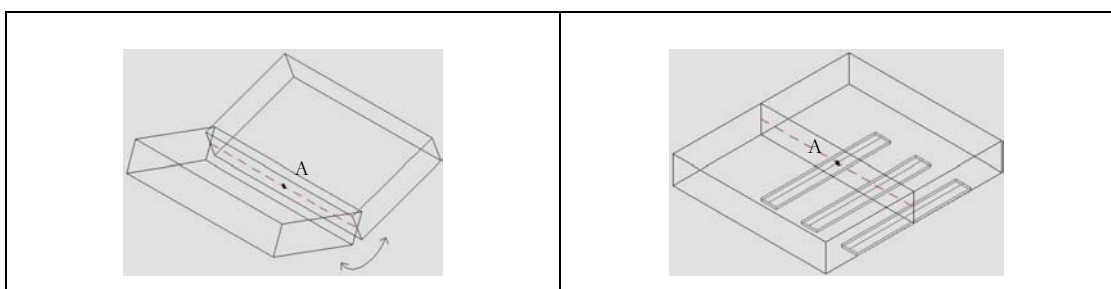


Figura 14

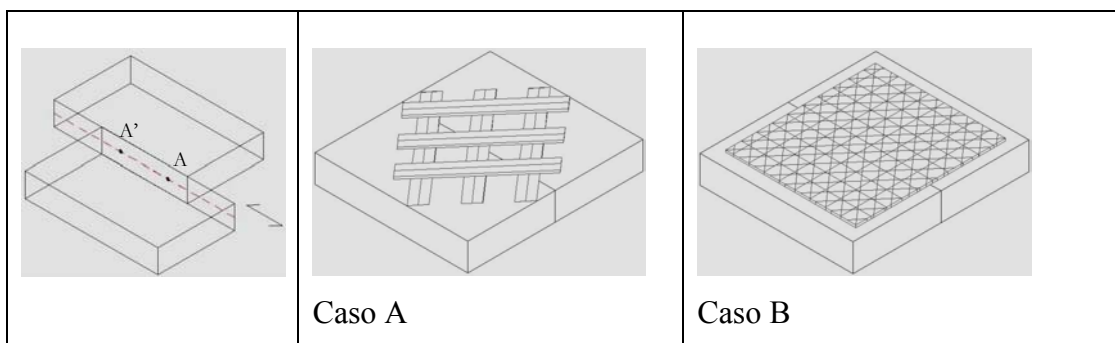


Figura 15: Il rinforzo F.R.P. può essere costituito da fasce sovrapposte tra loro ortogonali (caso A), oppure da tessuto pluridirezionale (casoB).

Per la linea di frattura attiva in Modo II.b si può esplicitare azione bloccante con sovrapposizione di composito sulle facce esterne della muratura sebbene il sistema risulta poco efficace. Infatti il cedimento dell'accoppiamento composito/muratura avviene per “peeling”, modalità poco resistente, in questo caso mancano però dati in letteratura scientifica.

La sezione trasversale della fascia sarà tale da poter sviluppare una adeguata forza resistente (bloccante). La verifica dovrà risultare positiva se al macroelemento sconnesso in blocchi rigidi, a cui sono applicate le forze di inerzia nel moto, le azioni resistenti delle forze sviluppabili dal composito sono sufficienti ad assicurare l'equilibrio.

Esemplificazioni sullo schema di studio

Intervenire sul costruito vuol dire “aiutare” il bene a sopravvivere al suo degrado, rispettandolo quanto più possibile nella sua interezza. Affinché questo si renda possibile, il rinforzo e/o il consolidamento strutturale devono essere compatibili con i canoni del restauro. Con quanto detto, si intende precisare che nonostante il bassissimo impatto degli F.R.P., può capitare che una soluzione di progetto strutturalmente valida possa non essere accettabile in quanto, ad esempio, la sua applicazione comporterebbe la perdita di parte del bene. Ciò è ben riassunto nell'esempio di figura 16, in cui la possibilità di applicare fasce di composito può

essere inaccettabile per la presenza di mosaici, di affreschi, o di altre opere di pregio sulla parete interna della facciata. Analogo problema si può presentare per il macroelemento di figura 17, dove per contrastare il meccanismo dovuto alle L.F. rappresentate, si dovrebbero disporre le fasce di composito sul piano esterno di facciata della parete. Mentre per il primo caso una disposizione diversa delle fasce renderebbe inefficace il rinforzo, nel caso della parete laterale si può pensare di intervenire in sommità, cioè sulla base di appoggio della copertura. Con tale proposta si è consci di non poter contrastare tutti i meccanismi conseguenti alle L.F. indicate, ma lo si ritiene comunque un buon intervento di presidio non invasivo.

| | |
|---|--|
| | |
| <p>Fig. 16: esempio di rinforzo per il macroelemento facciata soggetto ai modi Ib e IIa</p> | <p>Fig. 17: esempio di rinforzo per il macroelemento parete laterale soggetto ai modi Ib</p> |

Le stesse considerazioni sono valide per il macroelemento arco trionfale (fig.18), dove nella maggior parte dei casi, a parità di efficacia, il rinforzo può essere applicato sulla zona estradossale del macroelemento non oggetto di pregio.

In tutti i casi, comunque, l'intervento può essere occultato con diversi espedienti; esistono, infatti, numerosi esempi applicativi, simili al tipo riportato in figura 19, in cui le fasce di rinforzo disposte sulla superficie esterna del macroelemento risultano invisibili a lavori ultimati in quanto coperte da intonaco o leggermente percepibili poiché verniciate di un colore simile al contorno non rinforzato.

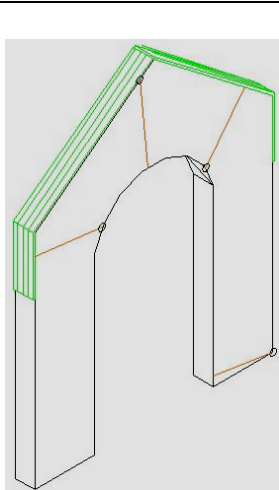


Fig.18: esempio di rinforzo per il macroelemento arco trionfale soggetto al modo Ib

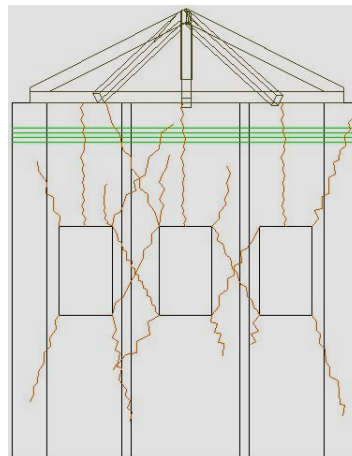
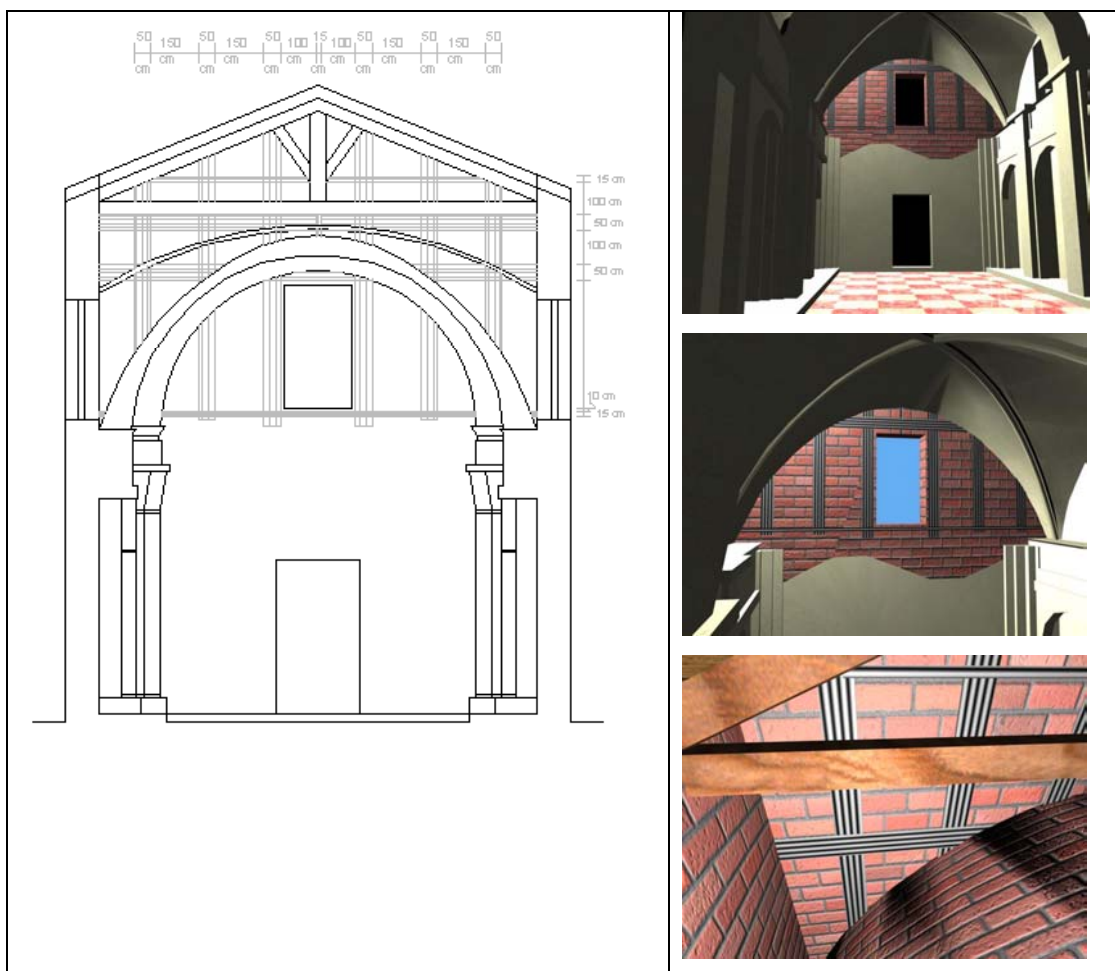
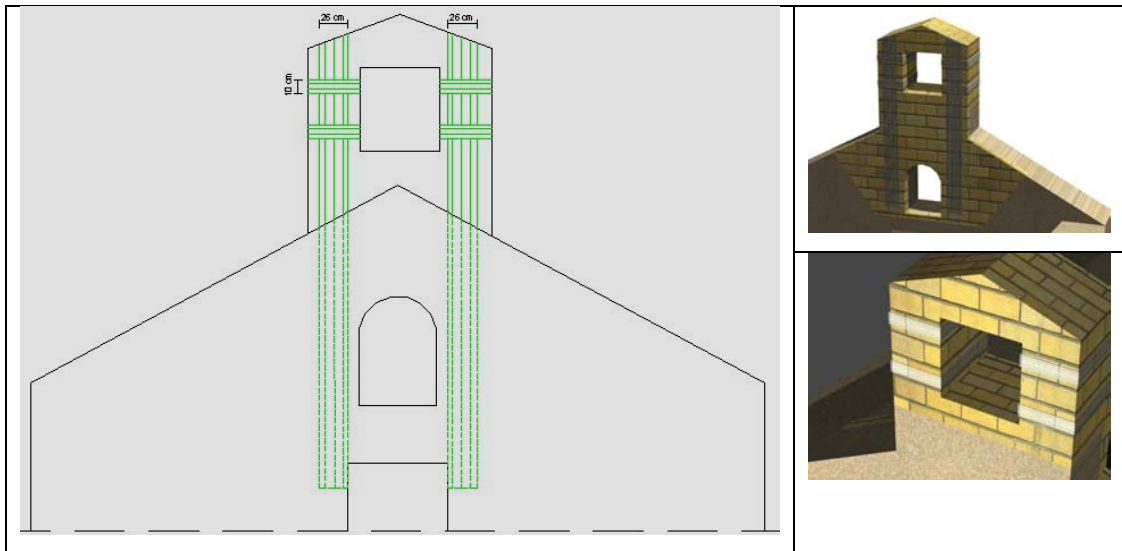


Fig.19: esempio di rinforzo per il macroelemento abside

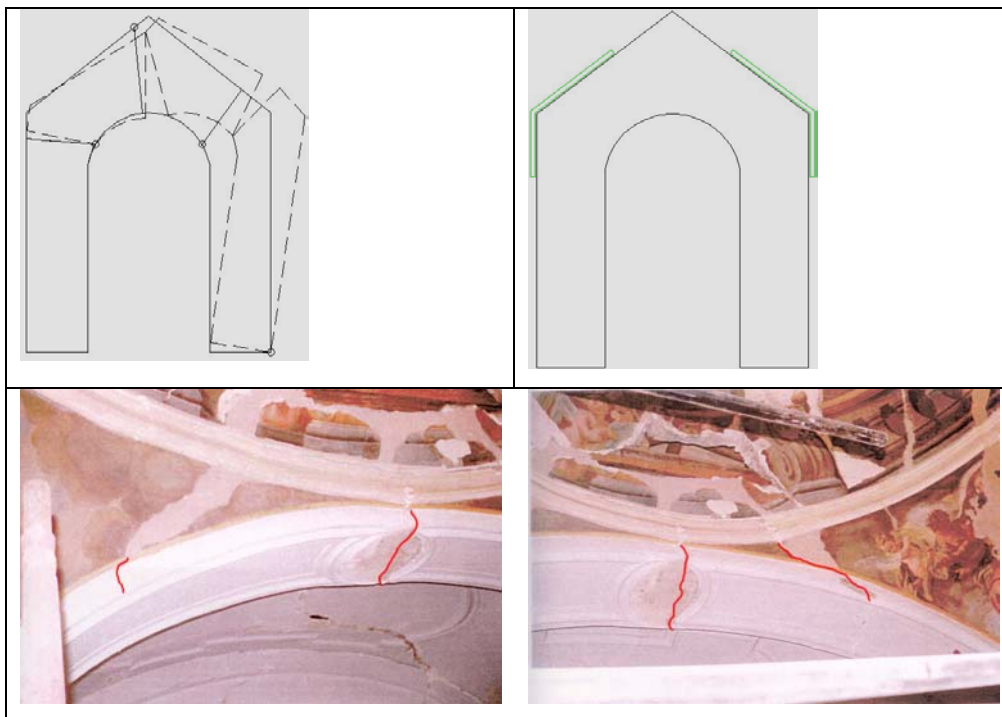
5) Esempi di studio



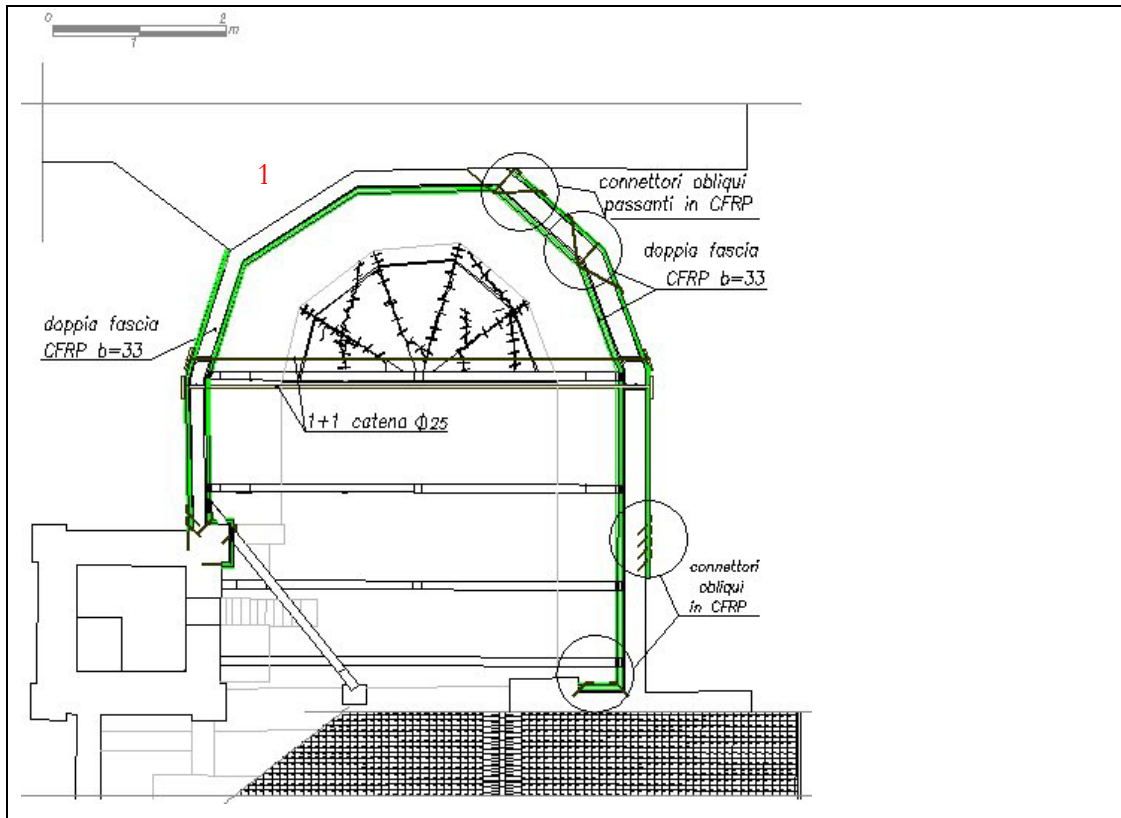
Rinforzo del macroelemento facciata della Chiesa di S. Biagio a Modena (D. Bufo – Tesi di Laurea)



Rinforzo del macroelemento facciata della Chiesa di S. Biagio ad Ali - Foligno (D. Bufo – Tesi di Laurea)



Rinforzo del macroelemento arco trionfale della Chiesa di S. Francesco a Larino (CB) (S. Castellani – Tesi di Laurea)



Rinforzo del macroelemento abside della Chiesa di S. Biagio a Modena (A. Di Tommaso – Progetto preliminare)

Nota: estrapolando il macroelemento dal contesto in cui è inserito, i meccanismi di collasso attivabili e le modalità di rinforzo sono riconducibili a quelli già esposti in precedenza e visualizzati in *esemplificazioni sullo schema di studio*. Tuttavia, la presenza dell'edificio 1 adiacente al corpo dell'abside ne modifica il comportamento, per cui lo schema di rinforzo viene adattato di conseguenza, rendendolo il più possibile efficace, pur non potendo fasciare il macroelemento lungo tutto il suo perimetro esterno.

Bibliografia:

F. Doglioni, A. Moretti, V. Petrini (a cura di), *Le chiese e il terremoto. Dalla vulnerabilità constatata nel terremoto del Friuli al miglioramento antisismico nel restauro, verso una politica di prevenzione*, Edizioni LINT, Trieste, 1994.

G. Croci, *Conservazione e restauro strutturale dei beni architettonici*, Utet libreria, Torino, 2001

A. Di Tommaso, F. Focacci, *Strengthening Historical Monuments with FRP: a Design Criteria Review*, in *Composites in Construction, a Reality*, Proc. of Int Workshop, Eds. E. Cosenza, G. Manfredi, A.Nanni, Capri, Italy 2001.

A. Barbieri, A. Borri, M. Corradi, A. Di Tommaso, *Dynamic Behaviour of Masonry Vaults Repaired with FRP: experimental Analysis*, in Proc. 6th Int. Masonry Conf. of British Masonry Soc., 2001

A. Borri, *Consolidamento contemporaneo. Edilizia Storica*, in *Trattato sul Consolidamento*, dir. scientifico. P. Rocchi sez. C.1.3., Mancosu Editore, 2003

Tesi di laurea: D. Bufo, *I compositi F.R.P. nel rinforzo dell'edilizia storica. Il timpano di facciata: vulnerabilità sismica e proposte progettuali*, Università IUAV di Venezia, CdL in Storia e Conservazione dei Beni Architettonici e Ambientali, A.A. 2000-2001

Tesi di laurea: S. Castellani, *Il macroelemento arco trionfale: vulnerabilità sismica e rinforzo con materiali compositi F.R.P. Caso di studio: chiesa di S. Francesco in Larino (CB)*, Università IUAV di Venezia, CdL in Architettura, A.A. 2002-2003

