

Post-sisma aquilano: analisi di crolli, di interventi provvisionali e prospettive tecniche di ricostruzione.

Angelo Di TOMMASO

Università ALMA MATER di Bologna
angelo.ditommaso@unibo.it

Sommario

*Inizialmente si fa riferimento agli eventi verificatisi a seguito del terremoto dell'Aprile 2009 a L'Aquila. Sono analizzati alcuni **crolli di edifici** di culto come situazioni ricorrenti in relazione a schemi strutturali, tessitura muraria e materiali tipici del luogo. Tra i casi di studio viene esaminata in particolare la situazione della chiesa di S. Pietro da Coppito nella quale la tessitura muraria storica ed i precedenti interventi di rinforzo hanno caratterizzato un singolare meccanismo di collasso della torre campanaria.*

*In riferimento alle **installazioni di presidio** post-terremoto appare preminente il sistema a "cinturazione" che utilizza tessuti o funi di fibra polimerica, in evoluzione rispetto ai sistemi a "puntello", a "contrasto" e a "gabbia" realizzati con materiali tradizionali (acciaio e legno). Come strutture di protezione temporanea dei ruderi compaiono strutture di profilati FRP pultrusi (S.Maria di Paganica).*

*I **materiali compositi**, specialmente quelli a matrice inorganica, sono candidati a ridurre le **vulnerabilità sismica delle costruzioni storiche** senza contravvenire ai principi del Restauro Architettonico.*

*Nelle fasi della **Ricostruzione** l'utilizzo dei compositi, sapientemente dosato, può conferire alle murature, come ampiamente sperimentato nei laboratori, apporti utili di resistenza e duttilità pur consentendo la permanenza dei caratteri tipologici delle costruzioni. Infatti i programmi di ricostruzione dovranno utilizzare tecniche sismo-resistenti compatibili con una riproduzione rispettosa dei caratteri peculiari delle costruzioni storiche pre-esistenti. I materiali e le tecniche da adottare dovranno consentire un incremento, rispetto alla situazione ante-sisma, della capacità di assorbimento dell'energia conferita alle strutture dal sisma. Da altro canto i materiali compositi presentano attualmente due direttrici di sviluppo: tecnologie avanzate (es.nano-tecnologie) o bio-compositi (fibre di lino, canapa, agave,...)*

Su questi principi si basano alcune proposte operative esaminate nell'articolo.

1) Introduzione

Il contenuto di questa relazione intende toccare come prologo alcuni punti di rilevante importanza nello scenario del sisma aquilano del 2009.

(a) Un'analisi di tipologie di crollo (meccanismi di collasso) di alcuni macroelementi di strutture monumentali di muratura, rappresentanti casi emblematici, in relazione a tessiture murarie locali tipiche e vulnerabilità intrinseche alla tecnologia costruttiva e alle forme architettoniche.

(b) Una valutazione sull'evoluzione dei sistemi di pronto intervento (e presidio) per la salvaguardia dei beni architettonici post-sisma in relazione alle esigenze del successivo consolidamento e ricostruzione delle lacune murarie intervenute, utilizzando materiali innovanti.

Si punterà poi sulla valutazione delle potenzialità che offrono i **materiali compositi, sulla base di sperimentazioni di laboratorio**, per la riduzione delle vulnerabilità intrinseche di architetture storiche e per le tecnologie appropriate di ricostruzione nel rispetto delle esigenze della conservazione dell'eredità architettonica.

2) Murature tipiche aquilane, vulnerabilità intrinseche e meccanismi tipici di crollo

In un grande numero di casi osservati dallo scrivente la muratura degli edifici del centro storico aquilano, ivi compresi gli edifici monumentali di culto, è costituito da murature così composte: conci di pietra locale non squadrata, a volte con presenza di giunti orizzontali regolarizzanti ma con spessore dei corsi variabile. Ossia i giunti orizzontali si distanziano tra loro in modo non costante. Spesso le malte sono inconsistenti per scarso potere legante. Rarissima è la presenza di diatoni e l'apparecchio murario si sostanzia spesso in due **“foglie parallele”** nel senso che entrambe le due facce del muro mostrano conci di pietrame, ma sussistono discontinuità di pietrame verticali, parallele alle facce, all'interno del muro. In molti casi non si tratta di “muratura a sacco” ma di apparecchio a “doppia foglia” o a “foglia multipla”. Analoghe murature si sono evidenziate anche nel Molise a seguito del terremoto del 2002.

Perché questo apparecchio si è andato affermando nel tempo così da rappresentare “la muratura storica” dell'Italia Centrale? In realtà le maestranze disponevano del materiale lapideo locale, di buona resistenza e soprattutto facilmente lavorabile allo “spacco”. Pietra di buona resistenza e bassa tenacità. I conci lavorati a mano risultavano quindi di dimensione non ripetibile, con spigoli non sempre vivi e ad andamento non rettilineo, con facce non ortogonali fra loro. In realtà le maestranze dovevano presentare alla committenza le due facce parallele (interna ed esterna) del muro: l'irregolarità dei conci implicava per forza di cose spessori di malta variabili.

Questo tipo di muratura ha sostanzialmente edificato edifici importanti e monumenti di culto, anche quando le murature di **grande snellezza** realizzate rendevano estremamente vulnerabile al sisma lo stesso paramento murario (Fig. 1).

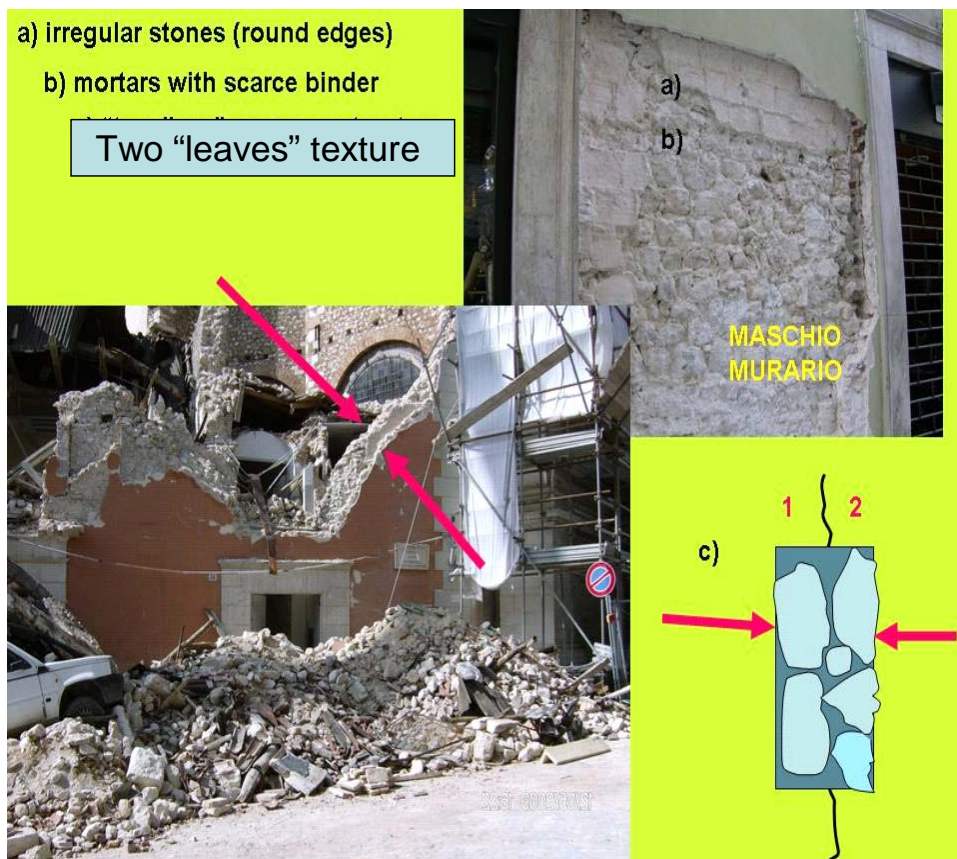


FIG. 1 - Muratura storica tipica a “doppia foglia”.
Meccanismi di collasso per “de-foliazione”

I meccanismi di collasso evidenziati dal recente sisma si differenziano da quelli standard osservati su murature compatte di mattoni, presentatisi nei recenti sismi dell’Umbria e Marche.

Per le azioni dominanti ortogonali al paramento, oltre ai meccanismi flessionali, pur sempre presenti, si aggiunge il *meccanismo di de-foliazione* ossia una delle due foglie (spesso quella esterna) si distacca poi ribaltandosi. L’assenza di diatoni facilita questo meccanismo anche perché l’energia di frattura dissipata è molto bassa in quanto le nuove superfici che si producono richiedono la frattura all’interno della malta: l’energia di frattura della malta è molto bassa in generale [11], nello specifico per quel tipo di malte aquilane molto, ma molto bassa. Da questo meccanismo se ne generano altri tipici susseguenti alla prima attivazione di de-foliazione anche in seguito agli sciami sismici che trovano un solido già lesa (Fig. 2).



FIG. 2 - Meccanismo di “de-foliazione”: la foglia esterna della muratura è collassata.
Abside di S.Eusanio Forconese AQ.

Per azioni sismiche dominanti nel piano del paramento, per questo apparecchio murario aquilano, i meccanismi di collasso sono anch'essi ibridi nel senso che la de-foliazione si attiva assieme alla cesura nel piano ortogonale al piano medio murario.

Questa muratura storica aquilana, negli interventi di Restauro degli ultimi due o tre decenni ha risentito del clima culturale dominante: *minimo o nullo intervento strutturale, massimo impegno nella cosmesi esterna dei tessuti murari, ripuliti e lisciati, a volte con ristilatura, usando malte “storiche” di scarsissima energia di frattura...* Sono molteplici infatti i casi di interventi di Restauro da poco ultimati o ancora in corso al tempo del sisma che allo scuotimento sismico hanno evidenziato rilevanti danneggiamenti alla costruzione.

Chiesa di S.Biagio a L'Aquila.

Nella facciata della chiesa di S. Biagio all'Aquila il restauro di poco precedente al sisma 2009 mostrava la parte inferiore un nuovo intonaco “*antico*”, nella parte alta la muratura a faccia vista ripulita e lisciata. Peccato che la vulnerabilità tipica di questo impianto architettonico, accentuata da un tetto appesantito da spessoramenti vari martellanti, abbia determinato il *meccanismo ricorrente di ribaltamento del timpano*.

Tale meccanismo è tristemente noto, molto documentato sin dal sisma del Friuli (1976), ma la finalità degli ultimi interventi è stata la “cosmesi”, unico obiettivo perseguito, come se la costruzione fosse “arte figurativa”. Il Restauro della facciata di S. Biagio, ultimato qualche mese prima del sisma, non aveva infatti ridotto la vulnerabilità, ha dissipato così ingenti risorse economiche senza salvaguardare il bene.

Situazioni simili sono ricorrenti nelle attività di Restauro dei Beni Architettonici storici in varie parti del mondo: l'analisi delle foto di fig. 3 mostrano una cura cosmetica rilevante nel restauro della cattedrale di Port au Prince (Haiti) precedente al sisma del 2010 e il disastroso crollo dello stesso monumento a seguito del sisma.



FIG. 3 Cattedrale di Port au Prince (HAITI)
prima e dopo il terremoto del 13 gennaio 2010



Chiesa di S. Eusanio a Sant'Eusanio Forconese (AQ)

Molto significativi e ricorrenti in Abruzzo i meccanismi di de-foliazione del paramento curvo absidale. Nelle strutture murarie compatte di mattoni è invece ricorrente la fessurazione verticale dell'abside che tende ad aprirsi. Un caso significativo di de-foliazione dell'abside è occorso all'abside della chiesa di S. Eusanio Forconese (vedasi la precedente fig2) ove gran parte della "foglia esterna" è crollata.

S.Pietro da Coppito a L'Aquila

In anni ormai passati il rimaneggiamento parziale di monumenti per riportarli alle forme architettoniche originali antiche era largamente praticato: la chiesa di S. Pietro da Coppito a L'Aquila ha avuto una singolare vicenda.

La facciata rifatta dopo il sisma del 1703 era di forme barocche, nel 1970 fu completamente rimaneggiata riproducendo le supposte forme originarie pre-sisma del 1703. Ora questa facciata ha avuto forti danni a seguito del sisma del 2009 (de-foliazione e conato di ribaltamento): quindi la

vulnerabilità intrinseca è legata a lavori recenti. In quegli anni '70 in cui l'interventismo strutturale era abbastanza attivo, la torre campanaria della stessa chiesa di S. Pietro era stata irrobustita (Fig.4) da cordoli in calcestruzzo armato, in altre parole la cella campanaria era stata resa rigida sul fusto della torre il quale era di spessa muratura a "foglie multiple". Ebbene il fenomeno di de-foliatura della sommità del fusto (sottostante alla cella) ha fatto perdere la planarità dell'appoggio della cella campanaria che è scivolata al suolo su di un piano inclinato (Fig. 5). L'intervento con il calcestruzzo armato senza legare "le foglie" della muratura sottostante non ha dato buoni risultati. Questa evenienza da forza al "partito dei non interventisti" e "contrari al calcestruzzo armato", partito che ora (A.D. 2010) è dominante.



FIG. 4 - Cella campanaria di S. Pietro di Coppito in posizione, prima del sisma



FIG. 5 – Piano inclinato formatosi per muratura defoliata sotto la cella campanaria di S. Pietro di C.
3) Intervento di presidio post-sisma funzionale alla ricostruzione

Una pagina nuova è stata scritta nella storia evolutiva del *Pronto Intervento di Salvaguardia*, ossia nell'**intervento di presidio** dei beni architettonici danneggiati, nella fase post-sisma e prona a ricevere nuovi scuotimenti. Tre sono le “*driving forces*” che hanno determinato questo notevolissimo avanzamento tecnico e concettuale seguito alle esperienze maturate [1], [2] nel terremoto dell’Umbria-Marche (27-09-1997) e del Molise (31-10-2002):

- a) disponibilità di nuovi ed efficienti materiali strutturali di intervento;
- b) disponibilità di nuovi ed efficienti mezzi meccanici per la movimentazione;
- c) esperienze acquisite in precedenti sismi dalle maestranze, individuabili essenzialmente nel corpo dei vigili del fuoco italiani.

Una classificazione per funzione strutturale dei sistemi di presidio (Fig. 6) può così schematizzata:

- 1) **Puntello** (o sperone);
- 2) **Contrasto**;
- 3) **Cintura**;
- 4) **Gabbia**.

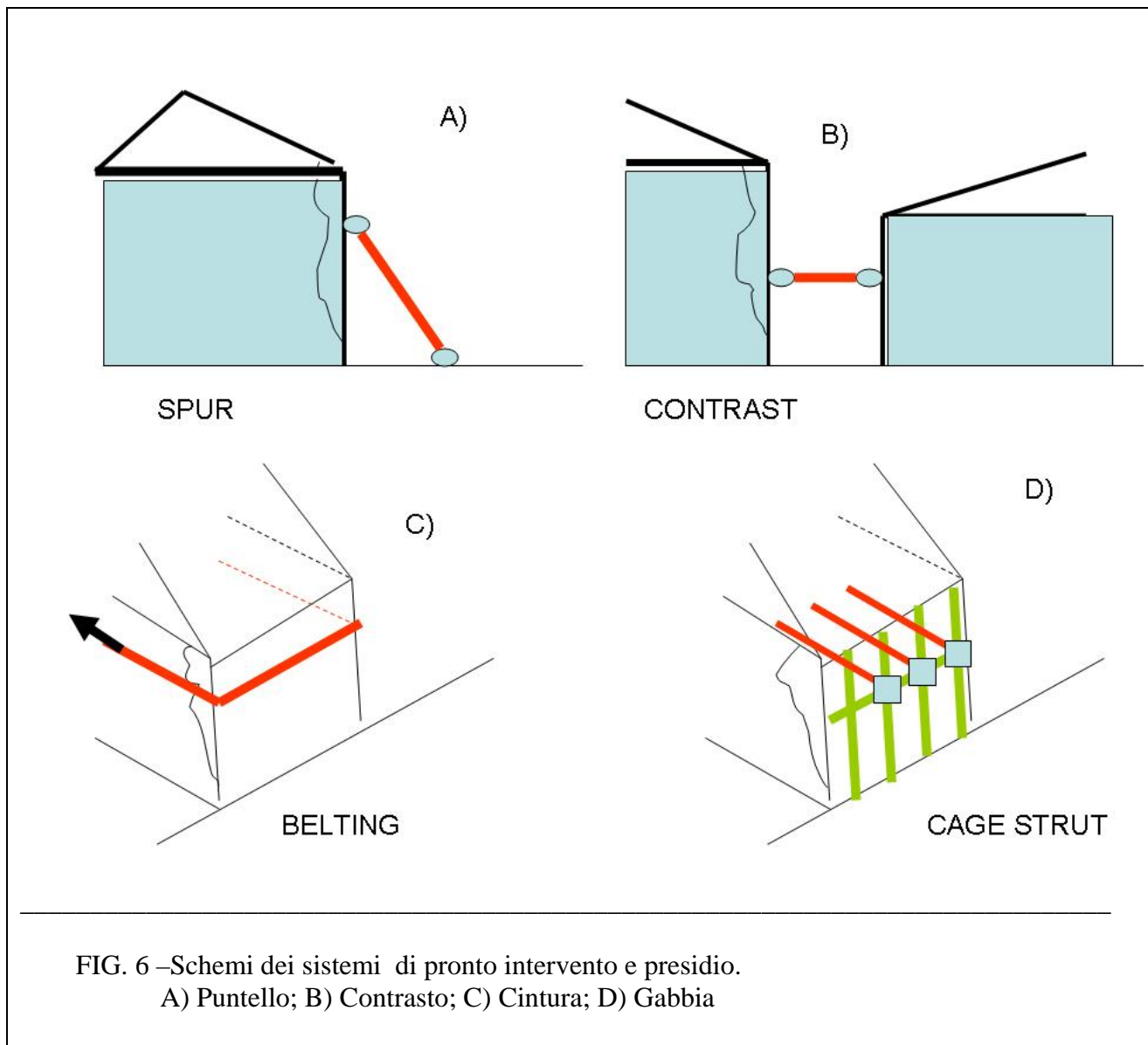


FIG. 6 –Schemi dei sistemi di pronto intervento e presidio.
 A) Puntello; B) Contrasto; C) Cintura; D) Gabbia

Puntello

I sistemi tradizionali di presidio si basavano sul concetto del “**puntello**”: i più antichi sistemi di puntellamento usarono il “barbacane”, ossia qualcosa con funzione strutturale non dissimile dall’arco rampante, in muratura e ben fondato. Questo sistema si oppone al ribaltamento delle pareti ed anche sviluppa azioni di sostentamento. I notevoli svantaggi sono: il lungo tempo di costruzione, l’ingombro e l’aumento delle masse partecipanti che il sisma può attivare. Ma soprattutto l’ostacolo alle successive operazioni di consolidamento e ricostruzione. Lo stesso concetto del “puntello” si è realizzato nel passato, ed è ancora in uso, con pali di legno, riducendo i tempi di esecuzione ed i pesi (Fig.7.a). La variante di questo sistema, attuato in tempi più recenti, è quella della realizzazione del puntello con strutture reticolari spaziali di tubi che generalmente si usano per i ponteggi: in questo caso il processo costruttivo è “industrializzato”. Restano gli svantaggi dell’ingombro e del costo della attrezzatura immobilizzata. Nel caso dell’Aquila si sono visti molti puntelli in legname e numerosi puntellamenti con tubi metallici, alcuni di questi ultimi di notevole dimensione. Strutturalmente questa costruzione provvisoria è concepita per lavorare in compressione con tutte le problematiche costruttive annesse: nodi e aste compresse. I sistemi di puntellamento sono strutturalmente semplici per il comportamento in condizioni statiche di sostegno ad un paramento in ribaltamento, meno semplice è il comportamento durante le scosse di sciame in connessione con la struttura sostenuta: infatti, il comportamento dinamico risente della protesi che funziona in piena solidarietà. E’ interessante osservare come è stato realizzato il vincolamento al suolo nei vari casi analizzati in loco: si va da un semplice appoggio (anche su suolo in pendio), a vincoli incastro.



a)



b)

FIG. 7 - Sistema Puntello (a); Sistema Contrasto (b)

Contrasto

Un sistema concettualmente diverso è il “**contrasto**”: esso non sempre è possibile poiché necessita in genere di altra costruzione in grado di ricevere la spinta in condizioni statiche (Fig.7.b). Nasce però forte interazione strutturale in caso di eccitazione dinamica da sciame. Giuridicamente complesso è difficilmente attuabile nei casi di terremoti che danneggiano diffusamente il patrimonio edilizio. Comunque esso è realizzato con struttura di legname o con reticolare con tubi in ferro.

Cintura

La vera novità di questo post-terremoto è stata la diffusione del sistema di “cinture” (Fig. 8).

In questo caso la struttura aggiunta di salvaguardia è in trazione e si richiude in se stessa. Essa fa uso di **cinghie**, quelle generalmente in uso nei porti per movimentazione di grossi carichi (in gergo si chiamano **Braghe**): la messa in tensione avviene con semplici dispositivi a cremagliera (cricchetti). In questo caso il “lay-out” deve essere sapientemente studiato, evitando tratti lunghi senza rinvii, interponendo ripartitori (generalmente lignei) sulla struttura da sostenere (Fig. 9). Il funzionamento della struttura originaria in fase dinamica non cambia di molto rispetto a quella originaria se non per il mantenimento della compattezza scatolare anche a eccitazioni più violente.

In altre parole i modi di vibrare della struttura fasciata tendono a quelli precedenti al sisma, ossia della fase iniziale (non fessurata) dello scuotimento. I materiali delle cinghie sono polimerici a grande efficienza per rapporto resistenza/peso. L’applicazione si avvale di mezzi meccanici a grande sbraccio ed elevazione. Il sistema è rapido, economico, efficiente (leggero e molto resistente), non invasivo, facilmente adattabile a nuove esigenze, soprattutto non ostacola il definitivo intervento di ripristino strutturale.

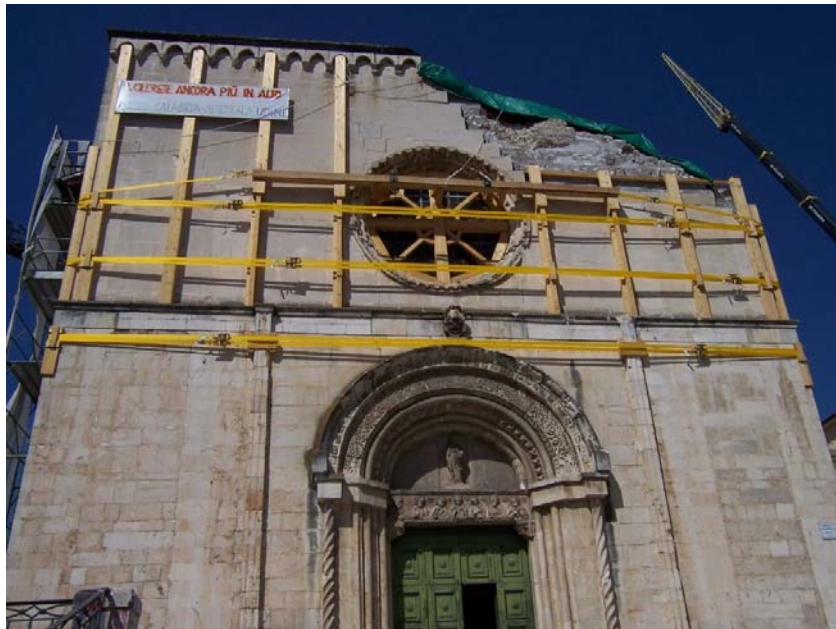
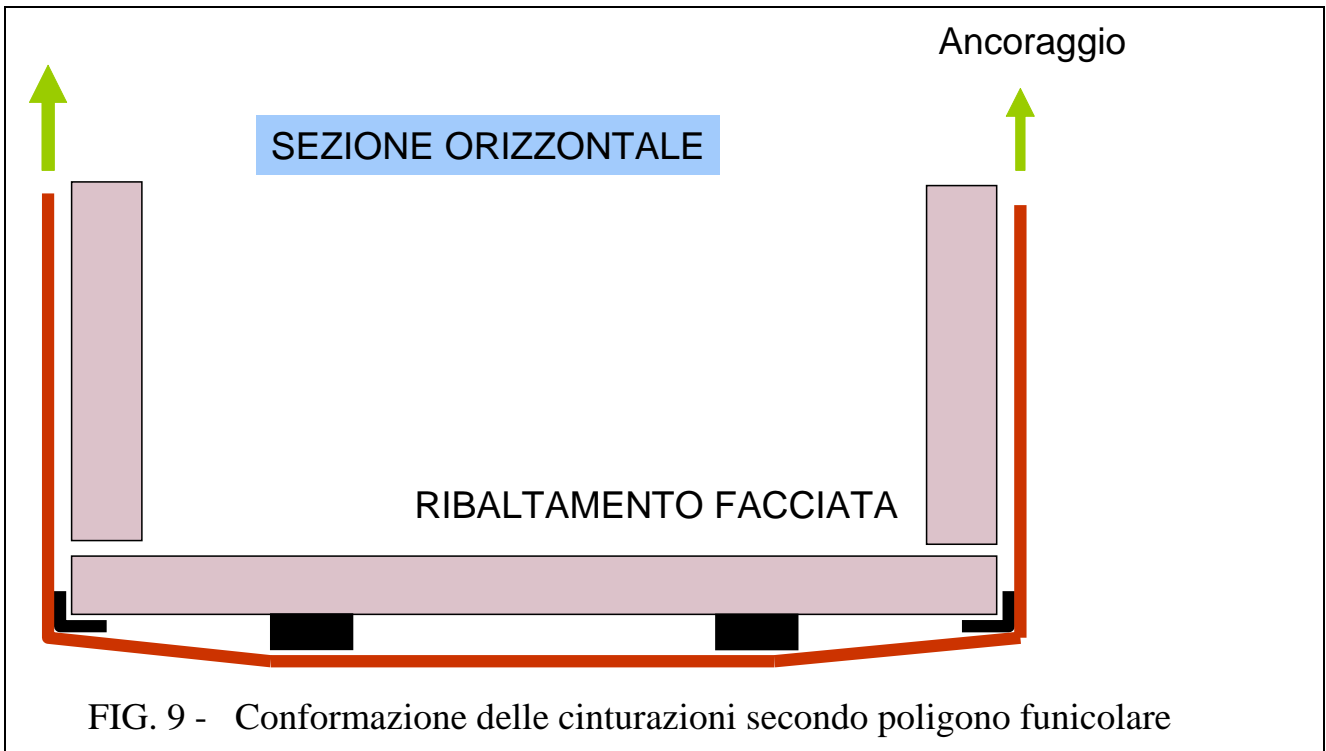


FIG. 8 – Cinturazione della facciata di S. Pietro di Coppito (AQ)



Gabbia

Per completezza bisogna annoverare i sistemi a “gabbia” nei quali con una struttura alquanto complessa la costruzione viene avviluppata ed i ritegni sono principalmente chiusi in se stessi, anche se si avvalgono di puntelli e controventi. I materiali utilizzati sono legno ed acciaio o solo acciaio. In questo caso il sistema non differisce concettualmente molto da quello della cinturazione, sebbene comporti un funzionamento a telaio e inoltre determina un aumento delle masse attivabili similmente oltre ad una forte interazione fra vecchia e nuova struttura con rigidità flessionale (Fig. 10)



FIG. 10 Sistema a gabbia metallica con puntelli .

Di questi sistemi esemplificati, oltre ai vantaggi e svantaggi annoverati, bisogna considerarne l'interferenza con la fase successiva di esecuzione del ripristino. I sistemi ingombranti rendono maggiormente difficile la sostituzione del presidio con il consolidamento e la ricostruzione finale: anche per questo motivo è di gran lunga preferibile la cinturazione che si slaccia facilmente in fase di intervento definitivo, quello cioè della fase di ripristino, rinforzo e ricostruzione.

4) Problematiche tecniche post-sisma nel consolidamento e nella ricostruzione

Negli anni '80 -'90 la cultura del Restauro era maggiormente incline all'intervento di rafforzamento delle architetture storico monumentale nelle zone a rischio sismico di quanto non lo sia recentemente: in genere sono state usate a quel tempo tecniche facenti largo uso del calcestruzzo armato ed anche di protesi in acciaio [3], [6]. Successivamente nell'ultimo decennio la cultura del Restauro ha dirottato sul "non interventismo". In realtà "il cordolo di cemento armato" impiegato nel passato non ha dato i risultati attesi, con evidenze negative sul campo a seguito di scuotimenti sismici. Perché? Lo scrivente ritiene che il sostenere che l'aumento di peso è il solo punto sfavorevole non è da accettare in toto: infatti il peso specifico del calcestruzzo armato può essere del 10-15% superiore a quello della muratura di pietrame: se esso calcestruzzo sostituisce la muratura l'aggravio di peso è molto modesto.

La rigidità in fase iniziale di sollecitazione non è molto dissimile da quella della muratura, però superando il livello iniziale di sollecitazione e considerando il comportamento in fase danneggiata e preliminare al collasso locale, il divario si accentua e sostanzia la differenza fra calcestruzzo armato e muratura. L'**Energia (specifica) di Frattura** necessaria per spezzare il legame di continuità del calcestruzzo armato può essere anche 100 volte superiore all'energia specifica di frattura della muratura che può ridursi a quella della sola malta in certi apparecchi murari errati. Pertanto quando l'energia vibrazionale trasmessa dal terremoto si abbatte sulla zona mista muratura/cordolo in calcestruzzo armato, trova subito sfogo dissipante nel danneggiamento della muratura: ciò induce a valutare la muratura come se fosse indebolita. Non si può quindi escludere che un cordolo in calcestruzzo armato di piccola dimensione, superimposto a muratura sana e/o rafforzata, possa avere effetti positivi.

Comunque la problematica non è risolvibile con affermazioni generalizzate senza una, seppur non facile, analisi specifica. Il caso già evidenziato del campanile di S.Pietro da Coppito non gioca a favore della soluzione adottata negli anni 70, la quale ha voluto irrigidire la sommità della torre con il calcestruzzo armato non intervenendo opportunamente sulla muratura sottostante. Né sono di conforto altre visioni di meccanismi di collasso realmente verificatisi in cui si vede il cordolo penzolante su brandelli di muratura collassata (Fig.11 e Fig.12).

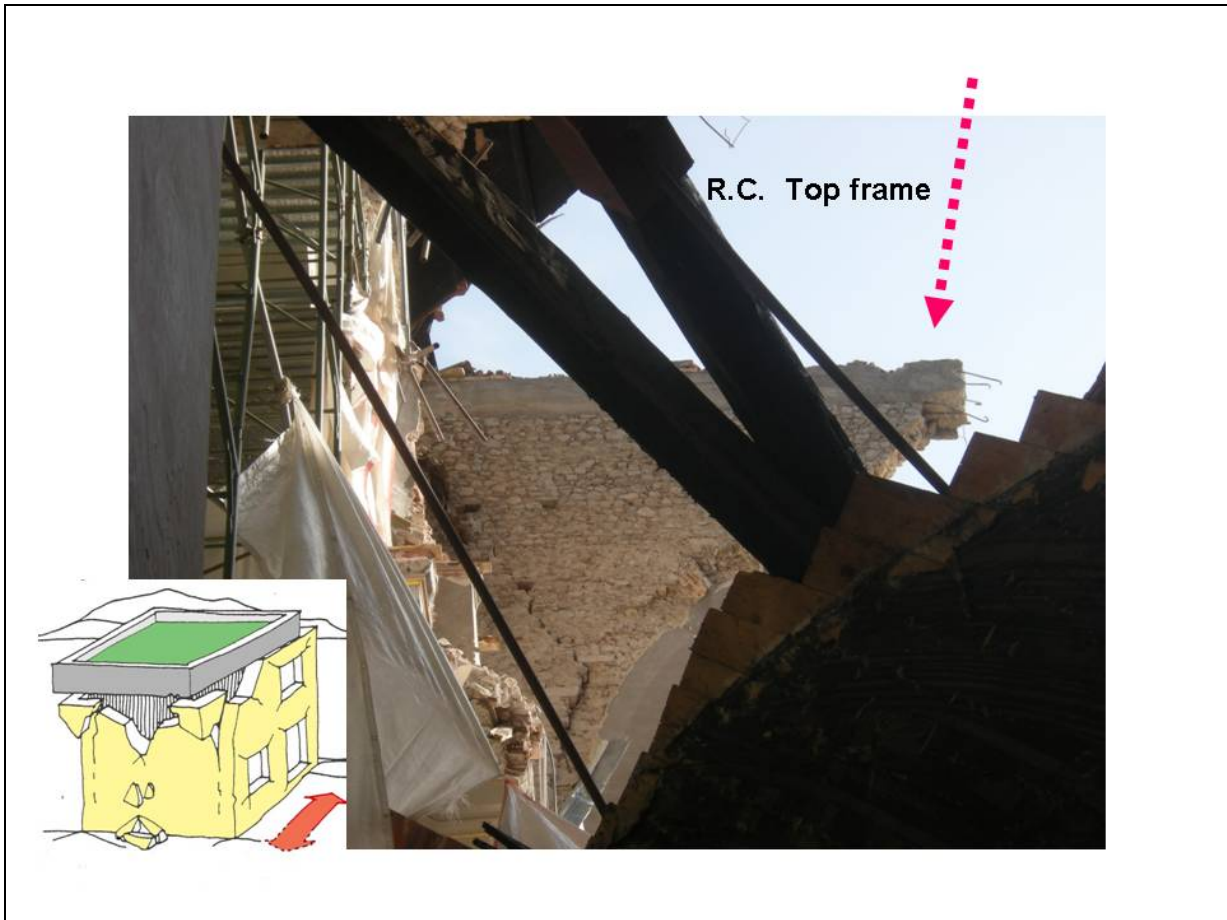


FIG. 11 – Cordolo in calcestruzzo armato di sommità su muratura collassata



FIG. 12 – Cordolo in calcestruzzo armato partecipe dei meccanismi di collasso

A proposito di interventi “pesanti” con calcestruzzo armato, voglio citare qui il caso di un campanile di una chiesa a Campli, in provincia di Teramo. Piuttosto lontano dall’epicentro il campanile durante il sisma del 2009 ha vibrato notevolmente anche a detta di testimoni: ora guardata a distanza la muratura non mostrava danni.

In realtà in anni passati il campanile aveva ricevuto un rafforzamento generalizzato con camicia interna in calcestruzzo armato e finta muratura all’esterno, nel senso che i conci di pietra erano resi solidali col getto di calcestruzzo (Fig.13). Il campanile ha funzionato bene! Ciò porta vantaggio alla tesi che i rinforzi localizzati di calcestruzzo armato sono negativi mentre con quelli diffusi e generalizzati le cose vanno meglio; però così non si rispetta “l’eredità architettonica”.



FIG. 13 - Intervento “pesante” di rifacimento in calcestruzzo armato e falsa muratura
Campanile di S. Francesco a Campli (TE)

Allora che fare ?

Il cordolo di calcestruzzo armato in sommità dei paramenti murari “*non s’ha da fare*”!

La ricostruzione intera di calcestruzzo con falsa muratura “*non s’ha da fare*” !

Allora che fare ?

Come ulteriore informazione sul campanile di cui sopra bisogna dire che esso è in continuità strutturale con la chiesa di San Francesco: il danno si è palesato sul muro della chiesa nella zona in continuità col campanile: questo avvalorava la semplice nozione che rafforzando una parte della costruzione si mutano i meccanismi di collasso che si trasferiscono sulle parti ove si giunge al collasso con minore energia di frattura dissipata: in questo caso i danni si sono trasferiti nella muratura contigua al campanile il quale era di calcestruzzo armato. Il concetto non è dissimile da

quello analizzato per il robusto cordolo di calcestruzzo armato in sommità alla muratura di un edificio.

5) I materiali compositi quali strumenti di inibizione dei meccanismi di collasso delle murature storiche nello scuotimento sismico

I **Materiali Compositi** sono ormai frequentemente utilizzati come rinforzo strutturale delle costruzioni esistenti. Stante la maggior distribuzione delle costruzioni in calcestruzzo armato nei paesi tecnologicamente avanzati i quali hanno anche zone a rischio sismico (es. Giappone, California), la prassi del rinforzo con i compositi ha riguardato prevalentemente proprio le costruzioni in calcestruzzo armato. Negli stessi paesi i materiali compositi disponibili al trasferimento tecnologico al civile sono nati nel campo delle costruzioni industriali (aeronautiche, navali, automobilistiche, etc.) e rispondono a tecnologie di livello medio-alto. Essi hanno una matrice polimerica (es. epossidica) ed una armatura in fibre di alto modulo e resistenza elevata (Carbonio, Aramide, Vetro speciale, etc.), sono denominati **FRP**, acronimo di **Fiber Reinforced Polymer**.

La funzione nel rinforzo strutturale con compositi delle strutture in calcestruzzo armato è riconducibile alle fasciature delle colonne (aumento di portanza a presso-flessione, taglio e duttilità), placcaggio delle travi (aumento resistenza a taglio, a flessione) e fasciatura dei nodi.

Il nostro paese invece presenta anche un vasto insieme di costruzioni “storiche” in muratura che abbiamo il compito di “conservare” per le generazioni che verranno. La “conservazione” di esse in zone a rischio sismico impone una strategia a larga condivisione. La maggioranza di queste costruzioni sono in uso (si pensi agli edifici di culto), ma anche sono oggetto di visite da parte di interessati alle espressioni artistiche del passato (funzione museale). Ogni costruzione del passato, se in uso, storicamente ha acquisito trasformazioni in linea con la evoluzione del gusto e della tecnologie del tempo. La nostra cultura ha invece scelto di congelare il monumento al momento attuale, procedendo solo a rivitalizzare gli aspetti estetici senza ridurre le vulnerabilità strutturali ormai acquisite in consapevolezza dopo i recenti terremoti.

Pertanto l’uso di Materiali Compositi per la riduzione di vulnerabilità in zona sismica delle costruzioni storiche deve superare ostacoli di principio. Le matrici dei Compositi Tradizionali, costituite di polimeri, rappresentano un gap materico molto rilevante per le applicazioni in ambiente murario storico. D’altra parte alcune caratteristiche chimico-fisiche dei compositi FRP possono rappresentare obiettive limitazioni micro-ambientali.

I **materiali compositi** a fibra continua sono da tempo utilizzati, sebbene non diffusamente, per il rinforzo strutturale, spesso in zona sismica, di **edifici storici** [3].[5], [6]; i principi base sono discussi in [7] ed uno stato dell’Arte si ritrova negli Atti di un recente seminario dedicato all’uso dei compositi per il rinforzo di strutture di muratura tenutosi a Venezia [8].

Recentemente sono state sperimentati nei laboratori di Ricerca, e quindi applicate, altre tipologie di **compositi a matrice inorganica** che riducono il gap materico con le murature storiche: di fatto il comportamento strutturale di questi compositi è differente da quello degli FRP. Infatti le armature di tessuto in fibra strutturale, prevalentemente costituite di **Roving**, non si *impregnano* in toto.

Ciò comporta che in fase di collasso del composito, quando la matrice si fessura, si abbia uno scorrimento dell’intero roving all’interno della matrice ed anche uno scorrimento dei filamenti secchi fra loro all’interno del roving stesso (Fig.14).

Questo fenomeno corrisponde ad una notevolissima dissipazione energetica che rende il collasso del composito microscopicamente duttile. A parte va considerato il fenomeno di de-laminazione o

distacco dal supporto: la composizione chimica della matrice inorganica e quella del supporto sono compartecipi nel determinare le condizioni di crisi.



Fig. 14 Tipico meccanismo di crisi di un composito a matrice a base cementizia e armatura con roving di fibre di carbonio che scorrono all'interno del pacchetto. Sperimentazione su travi di calcestruzzo armato rinforzate con FRCM al LabSCo-VE.

6) Alcune tecniche robuste utilizzando i Compositi per la Ricostruzione degli edifici storici parzialmente crollati dopo il sisma aquilano

Ora siamo di fronte, in Abruzzo, alle esigenze di una **Ricostruzione** e non di una semplice **Conservazione**: perché la popolazione rivuole il bene (mi riferisco in particolare agli edifici monumentali per il culto ed ai *landmark*) e non si accontenta di conservare il rudere.

Bisogna ricostruire le parti mancanti, le parti crollate! Rifarle come erano, con le pietre locali non squadrate e la malta di calce, con sistema a “due foglie”?

La razionalità si oppone a questa posizione culturale tecnica. I muri di molti monumenti aquilani erano molto snelli, non ben controventati, non bene ammorsati (Fig.15): il tessuto murario dovrà avere qualità strutturali più elevate per riconfermare le geometrie preesistenti.



FIG. 15 - Murature di grande snellezza a foglia multipla. S. Maria di Paganica (AQ).

Anche nelle “**Ricostruzioni**” l’uso dei materiali compositi ha avuto recentemente in Italia le sue applicazioni di rilievo.

Una evoluzione dei compositi, più adatta alle murature storiche, è costituita dagli **FRCM** (Fibre Reinforced Cementitious Matrix). Oltre che per rinforzi strutturali questi materiali sono stati impiegati infatti nella ricostruzione. Esempi sono quelli della ricostruzione della grande cupola della cattedrale di Noto in cui alcuni giunti fra pietre (calcarenite segata) sono stati realizzati con compositi con matrice inorganica (a base cementizia modificata con polimero) e armati con rete in fibra di carbonio.

Lo stesso materiale FRCM è stato usato nei giunti dell’arco romano di Porta Montanara a Rimini, la quale è stata smontata e traslata, concio per concio, nel sito originario e ricomposto con giunti armati con rete a fibra di carbonio.

Una proposta [10], in coerenza con le esigenze della conservazione della foggia originale e della nuova robustezza strutturale, è quella di ricostruire con *muratura “listata” in laterizio ed armatura interna in FRCM*, oppure nella variante *SRG (Steel Reinforced Grout)* che prevede armatura a fili metallici.

La muratura listata è di origine romano-antica ma si trova in molte costruzioni medievali, tardo medievali e anche successive dell’area del mediterraneo (Fig.16). La listatura ha una tessitura con mattoni, ove due o tre corsi di mattoni listano la muratura di pietra da taglio. Il tutto risulta a fasce (o bande) alternate, laterizi e pietrame. Ora qui come innovazione rispettosa si introduce il giunto fra laterizi costituito da composito, quindi giunto armato di composito (Fig.17).



FIG. 16 – Muratura “listata” nella facciata di *Saint Joan* a Barcellona (Spagna)

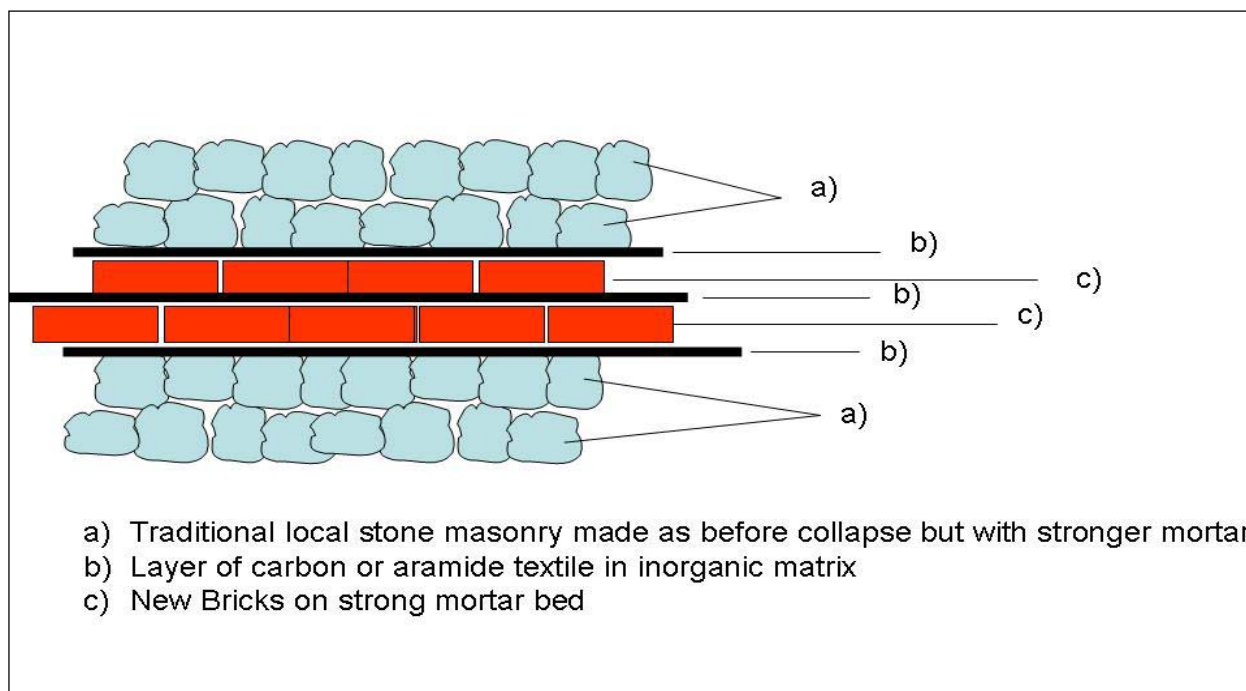


FIG. 17 – Proposta di muratura con tessitura integrata per la RICOSTRUZIONE:
 “listatura” con mattoni e armatura con composito..

La listatura se eseguita in sommità del muro costituisce un cordolo di laterizio armato con composito: esso è leggero, resistente a trazione e consente una ripartizione degli sforzi nel solido murario. Naturalmente nel formare la listatura armata si farà frequente uso di diatoni. Questa proposta si ricollega ad una proposta di A. Borri [3] che ha sperimentato cordoli con tavelloni di laterizio con interposizione malte armate di fibre continue ad alta resistenza. Interessante la proposta di F. Doglioni et al.[4] che prevede un cordolo a nastro con armatura metallica reticolare in matrice di malta : in effetti lo stesso potrebbe essere realizzato con armature in composito. Nei casi citati si tende a superare gli inconvenienti registrati con il pesante cordolo in calcestruzzo armato ma non rinunciando a coronare la sommità della muratura con un “nastro” poco rigido ma molto resistente. Dunque **ricostruzione con muratura listata armata di composito** come struttura resistente a vulnerabilità ridotta: essa consente anche la faccia vista.

La tecnica di ricoprimento dell’estradosso delle volte in muratura con fasce di composito a fibra continua (FRP, FRCM, SRG) è largamente praticata (Fig.18) ed accettata e dovrà essere attuata in modo esteso nel consolidamento dell’esistente ma soprattutto anche nella **ricostruzione** nel senso che le nuove volte in pietrame o in mattoni, da riprodurre secondo le volumetrie pre-esistenti, si dovrebbero giovare dell’apporto del **ricoprimento estradossole con fasce di composito con connettori in fibra alle imposte**, a presidio dei potenziali meccanismi di collasso.



PLATING with
FRCM

Fiber Reinforced Cementitious Matrix

FIG. 18 - Placcaggio estradossale di volte con compositi a matrice cementizia e armatura di rete di carbonio

La sfida è quella di rispettare al massimo la tipologia muraria e l'impianto strutturale ma con il concorso di nuove tecnologie (compositi con matrici evolute/nanotecnologie applicate alle basi cementizie) che ne riducano le vulnerabilità intrinseche nella tradizionale muratura aquilana.

Ringraziamenti

Le esperienze maturate in loco e che mi hanno consentito di scrivere questo articolo, sono relative ai sopralluoghi effettuati in Abruzzo nella delegazione della Università IUAV di Venezia, coordinata dal prof Salvatore Russo, la quale ha operato su alcuni casi di studio affidatigli dal MiBAC. Ringrazio anche l'arch Carlos Carrer che mi ha fornito le foto di Figg. 2 e 4 e varie informazioni su S.Pietro di Coppito.

Bibliografia:

- [1] L. Marchetti (2007) “Le opere provvisoriale e la messa in sicurezza dei beni” in *Beni Culturali in Umbria: dall'emergenza sismica alla ricostruzione*, M. Picarretta Ed., MiBAC, Roma., ISBN 88-86210-58-2
- [2] S. Podestà et al. (2005) “Il problema della messa in sicurezza dei beni monumentali” in *Beni Monumentali e Terremoto: dall'emergenza alla ricostruzione*, G.Cifani et al. Curatori, Regione Molise, DAST-UOIG CNR L'Aquila.
- [3] AA. VV. (2003) “Consolidamento Contemporaneo - Edilizia storica” in *Trattato sul Consolidamento*, P. Rocchi direttore scientifico, Mancosu Editore, Roma. ISBN 88-87017-06-9
- [4] F. Doglioni, P. Mazzotti (2007) “Codice di Pratica” Editore dalla Regione Marche, Ancona. ISBN 978-88-902669-0-4
- [5] A. Di Tommaso, F. Focacci (2001) “Strengthening Historical Monuments with FRP: a Design Criteria Review”, in *Composites in Construction: a Reality, Int. Workshop, Capri*, E. Cosenza, G. Manfredi, A. Nanni Eds., Proc. ASCE 2002. ISBN 0-7844-0596-4
- [6] J. Jasienko, T. Lodygowski, P.Rapp (2006) “Naprawa, konserwacja I wzmacnianie wybranych, zabytkowych konstrukcji ceglanych” *Wydawnictwo DWE*, Wroclaw. ISBN 83-7125-143-2
- [7] F. Focacci (2008) “Rinforzo delle murature con materiali compositi” *Flaccovio Ed., Palermo* ISBN 978-88-7758-819-7
- [8] A. Di Tommaso, curatore. (2009) “Mechanics of Masonry Structures strengthened with Composite Materials” *Seminar in Venezia, April 2009, Proc. Printed by Pitagora Ed. s.r.l, Bologna*. ISBN 88-371-1771-X
- [9] A. Di Tommaso (2009) “Injured architectural heritage in L'Aquila after the earthquake 2009: Some general remarks”. *Wiadomosci Konserwatorskie*, vol 26;p.177-185, ISSN: 0860-2395.
- [10] A. Di Tommaso (2010) “Tecniche e materiali appropriati per la ricostruzione degli edifici storici di culto a l'Aquila dopo i crolli dell'aprile 09” *Seminario Internazionale EVOLUCIÓN EN EL DISEÑO, REHABILITACION Y MONITORIZACION DE ESTRUCTURAS –CIAS/ Grupo Español de IABSE, Madrid*
- [11] Rots J.G.. (Ed.). *Structural masonry - An experimental/numerical basis for practical design rules*. CUR report 171 (in Dutch), Gouda: CUR; 1994. - (English version) Rotterdam: Balkema; 1997.

Addì 24 maggio 2011