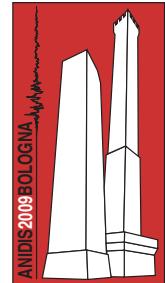


# Vulnerabilità sismica delle chiese a una navata nel Val di Noto

Ivo Caliò, Massimo Marletta e Bartolomeo Pantò

*Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Catania. Viale Andrea Doria 6, 95125 Catania*



**Keywords:** *Edifici monumentali, vulnerabilità sismica, macro-modello, elementi finiti nonlineari, meccanismi di primo modo.*

## ABSTRACT

La stima della vulnerabilità sismica degli edifici di carattere storico rappresenta un problema di enorme rilevanza applicativa e costituisce un passo preliminare importante ai fini della salvaguardia del patrimonio artistico e monumentale. Una tipologia di edifici monumentali particolarmente diffusa ed esposta al rischio sismico è rappresentata dagli edifici di culto. In tali costruzioni il sisma tende a impegnare la muratura soprattutto fuori dal proprio piano, favorendo l'insorgere dei cosiddetti meccanismi di ribaltamento di primo modo.

Nel presente lavoro viene stimata la vulnerabilità sismica di una chiesa ad una sola navata del Comune di Noto che si ritiene possa essere rappresentativa di numerose chiese simili presenti nel val di Noto. In particolare sono stati sviluppati due modelli tridimensionali della chiesa di San Michele mediante due diversi approcci di modellazione: un approccio ai macro-elementi, sviluppato dagli stessi autori, ed un approccio agli elementi finiti non lineari in ambiente ADINA. In entrambi i casi la resistenza sismica dell'edificio è stata indagata mediante analisi statiche non-lineari (push-over) condotte lungo diverse direzioni e fino al collasso della struttura. Tali risultati si ritiene possano costituire una base conoscitiva utile per qualunque intervento di consolidamento, restauro o riparazione per edifici simili nel val di Noto.

## 1 INTRODUZIONE

Nei progetti di salvaguardia del patrimonio artistico e monumentale il sisma rappresenta certamente il più importante rischio da cui è necessario difendersi. Una tipologia di edifici monumentali particolarmente diffusa ed esposta al rischio sismico è rappresentata dagli edifici di culto. In particolare le chiese, a causa della peculiare geometria che le caratterizza, hanno in molti casi evidenziato una maggiore vulnerabilità rispetto ad altre tipologie di manufatti storici in muratura. La presenza di grandi aule senza muri di spina, di grandi pareti a elevata snellezza, di elementi spingenti di notevole luce, di colonnati, di elementi decorativi non sufficientemente vincolati insieme alla quasi totale mancanza di orizzontamenti intermedi e di efficaci ammorsamenti trasversali rendono la risposta sismica di tali edifici estremamente variabile in relazione alla specifica tecnica costruttiva e al grado di conservazione.

La regola dell'arte sviluppatasi nel tempo grazie all'esperienza e alla tradizione costruttiva dei mastri costruttori, ha individuato alcune soluzioni empiriche in grado di contrastare l'azione sismica; alcuni esempi sono rappresentati dalla buona qualità della muratura con collegamenti trasversali tra i paramenti murari, l'efficace ammorsamento tra pareti ortogonali in corrispondenza dei cantonali, l'inserimento di catene o cerchiature, l'uso di architravi di adeguata rigidezza l'inserimento di contrafforti per contrastare i meccanismi di ribaltamento fuori piano, etc.

L'importanza di un'adeguata valutazione della vulnerabilità delle chiese è connessa sia all'esposizione che al valore storico ed architettonico di tali manufatti. Si pone quindi l'esigenza di analizzare la risposta sismica delle chiese allo scopo di poter individuare efficaci strategie di miglioramento strutturale orientate sia alla protezione che alla conservazione del bene architettonico nel rispetto delle originali tecniche costruttive.

In molti casi attraverso un modello del comportamento strutturale, anche solo qualitativo, si può formulare una diagnosi attendibile sulla risposta del manufatto alle azioni sismiche. Ad esempio, l'individuazione degli ipotetici meccanismi di collasso può consentire di evidenziare gli elementi di debolezza della fabbrica e di guidare gli interventi di consolidamento per correggerne le carenze strutturali nel rispetto dell'organismo resistente originario, attraverso tecniche tradizionali o innovative.

Per una valutazione più accurata e anche quantitativa della prestazione sismica di tali edifici occorrerebbe disporre di modelli tridimensionali globali, capaci simulare la risposta alle azioni sismiche di tutti gli elementi resistenti della fabbrica (pareti, pilastri in muratura, archi e volte, ecc.) e le loro mutue interazioni, modellando contemporaneamente il comportamento nel piano e fuori piano della muratura. Allo stato attuale tali modellazioni vengono generalmente condotte attraverso modellazioni accurate agli elementi finiti non lineari che tuttavia richiedono un enorme sforzo sia in termini di implementazione che di onere computazionale ed inoltre nella maggior parte dei casi richiedono un giudizio esperto nell'interpretazione dei risultati e nella scelta dei parametri da utilizzare per una corretta calibrazione dei modelli costitutivi atti a simulare il comportamento dei materiali reali.

Nel presente lavoro viene stimata la vulnerabilità sismica di una chiesa ad una sola navata sita nel comune di Noto che si ritiene possa essere rappresentativa di numerose chiese simili presenti nel val di Noto e realizzate successivamente al disastroso evento sismico del 1693.

In particolare è stata considerata la chiesa di San Michele realizzata all'inizio del XVIII secolo. Sono state effettuate due diverse modellazioni caratterizzate da un diverso onere computazionale: una modellazione più accurata agli elementi finiti nonlineari ed una modellazione semplificata ai macro-elementi basata su un approccio sviluppato dagli stessi autori in precedenti lavori (Caliò et al. 2005, 2008), quest'ultima avente l'obiettivo di tendere verso un ambiente di simulazione efficiente per la stima della vulnerabilità sismica degli edifici storici in muratura.

La resistenza dell'edificio è stata indagata mediante analisi statiche non-lineari (push-over) condotte lungo diverse direzioni e fino al collasso della struttura.

Tali risultati si ritiene possano costituire una base conoscitiva utile per qualunque intervento di consolidamento, restauro o riparazione per edifici simili nel val di Noto.

## 2 LA RICOSTRUZIONE DI NOTO DOPO L'EVENTO SISMICO DEL 1693

L'11 gennaio 1693 un devastante terremoto colpì la Sicilia orientale distruggendo anche l'antica Noto. Nello stesso anno Giuseppe Lanza duca di Camastra, nominato Vicario generale per la ricostruzione del Val di Noto, stabilisce di ricostruire la città in altro sito, più acclive. Nel piano di costruzione della città intervengono diverse personalità e numerosi architetti (tra cui Rosario Gagliardi, Paolo Labisi, Vincenzo Sinatra, Antonio Mazza), capimastri e scalpellini, che, durante tutto il XVIII secolo, realizzano questo eccezionale ambiente urbanistico caratterizzato da splendide architetture barocche.

L'architettura religiosa rappresenta uno degli aspetti preponderanti della ricostruzione della Noto barocca. Chiese, istituti religiosi, monasteri, conventi e oratori occupano spesso interi isolati e determinano, unitamente alle residenze nobiliari, la parte più tipica e monumentale del tessuto urbano della Noto ricostruita.

Le strutture spaziali delle chiese nel territorio del Val di Noto, proprie dell'età barocca siciliana, sono individuate da impianti longitudinali ad una o tre navate, da impianti centralizzanti e, più raramente, dalla combinazione dei due tipi precedenti.

La forma più comune per una chiesa è un semplice rettangolo, con altari addossati alle pareti laterali e l'abside maggiore separata dalla navata per mezzo di alcuni gradini. I complessi religiosi tipici di Noto generalmente fiancheggiano una parete della chiesa del loro ordine e sono costruiti attorno al cortile rettangolare di un chiostro, la cui costruzione spesso non veniva completata.

Sotto l'aspetto costruttivo, la maggior parte delle chiese, così come i palazzi nobiliari, presentano facciate, cantonali, lesene, aggetti ed ornamenti di decoro, costruiti con pietra di intaglio, una pietra calcarea porosa di media durezza, originaria dell'area di Noto, che per i depositi ferrosi, se esposta all'aria, assume quel colore arancio che le conferisce il suo particolare aspetto dorato. La pietra da intaglio è duratura, resistente a compressione e può, naturalmente, essere scolpita. Buona parte di quella adoperata nella ricostruzione della nuova Noto era stata recuperata dagli edifici in rovina di Noto Antica.

L'alto costo dell'intaglio della pietra ne limitava l'uso sui muri esterni delle chiese e dei palazzi: solo le parti più importanti della facciata ricevevano questo costoso trattamento. Le parti stilisticamente meno importanti degli edifici ecclesiastici ed aristocratici furono costruite con materiali meno costosi. I muri portanti si realizzavano con pietre meno durevoli, arenaria o pietrame sciolto, ancora più modesto, allettati con malta e protetti dagli agenti atmosferici con uno spesso rivestimento di intonaco, risulta pertanto evidente come l'aspetto imponente di molte costruzioni conferisce alle stesse una sensazione di stabilità strutturale che in molti casi è solo apparente. Infatti la costruzione in pietrame sciolto, che caratterizza la maggior parte delle murature esterne ed interne degli edifici di Noto, ha scarse caratteristiche meccaniche e rende particolarmente vulnerabili ai terremoti molti degli edifici della Noto ricostruita.

Il solo esempio di consapevolezza antisismica è dato dalle volte in legno intonacato, di alcune chiese di Noto, concepite per alleggerire il peso della copertura e per evitare la spinta sui muri perimetrali.

Per meglio definire l'analisi del rischio sismico estesa all'intero ambito territoriale è opportuno individuare classi di vulnerabilità relative a gruppi di chiese omogenee, considerando come parametri per tale classificazione la tipologia architettonica (una navata, tre navate, pianta centrale), le dimensioni (chiese piccole, medie, grandi), l'epoca di costruzione legata agli stili architettonici, ai materiali impiegati ed alle tecniche di costruzione. Una riconoscenza nell'area del centro storico ha permesso di individuare, localizzare e censire gli edifici di culto di epoca barocca in base alla tipologia della pianta (*Lavore 2007*); la tipologia ad una navata, come quella della chiesa di San Michele, risulta la più ricorrente sia nelle chiese isolate che nelle fabbriche religiose alle quali è annesso un convento o un monastero.

### 3 DESCRIZIONE DEL CASO DI STUDIO: LA CHIESA DI S. MICHELE ARCANGELO

La chiesa di San Michele Arcangelo è ubicata sul lato occidentale del corso Vittorio Emanuele.

La costruzione risale al 1713, data in cui ne fu affidata la realizzazione ai mastri intagliatori Di Stefano, Di Paola Deodato, Genovese, Murè; mentre la realizzazione della adiacente sagrestia, affidata all'architetto Vincenzo Sinatra (Tobriner 1989, Canale 1976), risale al 1750.

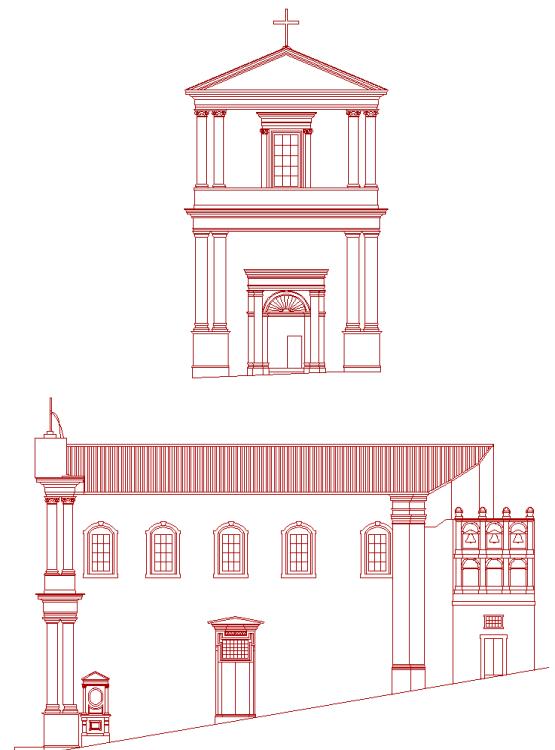


Figura 1. Facciata principale e prospetto longitudinale della chiesa di S. Michele.

L'impianto è a pianta longitudinale ad una sola navata, con accesso diretto dalla via principale e si conclude sul fronte opposto con un corpo absidale poligonale.

Superiormente lo spazio è delimitato da una volta a botte lunettata, non portante, costituita da un incanucciato in gesso supportato da centine in legno ancorate alla muratura perimetrale.

La navata è separata dal presbiterio mediante una scalinata che precede l'arco trionfale a tutto sesto, figura 2.

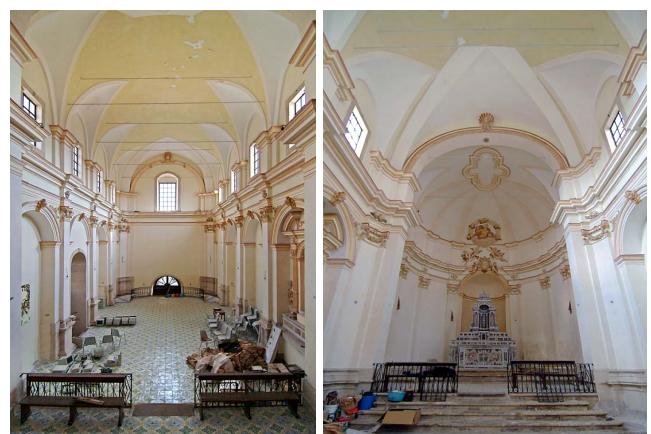


Figura 2. L'interno della chiesa.

La volta della navata è sormontata da una copertura a capanna, resa non spingente per l'adozione delle capriate, mentre nell'abside è presente una copertura spingente, che si sviluppa seguendo un andamento a ventaglio lungo la muratura poligonale perimetrale.

Il prospetto est della chiesa presenta un ordine alto di finestre regolari (figura 1), un ingresso laterale sormontato da un timpano realizzato con pietra di intaglio, e si conclude in corrispondenza dell'abside con una cella campanaria disgiunta dal corpo principale.

Il lato ovest è anche esso caratterizzato da un ordine alto di finestre regolari, e, ad esso è adiacente il vano sagrestia, accessibile solo dal presbiterio.

La facciata, sul fronte sud, si sviluppa su due ordini, delimitata da paraste ed è conclusa superiormente con il timpano (figura 3).



Figura 3. Vista della facciata della chiesa e parte del prospetto est.

### 3.1 I materiali e il corpo di fabbrica

Le murature perimetrali sono state realizzate con elementi di tufo calcareo, a taglio quasi regolare, allettati ed adeguatamente rinzeppati con elementi di minor pezzatura, per uno spessore di cm 80, all'interno le lesene sono costituite da basamento in pietra calcarea da intaglio ed il successivo sviluppo verticale in tufo calcareo si conclude superiormente con un aggetto in pietra da intaglio. Poiché in questa fase non è stato possibile effettuare delle prove dirette sulla muratura della chiesa in esame le caratteristiche dei materiali sono state desunte da fabbriche ad essa assimilabili per tipologia e composizione del tessuto murario. Nella successiva tabella 1 sono riportati il modulo elastico  $E$ , la resistenza a compressione  $\sigma_c$  e il peso specifico  $w$  attribuiti nelle modellazioni alle diverse murature che costituiscono l'edificio. La resistenza a trazione è stata assunta come una frazione della resistenza a compressione.

Tabella 1. Parametri meccanici delle murature.

Elemento	$E$ [MPa]	$\sigma_c$ [MPa]	$w$ [kN/m <sup>3</sup> ]
facciata	1200	1.8	17.0
cantonali	1400	2.0	18.0
muri laterali e abside	900	1.2	15.5
archi laterali e paraste	1000	1.4	16.5
arco trionfale	1000	1.4	18.0

## 4 SIMULAZIONI NUMERICHE

Per la stima della vulnerabilità sismica della chiesa sono stati utilizzati due diversi approcci caratterizzati da diversi livelli di accuratezza ed oneri computazionali. Le modellazioni più accurate sono state condotte agli elementi finiti non lineari utilizzando il noto ambiente di modellazione ADINA<sup>®</sup> (ADINA R&D Inc. 2003). Altre simulazioni sono state condotte utilizzando su macro-elemento spaziale introdotto dagli stessi autori (Caliò et al. 2008) concepito per cogliere la risposta sismica degli edifici in muratura sia nel piano che fuori-piano. Il macro-elemento è stato implementato in un ambiente di modellazione specificatamente pensato per gli edifici in muratura denominato 3DMacro<sup>®</sup> (2009). Per entrambi gli approcci di modellazione sono state eseguite analisi push-over nelle direzioni trasversale e longitudinale.

### 4.1 Le simulazioni in ambiente ADINA

In ADINA sono stati implementati due distinti modelli: uno in cui le capriate lignee sono state modellate e vincolate alle pareti perimetrali ed un altro in cui le capriate sono state considerate semplicemente appoggiate ai muri perimetrali senza costituire un incatenamento per le pareti perimetrali opposte.

Per modellare le murature è stato utilizzato il legame costitutivo *concrete*, disponibile in ambiente ADINA adatto anche alla modellazione del materiale muratura, ed elementi 3DSolid. Le caratteristiche delle murature sono state differenziate per le diverse parti del corpo di fabbrica previsti nella tabella 1 (facciata, pareti perimetrali e corpo absidale, cantonali, arco trionfale, paraste ed archi di irrigidimento perimetrali). Le resistenze a trazione sono state assunte pari ad 1/25 delle resistenze a compressione indicate in tabella 1. Inoltre è stato considerato un comportamento duttile a trazione senza limiti negli spostamenti mentre a compressione è stata considerata una deformazione ultima  $\varepsilon_{cu} = 0.0028$ ; il coefficiente di poisson  $\nu$  è stato assunto pari a 0.2.

Per le capriate lignee di copertura e le travi del corpo absidale, è stato definito un materiale elastico lineare isotropo le cui caratteristiche sono riportate nella tabella 2.

Tabella 2. Parametri meccanici delle capriate lignee

$E$ [MPa]	$\nu$
700	0.2

Nella figura 4 è riportata una vista tridimensionale del modello realizzato in ambiente CAD e successivamente importato in ADINA le colorazioni si riferiscono alle diverse caratteristiche dei materiali utilizzate nelle analisi e riassunte nelle tabella 1 e 2.

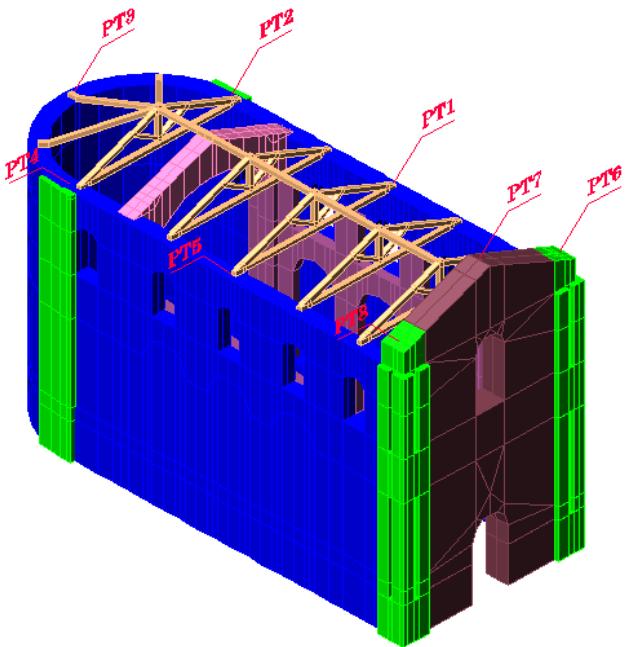


Figura 4. Particolare del modello 3D realizzato in CAD con l'indicazione dei punti di controllo utilizzati nelle analisi push-over.

Nelle figure 5 e 6 sono riportati i risultati delle analisi push-over in direzione trasversale e in direzione longitudinale. Le curve di capacità vengono espresse in termini di coefficiente di taglio alla base in funzione di un unico parametro di spostamento generalizzato, determinato dalla media degli spostamenti di 8 punti di controllo (indicati in figura 4) nella direzione dell'analisi.

Le analisi mostrano, in entrambe le direzioni di carico, un comportamento a collasso scarsamente duttile associato all'instaurarsi di meccanismi di facciata.

La direzione più vulnerabile risulta essere quella trasversale, caratterizzata da un coefficiente di taglio alla base pari a circa 0.25 in presenza di un incatenamento tra le pareti opposte (simulato dal vincolo delle capriate) e pari a circa 0.17 in assenza di una reciproca connessione tra le pareti. In entrambi i modelli il collasso è

comunque caratterizzato dal ribaltamento fuori piano delle pareti longitudinali con conseguente perdita di equilibrio anche dell'arco trionfale (figura 5).

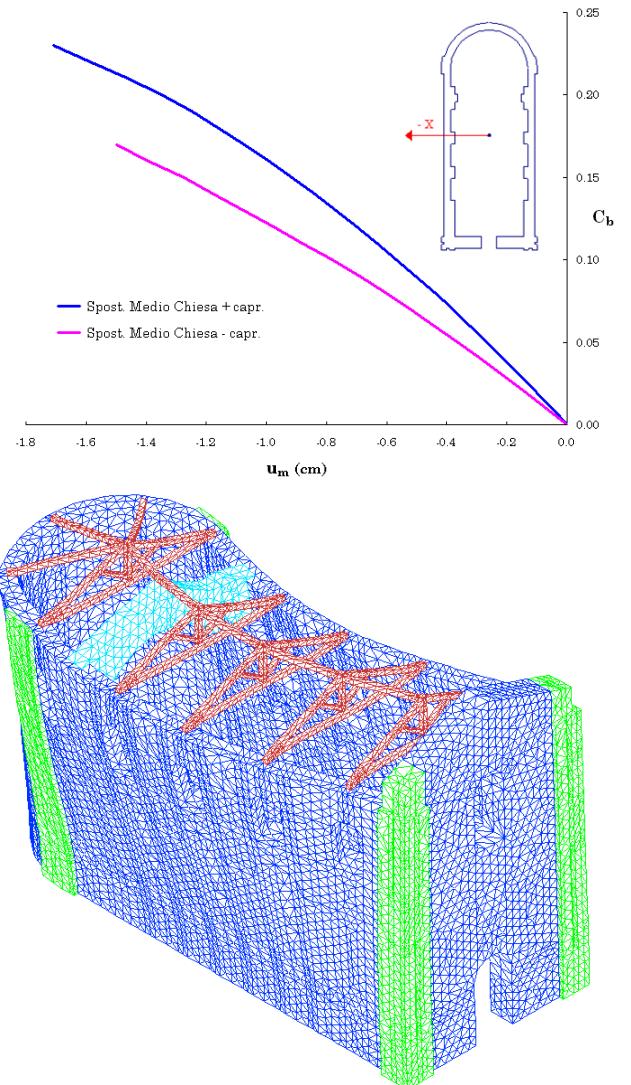


Figura 5. Risultati delle analisi push-over in direzione trasversale in termini di curve di capacità e relativi meccanismi di collasso.

La direzione longitudinale è caratterizzata da un coefficiente di taglio alla base a collasso di circa 0.35. In questo caso il collasso coinvolge prevalentemente le pareti longitudinali nel proprio piano (figure 6 e 7) e la facciata per ribaltamento, soprattutto per l'analisi -Y.

Le analisi condotte sul modello con le capriate considerate vincolate alle pareti hanno mostrato un lieve incremento di resistenza e duttilità, anche in questo caso i due modelli presentano analoghi meccanismi di collasso.

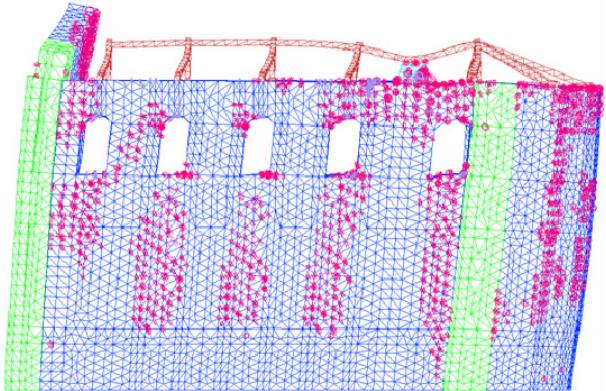
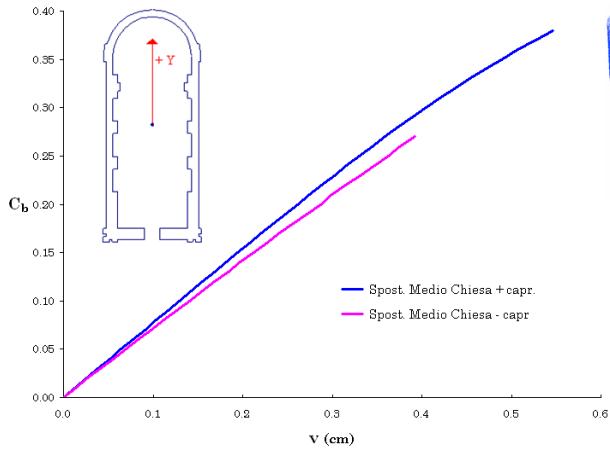


Figura 6. Curve di capacità e relativi meccanismi di collasso per le analisi in direzione -Y.

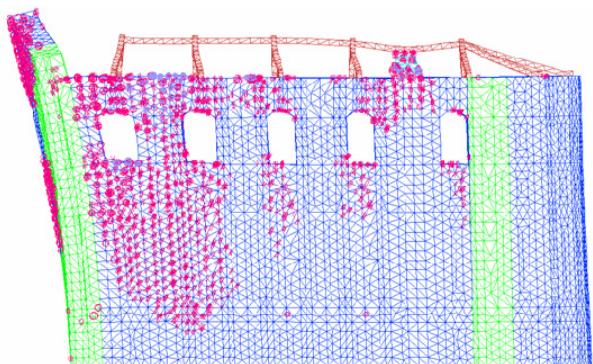
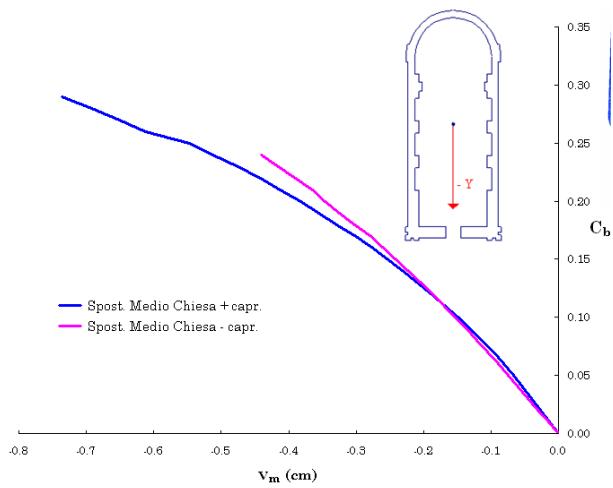


Figura 7. Curve di capacità e relativi meccanismi di collasso per le analisi in direzione +Y.

#### 4.2 Le simulazioni in ambiente 3DMacro

E' stato sviluppato un ulteriore modello tridimensionale utilizzando il software 3DMacro basato su un approccio di modellazione semplificato per macro-elementi.

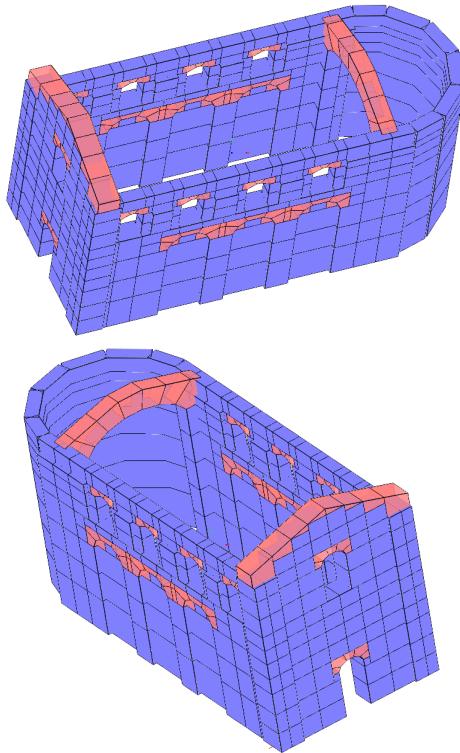


Figura 8 Viste assonometriche del modello in 3DMacro.

La modellazione è basata su un macro-elemento spaziale in grado di cogliere i principali meccanismi di collasso di una porzione di muratura nel piano e fuori dal proprio piano (Pantò 2006, Caliò *et al.* 2008).

L'elemento principale è un modello discreto, meccanicamente equivalente a un intero *pannello* murario (maschio murario o fascia di piano). Esso è costituito da un quadrilatero articolato lungo le cui diagonali sono inserite due molle non lineari che simulano la deformabilità a taglio della muratura. L'interazione tra i pannelli e tra i pannelli e il suolo è garantita da elementi di interfaccia costituiti da un letto discreto di molle trasversali, che simulano la deformabilità flessionale dei pannelli, e da una molla longitudinale che simula lo scorrimento.

Il modello è stato inizialmente definito per modellare unicamente il comportamento della muratura nel proprio piano (figura 9), successivamente è stato modificato per cogliere anche il comportamento fuori piano con il precipuo scopo di disporre di un unico ambiente di modellazione per lo studio della risposta sismica degli edifici in muratura che considerasse contestualmente i meccanismi di primo e di secondo modo.

L'evoluzione 3D prevede l'inserimento di più file di molle trasversali in parallelo in sostituzione dell'unica fila del modello piano.

Naturalmente è stato necessario arricchire la cinematica degli elementi inserendo i gradi di libertà fuori piano (figura 10).

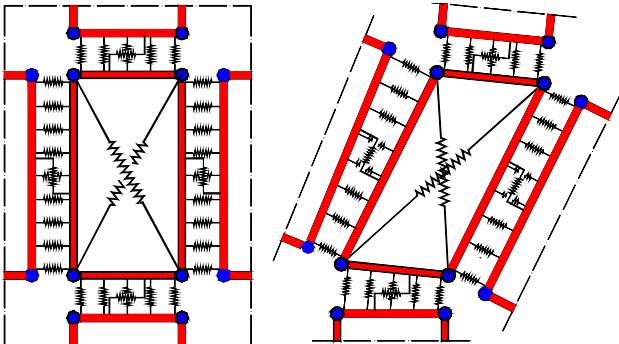


Figura 9. Il macro-elemento di base della modellazione adottata in ambiente 3DMacro.

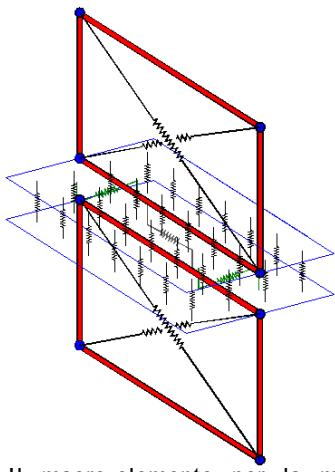


Figura 10. Il macro-elemento per la modellazione del comportamento fuori piano della muratura.

Gli elementi di interfaccia possono essere rappresentati come due piani rigidi (ciascuno dei quali dotato di sei gradi di libertà) collegati da un numero arbitrario di file di molle trasversali, da una molla a scorrimento nel piano e da due ulteriori molle, disposte parallelamente ai piani, che hanno il compito di modellare lo scorrimento e il taglio fuori piano e al contempo la deformabilità torsionale dei pannelli (figura 11).

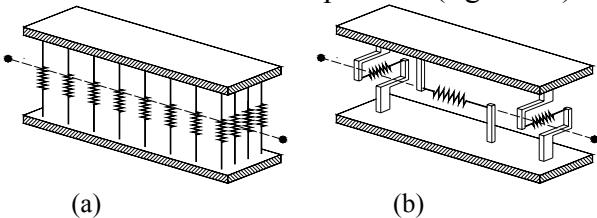


Figura 11. Schema meccanico delle interfacce 3D con indicazione nelle molle non lineari (NLinks); (a) NLinks associati alla risposta flessionale, (b) NLinks associati ai meccanismi di scorrimento nel piano e fuoripiano e alla risposta torsionale.

L'interazione tra le pareti in corrispondenza di intersezioni o cantonali viene garantita mediante l'introduzione di opportuni elementi speciali

d'angolo. Si tratta di elementi di transizione collegati agli elementi delle pareti mediante interfacce tridimensionali (figura 12).

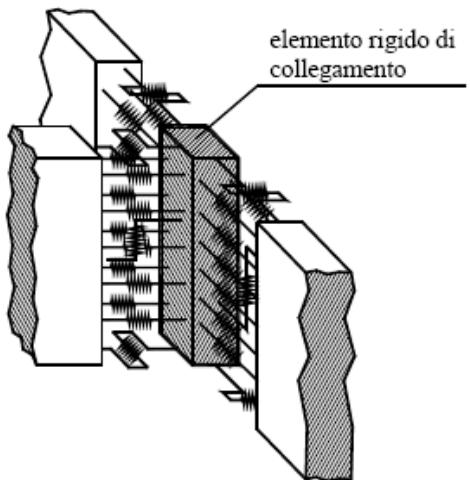


Figura 12. Modellazione di una intersezione mediante l'elemento speciale d'angolo.

La presenza degli elementi speciali d'angolo in corrispondenza dei cantonali consente di modellare i meccanismi di danneggiamento sia per fessurazione (figure 13a) che per scorrimento (figure 13b).

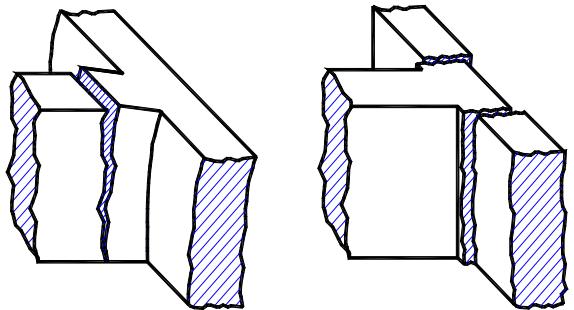


Figura 13. Rottura dell'intersezione; (a) per fessurazione normale, (b) per scorrimento.

Il macro-modello 3D permette di considerare, in modo semplice ma efficace, l'effetto dello sforzo normale sui meccanismi di ribaltamento fuori piano e di modellare inoltre fenomeni di flessione deviata, tipica di pannelli impegnati contemporaneamente nel proprio piano e fuori piano (figura 14).

Il modello discreto utilizzato prevede legami costitutivi specifici per il comportamento flessionale, a taglio e a scorrimento. In particolare il comportamento assiale/flessionale viene governato da un legame costitutivo monodimensionale di tipo elasto-plastico con parametri meccanici deducibili dalla tabella 1 e resistenza a trazione pari 0.1 MPa. Per il comportamento a taglio dei pannelli viene utilizzato un legame elastico non-lineare con superficie di snervamento alla Coulomb e limite

negli spostamenti. Infine, lo scorrimento viene modellato con un legame rigido-plastico anch'esso governato da un dominio alla Coulomb.

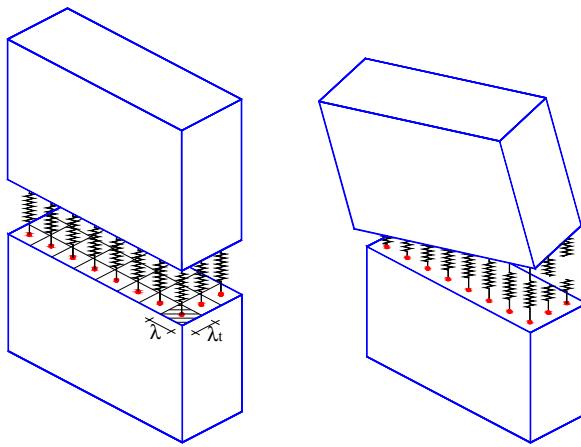


Figura 14. Pannello murario impegnato a flessione nel proprio piano e fuori piano

Il modello discreto utilizzato prevede legami costitutivi specifici per il comportamento flessionale, a taglio e a scorrimento. In particolare il comportamento assiale/flessionale viene governato da un legame costitutivo monodimensionale di tipo elasto-plastico con parametri meccanici deducibili dalla tabella 1 e resistenza a trazione pari 0.1 MPa. Per il comportamento a taglio dei pannelli viene utilizzato un legame elastico non-lineare con superficie di snervamento alla Coulomb e limite negli spostamenti. Infine, lo scorrimento viene modellato con un legame rigido-plastico anch'esso governato da un dominio alla Coulomb.

La tabella 3 riporta i parametri di resistenza a taglio ( $\tau_k$ ,  $\phi$ ,  $\gamma_u$ ) e a scorrimento ( $c$ ,  $\mu$ ) utilizzati nelle analisi condotte con il software 3DMacro nella versione basata sul macro-elemento spaziale.

Tabella 3. Caratteristiche meccaniche a taglio.

$G$ [MPa]	$\tau_k$ [MPa]	$\phi$	$\gamma_u$ (%)	$C$ [MPa]	$\mu$
500	0.15	0.15	5.3	0.1	0.3

I parametri costitutivi delle molle che costituiscono il modello discreto vengono determinati a partire dai parametri meccanici della muratura, pensata come un solido continuo e omogeneo, applicando opportune procedure di equivalenza descritte nella bibliografia di riferimento (Pantò 2006, Caliò *et al.* 2008).

La figura 8 mostra delle viste assonometriche del modello della chiesa in 3DMacro, mentre le figure 15 e 16 riportano i risultati delle analisi nelle due direzioni principali in termini di curve di capacità e meccanismi di collasso.

Si osserva un sostanziale accordo con la modellazione agli elementi finiti in termini di meccanismi di collasso mentre in termini di resistenza ultima si riscontra una maggiore resistenza e duttilità, soprattutto nell'analisi in direzione longitudinale, in occasione del ribaltamento della facciata (figura 16). Osservando il collasso in direzione trasversale il modello mostra un comportamento più rigido delle pareti perimetrali, le quali tendono a ribaltare attorno a cerniere cilindriche orizzontali mantenendo la monoliticità in pianta e coinvolgendo a taglio la parete di facciata (figura 15).

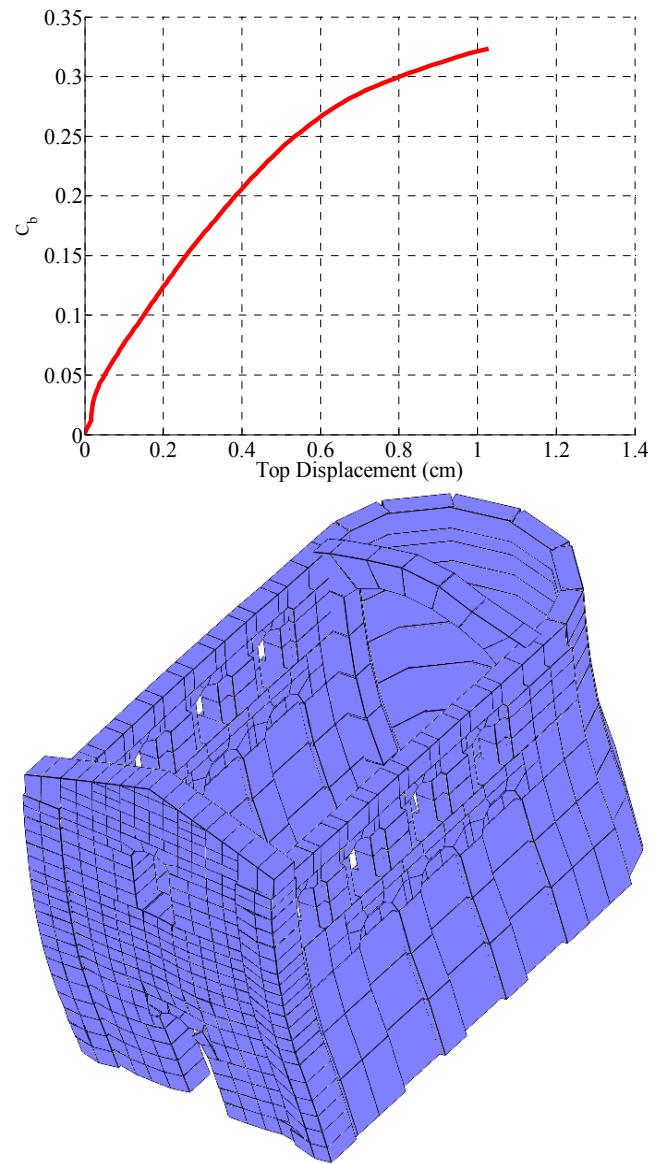


Figura 15. Curva di capacità e meccanismo di collasso in direzione trasversale.

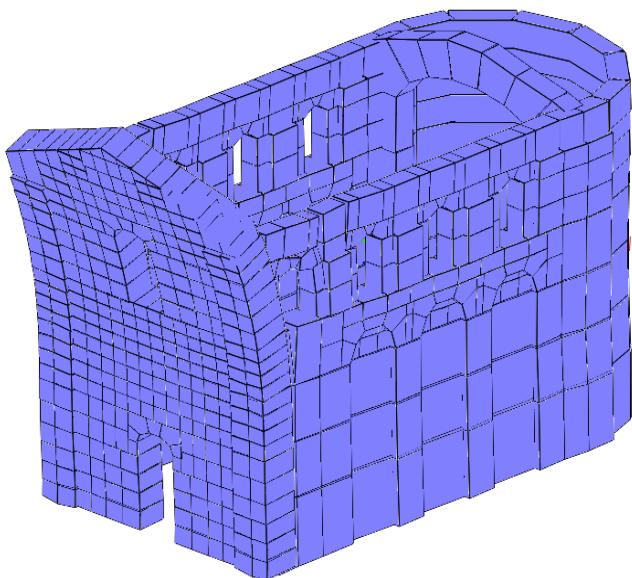
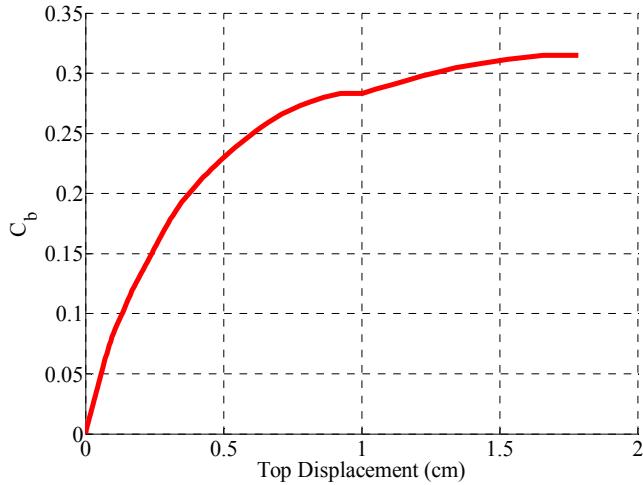


Figura 16. Curva di capacità e meccanismo di collasso in direzione longitudinale.

## 5 VULNERABILITÀ E RINFORZO

Le analisi condotte hanno evidenziato un'elevata vulnerabilità sismica della tipologia strutturale indagata, dovuta sia al basso livello di resistenza raggiunto (coefficiente di taglio alla base medio nelle varie direzioni pari a circa 0.3) ma soprattutto alla scarsa duttilità.

Sono stati osservati due meccanismi di collasso prevalenti: il ribaltamento della facciata in occasione di sisma in direzione longitudinale e il ribaltamento fuori piano delle pareti perimetrali, con conseguente perdita di capacità portante dell'arco trionfale, in occasione di sisma in direzione trasversale. Inoltre le analisi agli elementi finiti hanno evidenziato un modesto contributo alla resistenza sismica associato eventuali capriate di copertura semplicemente appoggiate sulla muratura.

Qualunque intervento di consolidamento, restauro o riparazione per edifici appartenenti a

tal tipologia dovrà quindi mirare a contrastare i suddetti meccanismi di collasso.

Per la modellazione della struttura, rivolta alla stima del coefficiente di sicurezza prima e dopo l'intervento, un approccio semplificato, come quello proposto nel presente lavoro, può rappresentare una valida alternativa agli elementi finiti non lineari, poiché a fronte di un impegno computazionale estremamente ridotto e una maggiore semplicità di implementazione, riesce a cogliere i principali aspetti qualitativi e quantitativi legati al comportamento sismico di tale tipologia strutturale.

## 6 RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano l'Ing. Valentina Lavoro per il lavoro di ricerca e di modellazione svolto nell'ambito della sua tesi di laurea (*Lavoro 2007*).

La ricerca è stata finanziata dal Dipartimento della Protezione Civile nell'ambito della Linea 1 del Progetto RELUIS, dal titolo *"Valutazione e riduzione della vulnerabilità di edifici in muratura"*, coordinata dai Proff. S. Lagomarsino e G. Magenes.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- 3DMacro, 2009. Il programma di calcolo 3DMacro®: <http://www.3dmacro.it>.
- ADINA R&D Inc., 2003. ADINA®, Theory and modelling guide, vol.1, Report ARD 03-7.
- Caliò I., Marletta M., Pantò B., 2005. A simplified model for the evaluation of the seismic behaviour of masonry buildings. *Tenth International Conference on Civil, Structural and Environmental Engineering Computing*, August 30 – September 2, Rome, Italy.
- Caliò I., Marletta M., Pantò B., 2008. A discrete element approach for the evaluation of the seismic response of masonry buildings. *14th World Conference on Earthquake Engineering*, October 12-17, Beijing, China.
- Canale C.G., 1976. Noto - La struttura continua della città tardo barocca, *S.F. Flaccovio, Editore - Palermo*.
- Lavoro V. (2007), Vulnerabilità sismica delle chiese barocche ad una navata nel Val di Noto. Il caso della chiesa di S. Michele Arcangelo in Noto. Tesi di Laurea in Ingegneria Civile, indirizzo Strutture. Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Catania.
- Pantò B. (2006), La modellazione sismica degli edifici in muratura: un approccio innovativo basato su un macro-elemento spaziale. Tesi si Dottorato di Ricerca in Ingegneria delle Strutture. Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università di Catania.
- Tobriner S., 1989. La Genesi di Noto, *Edizioni Dedalo, Bari*.