



## Modellazione agli elementi distinti per lo studio dell'interazione della facciata con la parete laterale di alcune chiese nel territorio aquilano

Francesca Gobbin<sup>a</sup>, Rebecca Fugger<sup>a</sup>, Gianmarco de Felice<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento di Ingegneria, Università degli studi Roma Tre, via Vito Volterra, 62, 00146 Roma, Italy

*Keywords: beni culturali; chiese; danni dovuti al terremoto; elementi distinti, meccanismi locali; dominio di rocking.*

### ABSTRACT

I recenti eventi sismici hanno reso evidente l'elevata vulnerabilità delle chiese italiane, e la ricorrenza di danni dovuti al ribaltamento fuori dal piano della facciata. Ad oggi, tali meccanismi possono essere studiati mediante l'analisi cinematica, secondo quanto disposto dai documenti normativi o, in modo più accurato, mediante la simulazione della risposta dinamica della facciata vista come un corpo rigido sottoposta ad un moto di *rocking* alla Housner. Ambedue questi approcci trascurano l'interazione della facciata con il resto del corpo di fabbrica e l'influenza delle caratteristiche costruttive e dell'ammorsamento dei muri di facciata con i muri longitudinali dell'aula, fornendo quindi generalmente una stima per difetto dell'effettiva capacità sismica. Obiettivo del presente lavoro è quello di illustrare l'effetto della qualità delle murature e del collegamento tra facciata e pareti dell'aula nella risposta sismica, attraverso una modellazione accurata della tessitura muraria mediante il metodo degli elementi distinti. Il modello strutturale viene quindi definito a partire da una ricognizione delle caratteristiche costruttive e la risposta simulata mediante azioni di tipo impulsivo a partire dall'azione sismica attesa mediante misure di intensità tipo *maximum incremental velocity*. La procedura di analisi proposta viene quindi applicata ad alcune chiese nel territorio aquilano a navata semplice danneggiate dal terremoto del 2009. Il confronto tra le simulazioni numeriche e i danni effettivi mostra la capacità della procedura di cogliere gli effettivi meccanismi di collasso verificatisi, mentre il confronto con il modello di corpo rigido evidenzia il ruolo della tessitura nella risposta sismica della struttura.

### 1 INTRODUZIONE

I recenti eventi sismici hanno evidenziato l'elevata vulnerabilità delle chiese italiane. Queste strutture, caratterizzate da una dimensione longitudinale prevalente, difficilmente innescano un comportamento scatolare, ma sono spesso soggette al ribaltamento fuori dal piano della facciata (Lagomarsino and Podestà 2004). Il collegamento murario della facciata con la parete laterale gioca quindi un ruolo non trascurabile nel comportamento complessivo della struttura, così come la sua qualità muraria. L'approccio di calcolo comunemente impiegato per la verifica sismica di tali meccanismi è basato sull'analisi limite con approccio cinematico, secondo quanto disposto dalla normativa vigente (NTC 2018). Per una stima più accurata della risposta dinamica,

può essere impiegato il *modello di rocking* secondo quanto proposto in (Housner 1963). Ambedue questi approcci, trascurano l'influenza della qualità della muratura, non sempre caratterizzata da un comportamento assimilabile a quello di un corpo rigido, e l'ammorsamento della facciata della chiesa ai muri longitudinali dell'aula. In presenza di un buon ammorsamento, il collasso può coinvolgere una porzione di parete laterale, aumentando significativamente il momento stabilizzante e quindi la sua capacità sismica rispetto al meccanismo locale.

Il presente lavoro si propone di indagare le potenzialità di un approccio basato su una micromodellazione della tessitura muraria agli elementi distinti (Lemos 2007), con l'obiettivo di rappresentare la effettiva geometria e disposizione degli elementi murari e il loro effetto nella cinematica del meccanismo locale. Il proposito è

quello di ricorrere ad una modellazione più raffinata capace di simulare in modo più veritiero la cinematica del collasso e fornire una stima dell'azione sismica necessaria per attivarlo. L'assunto è quello che le deformazioni e le non linearità si concentrino nei contatti tra gli elementi lapidei che possono essere considerati indeformabili e infinitamente resistenti. Ciò permette di valutare l'influenza della qualità muraria sul comportamento della struttura e ricostruire il quadro fessurativo e il meccanismo di collasso atteso a seguito dell'azione sismica. L'efficacia del metodo agli elementi distinti nella modellazione del comportamento sismico delle strutture in muratura è già stata ampiamente discussa in letteratura (Azevedo et al. 2000; de Felice and Mauro 2010; de Felice 2011; Lemos et al. 2011).

Nel presente lavoro viene affrontato il caso specifico di chiese a navata unica sottoposte ad un meccanismo di distacco e ribaltamento della facciata. Si tratta di costruzioni storiche ubicate nell'area aquilana, molte delle quali hanno subito gravi dissesti con il sisma del 2009. Il confronto tra le previsioni del modello e la sperimentazione operata dal sisma, consente quindi di giudicare

sull'attendibilità dell'approccio di modellazione proposto. Inoltre, dall'analisi del dominio di stabilità rispetto ad azioni impulsive del modello di corpo rigido sottoposto ad un moto di *rocking* unilaterale, per il quale esiste una formulazione analitica (Housner 1963; Mauro et al. 2015) e il corrispondente dominio ricavato dalle analisi ad elementi distinti è possibile valutare in che misura la messa in conto della tessitura muraria e degli ammorsamenti con i muri laterali possano governare il comportamento fino al collasso della struttura.

## 2 CASI STUDIO

I casi studio di seguito illustrati riguardano tre chiese a navata unica nel territorio aquilano e precisamente la chiesa di Sant'Andrea in Stiffe, la chiesa di Santa Maria ad Cryptas, la chiesa di Santa Maria del Presepe, le quali a seguito del sisma del 2009 hanno subito il distacco della facciata e l'innescò del meccanismo di ribaltamento, senza fortunatamente raggiungere la condizione finale di collasso.



Figura 1. Localizzazione dei casi studio e dell'epicentro del terremoto de L'Aquila 2009.

## 2.1 Sant'Andrea in Stiffe

La Chiesa di Sant'Andrea in Stiffe è ubicata nel comune di San Demetrio ne' Vestini. La struttura originaria risale al X secolo d.C., ma l'assetto attuale deriva dai lavori di rifacimento del XIV secolo, in cui venne sostituito l'abside semicircolare con uno a terminazione rettilinea.

L'edificio, ha pianta pressoché rettangolare, con larghezza del fronte di circa 8 m e lunghezza di circa 25 m. La facciata presenta un coronamento orizzontale (Figura 2), la tessitura muraria è in pietra sbozzata con ricorsi regolari.

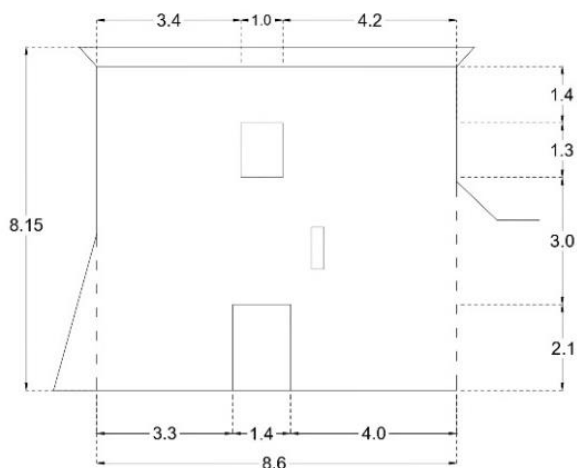


Figura 2. Schema geometrico della Chiesa di Sant'Andrea in Stiffe

## 2.2 Chiesa di Santa Maria ad Cryptas

La struttura, situata nei pressi di Fossa (AQ), è stata probabilmente eretta tra il XII e il XIII secolo d.C. e conserva al suo interno cicli pittorici di grande pregio e bellezza. All'interno si legge la preesistenza di alcune parti voltate non più presenti, mentre attualmente è a vista il tetto con capriate lignee, parzialmente rifatto nel Novecento. Le dimensioni della facciata sono rappresentate in Figura 3. La muratura presenta il caratteristico apparecchio aquilano in blocchetti di pietrame sbozzato.

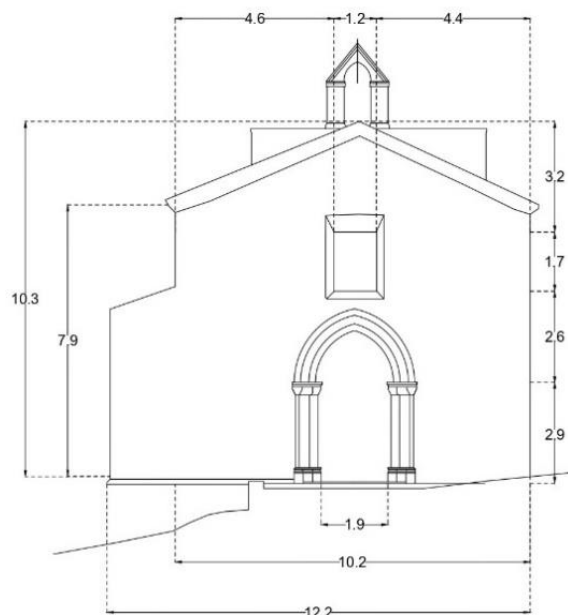


Figura 3. Schema geometrico della Chiesa di Santa Maria ad Cryptas

## 2.3 Chiesa di Santa Maria del Presepe

La Chiesa di Santa Maria del Presepe è ubicata a Paganica (AQ). La sua costruzione è più recente e risale intorno al 1605 (Antonini 2012). Analogamente a Sant'Andrea in Stiffe, la facciata ha forma rettangolare, con una profondità di 15.5 m e un'altezza di 17.6 m (Figura 4), rivestita in conci squadrati, mentre il corpo murario, come si legge sulla parete laterale, è costituito da muratura di pietrame irregolare.

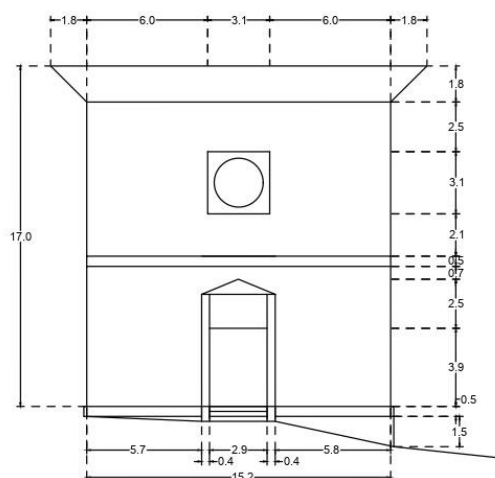


Figura 4. Schema geometrico della Chiesa di Santa Maria del Presepe in Paganica

### 3 IL MODELLO DI ROCKING

Si consideri la facciata della chiesa alla stregua di un corpo rigido privo di vincoli alle pareti longitudinali e sottoposto al peso proprio e all'azione sismica. Il suo comportamento dinamico può essere analizzato attraverso il modello di Housner (Housner 1963), considerando il solo moto unilaterale verso l'esterno, essendo il moto verso l'interno contrastato dalla presenza dei muri laterali e della copertura. Siano  $b$ ,  $h$  ed  $R$  rispettivamente la semi-larghezza, la semi-altezza e la semi-diagonale della sezione della parete,  $W$  il peso proprio,  $\alpha$  l'angolo di snellezza e  $\theta$  la generica rotazione nel moto di ribaltamento (Figura 5)

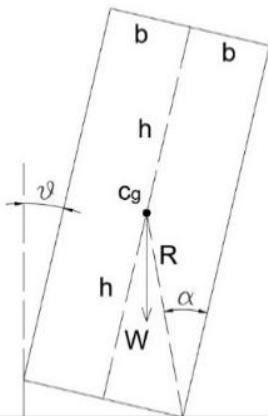


Figura 5. Modello di corpo rigido nel moto di rocking

Si consideri la struttura sottoposta ad un impulso semi-sinusoidale rappresentativo dell'evento sismico nella forma  $-a \sin(\omega t + \psi)$ .

Tale schematizzazione del moto sismico, pur molto rozza, è stata impiegata in passato, specie nella descrizione di eventi near-fault (Makris and Konstantinidis 2003) ed ha il pregio di condurre ad una espressione analitica del dominio di stabilità del corpo rigido sottoposto ad un moto di rocking. Inoltre, nel caso della risposta sismica dei meccanismi locali nelle strutture murarie, è stato osservato da più autori come la condizione di collasso per ribaltamento sia abbastanza correlata con misure dell'input sismico tipo "maximum incremental velocity", in quanto la risposta è fortemente correlata all'azione impulsiva del sisma, da cui l'interesse di studiarne la risposta per

una forzante sinusoidale. L'equazione del moto si può scrivere come:

$$I_o \ddot{\theta} = -WR \sin(\alpha - \theta) + WR \frac{a}{g} \sin(\omega t + \psi) \quad (1)$$

Per angoli piccoli e ponendo  $p^2 = \frac{WR}{I_o}$ , l'equazione del moto diventa:

$$\ddot{\theta} - p^2 \theta = \alpha p^2 \left[ \frac{\sin(\omega t + \psi)}{\sin \psi} - 1 \right] \quad (2)$$

Assegnando le condizioni iniziali e imponendo la configurazione limite di equilibrio  $\theta = \alpha$ , si ottiene:

$$\frac{a}{g\alpha} = \sqrt{1 + \frac{I_o}{WR} \left( \frac{2\pi}{T_g} \right)^2} \quad (3)$$

che rappresenta la condizione limite oltre la quale si verifica il collasso per ribaltamento.

### 4 MODELLAZIONE DELL'INPUT SISMICO

#### 4.1 Il metodo agli elementi distinti

Il metodo agli elementi distinti fu inizialmente concepito (Cundall 1971) per studiare il comportamento di ammassi rocciosi fratturati. Nelle strutture murarie storiche, in cui i blocchi lapidei mantengono la loro consistenza mentre i giunti con il tempo hanno perduto le capacità coesive originarie, è appropriato considerare i blocchi come infinitamente rigidi e quindi assumere che tutta la deformazione sia concentrata nei contatti. Questi ultimi, possono essere modellati come semplici interfacce tra i conci lapidei, munite di attrito, ma prive di coesione. Il modello così concepito, pur semplice nella descrizione costitutiva, è in grado di rappresentare efficacemente il comportamento meccanico della struttura sotto effetto del sisma e di simulare i processi non-lineari di distacco completo dei blocchi. Il metodo degli elementi distinti è in grado di simulare in cinematica finita la perdita di contatto tra i blocchi lapidei ed anche la formazione di nuovi contatti attraverso il loro riconoscimento automatico. Il meccanismo di collasso quindi è correttamente simulato

dall'attivazione del moto fino alla condizione limite di capacità in spostamento.

#### 4.2 Modellazione della geometria

La struttura è stata modellata attraverso un modello bidimensionale che rappresenta la sezione della parete di facciata e il paramento del muro laterale, ivi incluso l'ammorsamento tra le due pareti. Allo scopo di simulare l'effettiva tessitura muraria, la discretizzazione in elementi distinti è stata eseguita sulla base del rilievo dei paramenti lapidei esistenti. Allo scopo di simulare il prosieguo della parete laterale della chiesa non direttamente modellata, è stato posto un blocco deformabile elastico provvisto di un giunto verticale elastico al contatto con la porzione di parete direttamente modellata. Per verificare l'attendibilità di tale condizione al contorno, è stata svolta un'analisi di sensitività monitorando la storia di spostamento orizzontale dei blocchi adiacenti a tale giunto. Come si evince in Figura 6, non si registrano significativi spostamenti permanenti, a riprova della stabilità della modellazione impiegata. Per quanto riguarda la modellazione delle murature, ai blocchi è stato attribuito il peso specifico, come suggerito dai documenti normativi (Tabella C8.5.I NTC18) per le diverse tipologie di muratura rilevate nei tre casi studio, tenendo conto della profondità effettiva degli elementi modellati. Tra la facciata e la parete laterale è stato posto un giunto verticale elastico al fine di delimitare le differenti densità e le corrispondenti rigidezze dei contatti tra i blocchi. Le rigidezze delle interfacce di contatto sono state determinate in modo che la struttura muraria mantenga nel complesso una rigidezza media appropriata così come stabilita dai documenti normativi vigenti. L'angolo d'attrito, infine, è stato posto cautelativamente pari a  $30^\circ$ . Nelle tabelle 1, 2 e 3, sono riportate le proprietà meccaniche assegnate. In Figura 7 si mostra uno schema illustrativo di una delle analisi con la geometria esaminata ed i relativi materiali.

Tabella 1. Proprietà dei materiali assegnati ad UDEC per la Chiesa di Sant'Andrea in Stiffe.

Sant'Andrea in Stiffe		
	Facciata	Parete laterale
Profondità [m]	4.30	0.70
$\gamma$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	9030	1470
Jkn [Pa/m]	2.94e10	4.06e9
Jks [Pa/m]	8.31e9	1.35e9
Jfriction	$30^\circ$	$30^\circ$

Tabella 2. Proprietà dei materiali assegnati ad UDEC per la Chiesa di Santa Maria ad Cryptas.

Santa Maria ad Cryptas		
	Facciata	Parete laterale
Profondità [m]	5.10	1.00
$\gamma$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	10710	2100
Jkn [Pa/m]	3.55e10	1.16e10
Jks [Pa/m]	1.18e10	3.87e9
Jfriction	$30^\circ$	$30^\circ$

Tabella 3. Proprietà dei materiali assegnati ad UDEC per la Chiesa di Santa Maria del Presepe.

Santa Maria del Presepe		
	Facciata	Parete laterale
Profondità [m]	5.00	0.50
$\gamma$ [Kg/m <sup>3</sup> ]	10500	950
Jkn [Pa/m]	2.90e10	4.35e9
Jks [Pa/m]	9.67e9	1.45e9
Jfriction	$30^\circ$	$30^\circ$

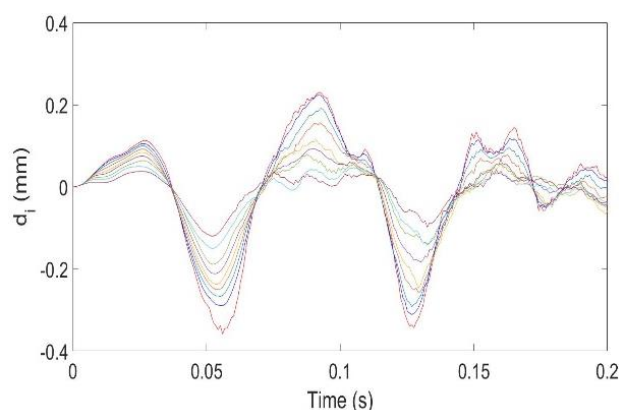


Figura 6. Storie di spostamento orizzontale dei blocchi adiacenti al blocco elastico.

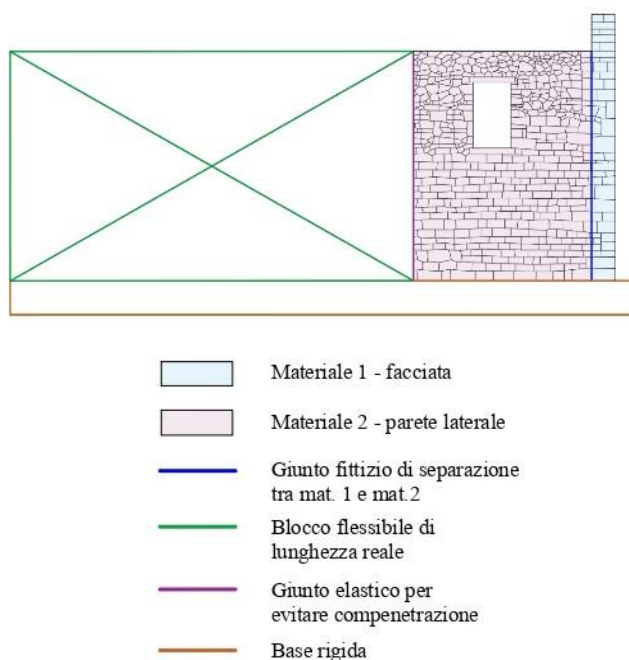


Figura 7. Schema rappresentativo dell'assegnazione delle proprietà dei materiali all'interno del software.

#### 4.3 Modellazione dell'input sismico all'interno del codice di calcolo

Lo studio della risposta sismica dei modelli delle chiese, così come sopra descritti, è stato condotto attraverso analisi dinamiche con accelerogrammi, analisi della risposta ad impulsi semi-sinusoidali ed analisi di tipo quasi-statico ad accelerazione crescente. In questa sede vengono illustrate le analisi impulsive, le meno onerose dal punto di vista computazionale, anche nella prospettiva di un confronto diretto con l'input sismico attraverso una misura della *Maximum Incremental Velocity*.

All'interno del software di calcolo (Udec 6.0) è stata quindi programmata in ambiente Fish una procedura automatica per la ricostruzione del dominio di rocking unilaterale. L'impulso semi-sinusoidale è applicato al centroide di ogni blocco nella sola direzione orizzontale ed in assenza di smorzamento. Al termine dell'input, l'algoritmo è in grado di riconoscere se la struttura ha superato la configurazione limite di equilibrio e quindi raggiunto la condizione di collasso, o viceversa. In questo secondo caso, il meccanismo può essersi attivato, ma l'energia trasmessa insufficiente per spingere la parete al completo distacco e quindi al

collasso. Ai fini della ricostruzione dell'intero dominio di *rocking*, in primo luogo, viene calcolato il periodo del modello di corpo rigido per il quale la tangente alla curva del dominio è pari a -1, che d'ora in avanti è definito  $t_{tang}$ . Per impulsi con periodo maggiore di  $t_{tang}$ , viene assegnata la durata temporale e progressivamente aumentata l'accelerazione fino al raggiungimento della condizione di collasso. La procedura è ripetuta per durate temporali via via crescenti, fino a determinare l'asintoto orizzontale del dominio, pari all'accelerazione di collasso della facciata della chiesa per azioni orizzontali di trascinarsi. Per impulsi con periodi più piccoli di  $t_{tang}$ , partendo dal punto di ordinata maggiore che si vuole rappresentare, si assegna la relativa accelerazione massima e si aumenta il periodo, fino al raggiungimento della condizione di collasso. L'insieme delle coppie di ampiezza-periodo subito precedenti alla condizione di collasso, fornisce una stima del dominio di stabilità della facciata della chiesa per azioni impulsive, che può essere direttamente posto a confronto con l'espressione analitica (3) del dominio di stabilità di corpo rigido.

## 5 RISULTATI

I risultati della procedura sopra descritta alle tre chiese oggetto di studio sono riportati nelle Figure 8-9-10 in termini di meccanismo di collasso ricavato dall'analisi e corrispondente dominio di stabilità. Le figure mostrano come il dominio di rocking derivante dal modello numerico qui proposto è sostanzialmente assimilabile a quello di corpo rigido per tutte e tre le chiese studiate. Per impulsi di lunga durata, il modello analitico talvolta coincide con quello numerico (nel caso delle chiese di Santa Maria ad Cryptas e Santa Maria del Presepe) o sottostima lievemente (nel caso della chiesa di Sant'Andrea in Stiffe) la effettiva capacità sismica della struttura. In quest'ultimo caso, infatti, la qualità dell'ammorsamento con la parete laterale è tale da comportare il coinvolgimento di una porzione di quest'ultima nel cinematismo di collasso, con un incremento del momento stabilizzante rispetto al moto di ribaltamento ed un corrispondente incremento di capacità per periodi lunghi pari circa

al 20%. I risultati delle analisi evidenziano una frattura principale tra la facciata e le pareti laterali, senza la nascita di ulteriori significative fratture o scorrimenti tra i blocchi, a dimostrazione del fatto che la cinematica di collasso è essenzialmente caratterizzata da un meccanismo di corpo rigido. Per impulsi di breve periodo, si osserva che tutte le soluzioni numeriche del modello ad elementi distinti giacciono al di sotto della curva analitica di corpo rigido. Tale risultato sembra in contrasto con la presenza di connessioni tra facciata e parete laterale, che dovrebbe comportare un aumento di capacità e non una diminuzione. La ragione di tale sottostima deve essere ricercata nella difficoltà di convergenza del modello per input singolari. Lo stesso quadro fessurativo mostra l'apertura di diverse fratture tra i blocchi diffuse su tutta la struttura già all'inizio dell'analisi e l'apertura di una fessura nel giunto adiacente al blocco elastico, fortemente dipendente dalla schematizzazione operata per rappresentare il prosieguo della parete laterale lontano dalla zona di processo.

Per tutti e tre i casi in esame, il meccanismo di collasso individuato dalle analisi agli elementi distinti appare appropriato e corrispondente agli effetti del sisma del 6 aprile 2009, come si può leggere dal confronto tra le simulazioni numeriche e la sperimentazione operata dal sisma. Per la chiesa di Santa Maria ad Cryptas e Santa Maria del Presepe, in particolar modo, il quadro fessurativo determinato dall'analisi coincide praticamente con quello rilevato sul campo. Nel caso della chiesa di Sant'Andrea in Stiffe, invece, il rilievo sul campo mostra uno stato di danneggiamento più lieve, con una minore porzione della parete laterale effettivamente coinvolta nel cinematismo, rispetto a quanto ottenuto dalle simulazioni numeriche.

Allo scopo di stabilire una correlazione tra le analisi per impulsi eseguite e le registrazioni dell'evento del 6 Aprile 2009, è stato processato il segnale accelerometrico della Stazione AQK, situata nella città de L'Aquila (tipo di terreno B\*,

EC8) con PGA pari a 3.34 e 3.33  $m/s^2$ , rispettivamente nelle componenti orizzontali est-ovest e nord-sud. Per confrontare l'azione impulsiva simulata con l'accelerogramma reale registrato, si può operare in modo piuttosto rozzo, assumendo come semi-periodo dell'impulso equivalente l'intervallo temporale tra i due attraversamenti di segno dell'accelerogramma registrato in corrispondenza della massima velocità incrementale. Dal confronto si evince come l'impulso equivalente così determinato dall'accelerogramma registrato, si ponga sempre al di sotto del dominio di stabilità numerico ottenuto per le tre chiese in esame, pur con un'accelerazione al di sopra della soglia di collasso per azioni di trascinamento. Tale risultato appare appropriato, considerando che, per tutti e tre i casi di studio, il moto di ribaltamento della facciata si è attivato con una evidente lesione di distacco dalle pareti laterali. D'altra parte, in nessuna delle tre chiese, il moto di ribaltamento della facciata, pur attivatosi, ha portato al collasso per ribaltamento.

Il modello proposto consente anche di fornire una stima della capacità di spostamento del meccanismo locale di ribaltamento della facciata. Il confronto tra la previsione di capacità in spostamento del modello di corpo rigido, pari al semi-spessore della facciata, richiede ulteriori analisi estese ad un campione di chiese più ampio. Infatti, da un lato, il modello di corpo rigido sovrastima la reale riserva di capacità per via dell'assunzione di comportamento monolitico durante tutta la cinematica fino alla configurazione di equilibrio instabile; mentre, in realtà, la parete può disgregarsi per effetto degli scorrimenti tra i blocchi. D'altra parte, trascurando l'ammorsamento con le pareti laterali ed il contributo stabilizzante di queste ultime, il modello di corpo rigido fornisce, al contempo, una stima per difetto della capacità di spostamento.

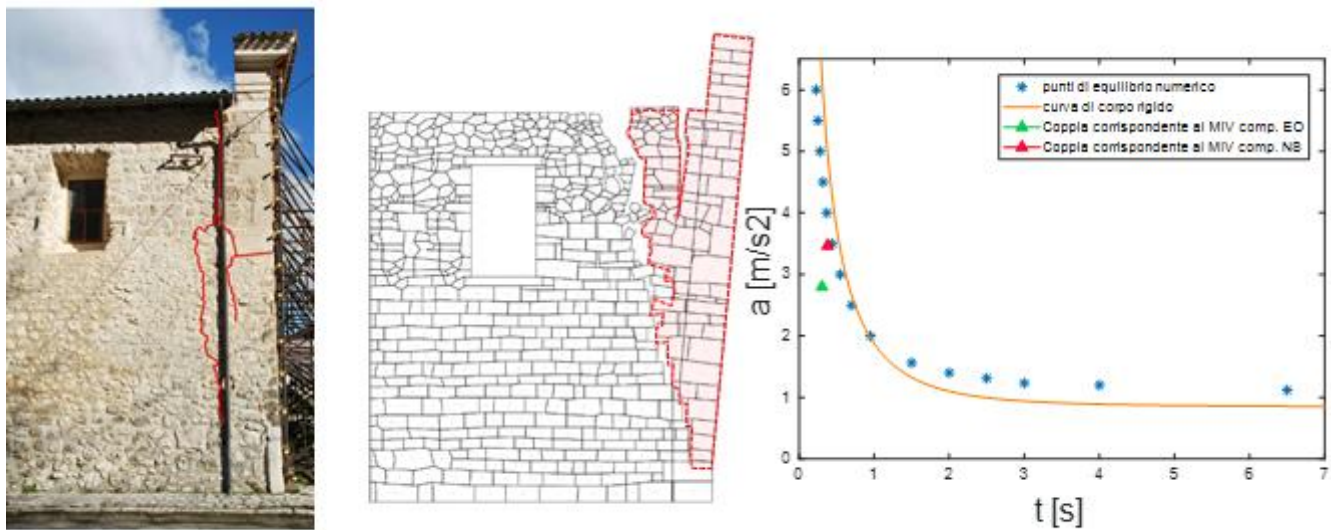


Figura 8. Confronto stato di danno reale, stato di danno numerico, dominio di rocking analitico e numerico e calcolo del MIV per la chiesa di Sant' Andrea in Stiffe

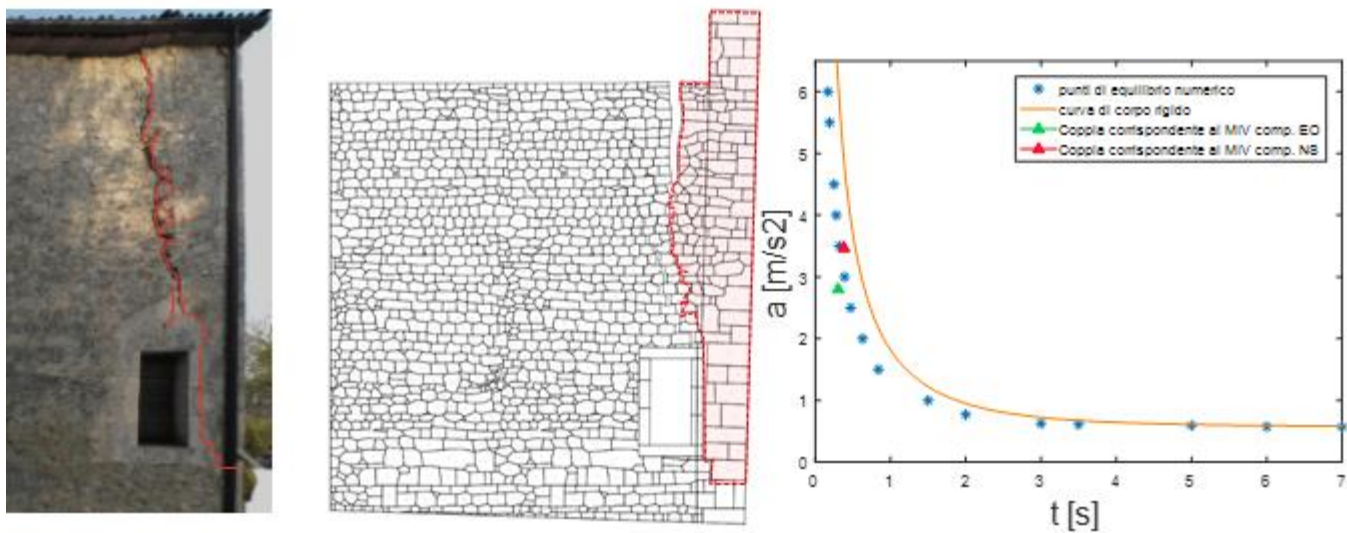


Figura 9. Confronto stato di danno reale, stato di danno numerico, dominio di rocking analitico e numerico e calcolo del MIV per la chiesa di Santa Maria ad Cryptas.



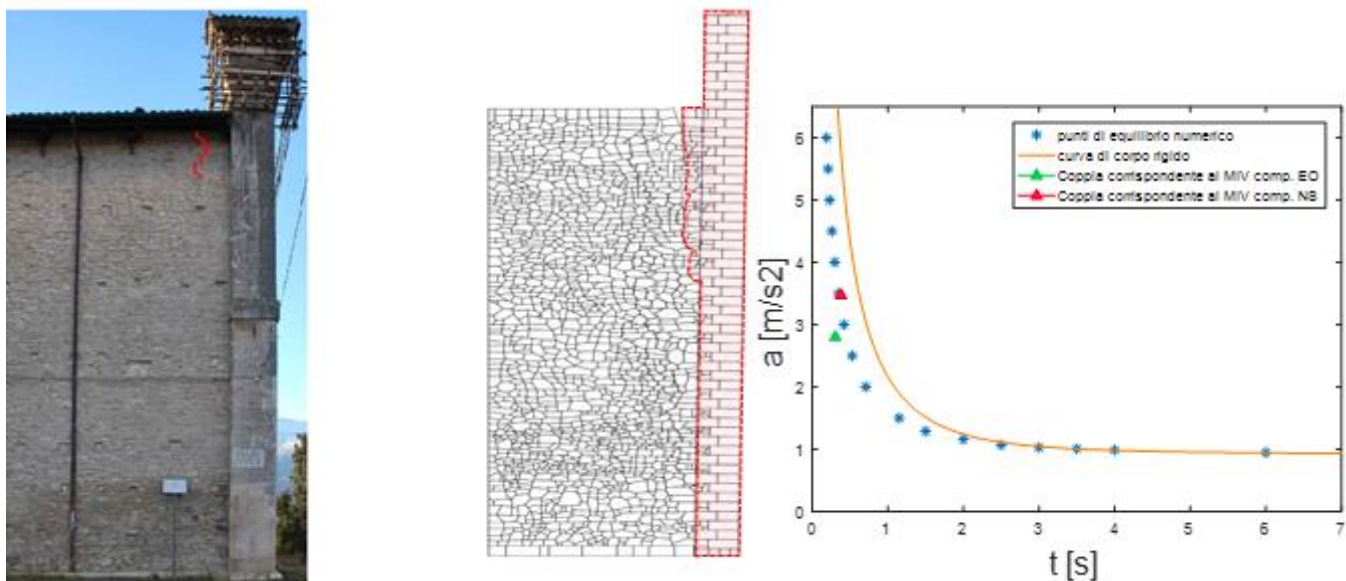


Figura 10. Confronto stato di danno reale, stato di danno numerico, dominio di rocking analitico e numerico e calcolo del MIV per la chiesa di Santa Maria del Presepe in Paganica.

## 6 CONCLUSIONI

Il presente lavoro affronta le problematiche di verifica dei meccanismi di collasso delle facciate delle chiese attraverso una modellazione agli elementi discreti e presenta l'applicazione a tre chiese dell'area aquilana che hanno riportato danni con il sisma del 2009. L'obiettivo è duplice: i) fornire uno strumento di modellazione accurata capace di prefigurare il meccanismo di collasso atteso, da impiegare nelle verifiche sismiche del nostro patrimonio architettonico; ii) formulare un giudizio sull'attendibilità delle procedure di verifica correnti, basate sull'analisi cinematica di corpo rigido. Mediante la ricostruzione della discretizzazione in elementi distinti a partire da riproduzioni fotografiche dei paramenti murari, il modello proposto tiene conto dell'interazione della facciata con la parete laterale e della qualità muraria del cantonale. Attraverso una procedura automatica di analisi viene costruito il dominio di rocking monolaterale per azioni impulsive e posto a confronto con il corrispondente dominio analitico proposto da Housner (Housner 1963). Le analisi rivelano come il modello di corpo rigido, nei limiti di generalità del campione preso in

esame, fornisca un'ottima stima della effettiva capacità della facciata delle chiese rispetto al collasso per ribaltamento. D'altra parte, per tutti e tre i casi in esame, la facciata raggiunge la condizione di collasso attraverso un cinematismo non troppo dissimile da quello di corpo rigido, con un modesto scorrimento dei blocchi lapidei. L'interazione con la parete laterale dovuta all'ammorsamento del cantonale comporta talvolta un miglioramento della capacità sismica. La simulazione del cinematismo di collasso e il corrispondente quadro fessurativo fornito dal modello ricalcano in buona misura il danno effettivo verificatosi con il sisma, a conferma della capacità di previsione del modello dal punto di vista qualitativo. Dal punto di vista quantitativo, pur nella rappresentazione rozza dell'azione sismica attraverso un'azione impulsiva semi-sinusoidale, dall'analisi del valore della massima velocità incrementale delle registrazioni sismiche dell'evento aquilano, si ricava una sostanziale corrispondenza con le stime numeriche del modello. Sussistono tuttavia alcune difficoltà numeriche nella modellazione di impulsi di breve durata, che richiedono una maggiore cura nella simulazione delle condizioni al contorno. La stima

della capacità di spostamento del meccanismo di collasso fornita dal modello rispetto a quella di corpo rigido rivela scostamenti maggiori, dovuti sia alla non perfetta monoliticità della parete nel moto di ribaltamento, sia al contributo stabilizzante della porzione di parete laterale coinvolta nel cinematismo.

## 7 RINGRAZIAMENTI

La presente ricerca è stata condotta con il supporto finanziario dei seguenti progetti di ricerca: ReLUIS-DPC 2019-2021, Regione Lazio SISMI, e Regione Lazio SICURA.

## BIBLIOGRAFIA

- Antonini, O. 2012 *Chiese extra moenia del comune dell'Aquila prima e dopo il sisma*. Castelli: Verdone Editore.
- Azevedo, J.J., G Sincaian, Lemos, J.V.. 2000. "Seismic Behavior of Blocky Masonry Structures." *Earthquake Spectra* **16** (2): 337–65. doi:10.1193/1.1586116.
- Cundall, P.A. 1971. "A Computer Model for Simulating Progressive Large-Scale Movements in Blocky Rock Systems." In *Proceedings of the Symposium of the International Society of Rock Mechanics*, Nancy 2. doi:10.1016/j.optcom.2003.10.046.
- de Felice, G, Mauro, A.. 2010. "On Overturning of the Façade in Churches with Single Nave: Some Case Studies from L'Aquila, Italy, 2009 Earthquake." *Advanced Materials Research* **133–134**: 807–12. doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.133-134.807.
- de Felice, G., "Out-of-plane seismic capacity of masonry depending on wall section morphology." *International Journal of Architectural Heritage* **5** (4-5): 466-482.
- Housner, G.W. 1963. "The Behavior of Inverted Pendulum Structures during Earthquakes." *Bulletin of the Seismological Society of America* **53** (2): 403–17.
- Lagomarsino, S., Podestà, S. 2004. "Seismic Vulnerability of Ancient Churches: II. Statistical Analysis of Surveyed Data and Methods for Risk Analysis." *Earthquake Spectra* **20** (2): 395–412. doi:10.1193/1.1737736.
- Lemos, J.V. 2007. "Discrete Element Modeling of Masonry Structures." *International Journal of Architectural Heritage* **1** (2): 190–213. doi:10.1080/15583050601176868.
- Lemos, J.V., Costa, A. C., Bretas, E. M.. 2011. "Assessment of the Seismic Capacity of Stone Masonry Walls with Block Models." *Computational Methods in Earthquake Engineering* **21**: 221–35. doi:10.1007/978-94-007-0053-6\_10.
- Makris, N., Konstantinidis, D.. 2003. "The Rocking Spectrum and the Limitations of Practical Design Methodologies." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **32** (2): 265–89. doi:10.1002/eqe.223.
- Mauro, A., de Felice, G., DeJong, M.. 2015. "The Relative Dynamic Resilience of Masonry Collapse Mechanisms." *Engineering Structures* **85**. Elsevier Ltd: 182–94. doi:10.1016/j.engstruct.2014.11.021.