



Uso dei codici di calcolo per l'analisi sismica nonlineare di edifici in muratura: confronto dei risultati ottenuti con diversi software su un caso studio reale

Serena Cattari ^a, Daria Ottonelli ^a, Stefania Degli Abbati ^a, Guido Magenes ^b, Carlo Filippo Manzini ^c, Paolo Morandi ^b, Enrico Spacone ^d, Guido Camata ^d, Corrado Marano ^d, Ivo Calì ^e, Bartolomeo Pantò ^e, Francesco Cannizzaro ^e, Giuseppe Occhipinti ^f, Bruno Calderoni ^g, Emilia Angela Cordasco ^g, Stefano de Miranda ^h, Giovanni Castellazzi ^h, Antonio Maria D'Altri ^h, Anna Saetta ⁱ, Diego Talledo ⁱ, Luisa Berto ⁱ

^a Dipartimento di Ingegneria Civile Chimica e Ambientale, Via Montallegro 1, 16145 Genova, Italia

^b Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Via Ferrata 3, 27100 Pavia, Italia

^c Fondazione EUCENTRE, Via Ferrata 1, 27100 Pavia, Italia

^d Dipartimento di Ingegneria e Geologia, Università G. D'Annunzio di Chieti e Pescara, Viale Pindaro 64, 65127 Pescara, Italia

^e Dipartimento Ingegneria Civile e Architettura, Via Santa Sofia 64, 95123 Catania, Italia

^f Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria - CNR, Via Salaria Km 29,300 - 00015 Monterotondo, Roma, Italia

^g Dipartimento di strutture per l'Ingegneria e per l'Architettura, Piazzale Tecchio, 80, 80125 Napoli, Italia

^h Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Viale del Risorgimento 2, 40136 Bologna, Italia

ⁱ Dipartimento di Culture del Progetto, Università IUAV di Venezia Campus Terese, Dorsoduro 2206, 30123 Venezia, Italia

Keywords: Muratura; analisi sismica; codici di calcolo; strutture benchmark; analisi statica nonlineare

ABSTRACT

L'articolo presenta il confronto dei risultati ottenuti su un edificio in muratura da analisi statiche nonlineari utilizzando diversi *software*, disponibili anche a livello professionale, che operano nell'ambito di vari approcci di modellazione. La struttura esaminata è ispirata ad un edificio reale, la scuola "P. Capuzi" di Visso (MC), gravemente danneggiata a seguito degli eventi sismici che hanno interessato il Centro Italia nel 2016/2017. L'attività descritta si inquadra in un più ampio programma di ricerca svolto in sinergia da varie unità coinvolte nel progetto ReLUIS 2017/2108 – *Linea Strutture in Muratura* e avente come oggetto l'analisi di strutture *benchmark* per la valutazione dell'affidabilità di codici di calcolo. Obiettivi più generali dell'attività sono quelli di sensibilizzare i professionisti ad un uso più consapevole dei *software* e fornire loro strumenti utili ad analizzare criticamente qualità e correttezza delle soluzioni ottenute. I dati di input e alcune scelte di modellazione sono stati condivisi al fine di limitare la potenziale dispersione dei risultati e renderne meno problematico il confronto. Quest'ultima finalità è guidata dalla volontà di ottimizzare la fase di controllo dei risultati, per la quale sono state individuate precise modalità operative. Il confronto delle analisi è stato svolto in relazione a parametri: *globali* (inerenti le proprietà dinamiche, le curve di capacità globale e le relative curve bilineari equivalenti), *sintetici della sicurezza strutturale* (quale, ad esempio, l'accelerazione massima compatibile con lo stato limite di salvaguardia della vita) e *interpretativi della risposta complessiva* (relativi al quadro di danno simulato). I risultati presentati consentono di eseguire delle riflessioni sull'utilizzo dei *software*, sulla dispersione dei risultati ottenibili e sulle potenziali ricadute in ambito professionale.

1 INTRODUZIONE

L'articolo presenta l'attività svolta in sinergia da varie unità di ricerca coinvolte nel progetto ReLUIS 2017/2018 – *Linea Strutture in Muratura*, attinente l'analisi di strutture *benchmark* per la valutazione dell'affidabilità di codici di calcolo mirati all'analisi sismica delle costruzioni in muratura. Il tema trattato è molto attuale, anche tenuto conto delle potenziali

ricadute che le valutazioni di sicurezza sismica hanno non solo alla scala dei singoli edifici ma anche a scala territoriale, nella pianificazione delle politiche di mitigazione operate dalle amministrazioni. Al riguardo, vari studi hanno già messo in evidenza come la dispersione dei risultati ottenibili al variare di diverse strategie di modellazione e/o analisi eseguite da diversi analisti o con diversi *software* possa essere anche

molto significativa (ad esempio si veda Marques e Lourenco 2014, Calderoni et al. 2015, De Falco et al. 2017, Esposito et al. 2019). La sensibilità al tema è crescente anche in ambito normativo, come ad esempio dimostrato dal paragrafo 2 (“*Analisi e verifiche svolte con l’ausilio di codici di calcolo*”) delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) che precisa come siano responsabilità del progettista il “*controllo dell’affidabilità dei codici utilizzati; il riesame della documentazione a corredo del software per valutarne l’affidabilità e l’idoneità al caso specifico; il giudizio motivato dell’accettabilità dei risultati forniti dai software*”.

Obiettivi ultimi dell’attività di ricerca sono la sensibilizzazione dei professionisti ad un utilizzo più consapevole dei *software* commerciali e la produzione di strumenti (report scientifici e documenti di linee guida fruibili da terzi) utili per la valutazione critica della correttezza delle soluzioni ottenute dai codici di calcolo. L’attività presentata nell’articolo rientra in un più ampio programma di ricerca, avviato a partire dal 2014 dapprima attraverso la definizione di strutture *benchmark* ideali di crescente complessità (Cattari et al. 2017, Cattari et al. 2018a) fino ad arrivare a strutture più complesse rappresentative di edifici reali (Cattari et al. 2018b).

In particolare, nel presente articolo, sono mostrati alcuni risultati delle valutazioni effettuate tramite analisi statiche nonlineari su un caso studio reale, ispirato alla geometria e ai dati tipologici-costruttivi della scuola “P. Capuzi” di Visso (MC). Tale edificio, costruito negli anni ’30, è stato gravemente danneggiato, prevalentemente nel piano delle pareti murarie, a seguito degli eventi sismici che hanno interessato il Centro Italia nel 2016/2017. La struttura è stata modellata con nove programmi di calcolo, disponibili anche a livello professionale, che operano nell’ambito di diversi approcci di modellazione (§2). I dati di input e alcune scelte di modellazione (riassunti in una scheda di sintesi, in modo da poter essere riproducibile anche da terzi, §3) sono stati condivisi in una fase iniziale dai ricercatori coinvolti al fine di limitare la potenziale dispersione dei risultati e renderne meno problematico il confronto. Quest’ultima finalità è guidata dalla volontà di ottimizzare la fase di controllo dei risultati, per la quale sono state individuate precise modalità operative (§2). La sinergia tra i diversi ricercatori coinvolti ha consentito di attuare un confronto critico e approfondito delle soluzioni adottabili al fine di una modellazione coerente della stessa struttura. Nel §4 sono presentati alcuni dei primi risultati ottenuti.

2 MODALITA’ DI LAVORO E DI CONFRONTO DEI RISULTATI E SOFTWARE IMPIEGATI

Al fine di ridurre le dispersioni nei risultati dovute alle numerose scelte arbitrarie che la fase di modellazione implica, sono state innanzitutto condivise le assunzioni più rilevanti inerenti non solo i dati geometrici, la distribuzione dei carichi e le proprietà dei materiali ma anche, ad esempio, le dimensioni degli elementi strutturali, quali maschi e fasce (per i soli modelli a telaio equivalente, che presuppongono la definizione a priori della loro geometria). Questi dati di input sono stati raccolti in una scheda di sintesi che potrà essere in futuro resa fruibile a terzi per l’analisi della stessa configurazione con altri *software* anche da parte di altri ricercatori o professionisti. Inoltre, sebbene nei casi più complessi (come quello oggetto del presente articolo) non fosse possibile predisporre una soluzione analitica rigorosa di riferimento per il professionista come per altre strutture *benchmark* più semplici (Cattari et al. 2017), anche in questo caso sono stati comunque adottati:

- controlli volti ad evitare errori grossolani, derivanti da un errato inserimento dei parametri del modello nel *software* di calcolo;
- un percorso metodologico di interpretazione dei risultati.

Riguardo ai primi, sono stati ad esempio condivisi controlli relativi: alla coerenza della massa totale della struttura (facilmente calcolabile manualmente a partire dai dati di input); all’equilibrio tra i pesi totali e la risultante delle reazioni verticali alla base del modello; al confronto rispetto all’*upper bound* analitico definito dalla condizione ideale di *Shear Type*. Riguardo al secondo, l’esecuzione delle analisi numeriche eseguite sulla struttura attraverso l’utilizzo di un certo numero di *software* da parte delle diverse unità di ricerca coinvolte nello studio e l’analisi dei dati a valle di un processo di controllo qualificato hanno consentito di definire un intervallo di variazione atteso dei risultati, con il quale anche altri professionisti in futuro potranno confrontarsi per valutare l’affidabilità della soluzione ottenuta con il *software* da essi impiegato.

Allo stato attuale della ricerca, la struttura qui discussa è stata modellata con nove programmi di calcolo disponibili anche a livello professionale di cui: sei operano nell’ambito della modellazione

per *elementi strutturali*, in particolare secondo l'approccio a telaio equivalente; uno della modellazione ad *elementi discreti piani*; due della modellazione al continuo ad *elementi finiti*.

I *software* afferenti alla modellazione a telaio equivalente descrivono la risposta dei pannelli murari attraverso un legame di tipo trave nonlineare con plasticità concentrata: 3Muri Release 10.9.1.7 (distribuito da STA.Data, il cui motore di calcolo fa riferimento al lavoro di Lagomarsino 2013); AEDES PCM 2018; ANDILWall (sviluppato da Magenes et al. 2006 e Manzini et al. 2006); CDS (CDMaWin 2018); MIDAS Gen (impiegando la formulazione della cerniera proposta in Spacone et al. 2007, Spacone et. al 2008); SAP 2000 Release 18. Il *software* che opera per elementi discreti piani, 3DMacro (Caliò et al. 2009, Caliò et al. 2012) adotta una formulazione a macro-elementi in cui le diverse modalità di rottura sono gestite da diversi tipi di molle nonlineari. Infine i *software* che operano nell'ambito della modellazione a elementi finiti adottano in un caso (ABAQUS Release 6.18) un legame costitutivo isotropo con plasticità e danno implementato su un modello 3D solido della struttura attraverso elementi finiti tetraedrici a quattro nodi (Castellazzi et al. 2018), nell'altro (MIDAS FEA) un legame costitutivo nonlineare di tipo "Total Strain Crack Model" assumendo fissato il sistema di riferimento a fessurazione avvenuta denominato "fixed crack model" (Midas FEA 2016, che implementa il modello basato su Vecchio e Collins 1986, Selby e Vecchio 1993).

Il fatto che i modelli a telaio equivalente siano rappresentati nello studio con una più significativa numerosità riflette la loro maggiore diffusione nella pratica professionale; questo è giustificato anche dal fatto che essi sono esplicitamente citati nei codici normativi a livello nazionale ed internazionale (NTC 2018, Eurocodice 8-2 2005) e sono tipicamente caratterizzati da un onere computazionale inferiore rispetto ad altri metodi, quali ad esempio i modelli ad elementi finiti. Inoltre, poiché la scala di modellazione si riferisce già direttamente a quella dei pannelli murari, la descrizione del loro comportamento non lineare richiede l'inserimento di dati e parametri che sono gli stessi poi necessari ai fini della verifica, operata in termini di caratteristiche di sollecitazione generalizzate, come proposto dalle normative, e spesso ricavati dalle prove in situ eseguite sugli edifici esistenti nella fase di conoscenza. Al

contrario, i modelli al continuo ad elementi finiti richiedono una fase iniziale di calibrazione dei parametri o comunque la necessità di istituire (almeno per alcuni) una corrispondenza con quelli poi previsti nei criteri di resistenza proposti in ambito normativo.

Il caso studio in esame è caratterizzato da una distribuzione regolare delle aperture e da un danneggiamento indotto dall'evento sismico prevalentemente nel piano delle pareti murarie, con concentrazione delle lesioni nei maschi e fasce murarie (almeno prima che alcuni effetti di accumulo del danno a seguito della seconda scossa del 26 ottobre 2016 portassero all'attivazione di un meccanismo di ribaltamento in una porzione limitata del fabbricato, Figura 2). Entrambe le caratteristiche giustificano l'adozione dell'approccio a telaio equivalente senza criticità rilevanti rispetto ad altri casi che spesso contraddistinguono l'edilizia esistente (quali ad esempio la disposizione delle aperture fortemente irregolare o l'interazione significativa tra modalità di danno nel piano e fuori dal piano) rendendo quindi il caso studio selezionato particolarmente idoneo per le finalità e gli ambiti delineati.

Il confronto dei risultati delle analisi conseguiti con i diversi *software* è stato svolto in relazione a parametri: *globali*, inerenti le proprietà dinamiche (periodi e forme modali), le curve di capacità globale e le relative curve bilineari equivalenti; *sintetici della sicurezza strutturale*, quale, ad esempio, l'accelerazione massima compatibile con lo stato limite di salvaguardia della vita; *interpretativi della risposta complessiva*, relativi al quadro di danno simulato.

In particolare, il confronto relativo alle curve pushover risulta di fondamentale importanza, costituendo l'elemento chiave per la verifica di sicurezza nel caso si adotti l'analisi statica nonlineare. Per tale ragione, oltre al confronto diretto tra le curve, è stato valutato anche lo scarto percentuale delle tre grandezze che definiscono la curva bilineare equivalente (rigidezza globale K_G , taglio di base $V_{Y,G}$, spostamento ultimo $d_{U,G}$), determinata secondo i principi proposti dalle NTC 2018, ossia:

- per la rigidezza, imponendo il passaggio per il valore del taglio di base pari al 70% del massimo;

- per lo spostamento ultimo, arrestando la curva in corrispondenza del decadimento del taglio di base del 20%;
- per il taglio di base a snervamento, imponendo l'eguaglianza delle aree sottese.

Lo scarto percentuale è stato calcolato, per ciascuna delle diverse grandezze, rispetto al valore medio delle stime ottenute dai *software* impiegati, raggruppati in funzione dell'approccio di modellazione adottato.

Ai fini del confronto centralizzato dei risultati sono poi state ideate ulteriori rappresentazioni, già discusse in Cattari et al. (2018a) e in parte riprese al §4. Tali risultati consentono di eseguire delle riflessioni sull'utilizzo dei *software*, sulla dispersione dei risultati ottenibili e sulle potenziali ricadute in ambito professionale. Dal momento che, come già precisato, obiettivo del presente studio non è validare i programmi di calcolo utilizzati, i risultati saranno presentati in forma del tutto anonima associando a ciascun *software* una lettera (da A a F per i modelli a telaio, da G a I per i modelli al continuo e con elementi piani discreti) ed un colore (Figura 1).

Modelli a Telaio Equivalente

A ■ B ■ C ■ D ■ E ■ F ■

Modelli al continuo e con elementi piani discreti

G ■ H ■ I ■

Figura 1. Legenda associate ai *software* impiegati.

3 DESCRIZIONE DEL CASO STUDIO

L'edificio cui si ispira la struttura esaminata in termini di geometria, dettagli costruttivi (almeno per alcune configurazioni) e materiali è la scuola "P. Capuzi" di Visso (MC). La scuola, risalente agli anni '30, ha subito diversi interventi di consolidamento a seguito del terremoto Umbria-Marche 1997 ed è stata gravemente danneggiata a seguito degli eventi sismici che hanno interessato il Centro Italia nel 2016/2017 (Figura 2). La struttura, oggi demolita a causa dei gravi danni subiti, era oggetto di un sistema di monitoraggio permanente dall'Osservatorio Sismico delle Strutture (Dolce et al. 2017), grazie al quale sono disponibili dati preziosi sulle registrazioni della risposta reale della costruzione. Sebbene l'interpretazione e la simulazione numerica di dettaglio della struttura siano oggetto di altre ricerche (Cattari et al. 2019) e non di quella qui discussa, avere a disposizione la ricostruzione del danno reale costituisce un importante riscontro

per svolgere considerazioni sull'affidabilità dei *software* impiegati nel predire e cogliere le modalità di danno effettivamente attivate.



Figura 2. Scuola "P. Capuzi" di Visso (MC) al termine della sequenza sismica che ha colpito il Centro Italia nel 2016/2017 (foto al 8/12/2017): a. vista sulla parete 8 con lesioni a taglio diagonale nei maschi e nelle fasce e sull'angolata della parete 7 in cui si è attivato un meccanismo di ribaltamento dopo la seconda scossa del 26/10/2016; vista sulla parete 10 con meccanismo per scorrimento con deformazioni permanenti significative al piano terra. Per la numerazione delle pareti si rimanda alla Figura 3.

L'edificio si sviluppa su due livelli più il piano di sottotetto e una parte interrata (trascurata ai fini della ricerca qui presentata). Esso presenta una pianta di forma irregolare assimilabile a una T capovolta ed è caratterizzato da muratura portante e solai rigidi.

Al fine di investigare la dispersione dei risultati ottenibili dai diversi *software* al variare di diverse configurazioni strutturali ricorrenti nell'edilizia esistente, sono state analizzate quattro diverse configurazioni:

- Caso A: assenza di elementi resistenti a trazione accoppiati alle fasce, per promuovere un cosiddetto comportamento di "fascia debole";
- Caso B: presenza di catene ($4\phi 12$) accoppiate alle fasce (acciaio con carico di rottura per trazione pari a 42 kg/mm^2 e con limite di snervamento pari a 30 kg/mm^2 , allungamento di rottura pari al 20%); in questo caso, il contributo di accoppiamento tra i maschi è dato dalla sola rigidezza della fascia;
- Caso C: fasce accoppiate ad elementi resistenti a trazione (cordoli a tutto spessore in calcestruzzo armato C12/15, disposti lungo tutte le pareti, con armatura

longitudinale $4\phi 12$ e trasversale $\phi 6$ a due braccia con passo 25 cm);

A partire dal Caso C, è stata poi analizzata una ulteriore configurazione, al fine di simulare un comportamento ideale di tipo “Shear Type”, imponendo rotazioni bloccate dei nodi a ciascun piano (caso D). Infatti, i risultati della ricerca condotta in precedenza su una struttura *benchmark* decisamente più semplice (Cattari et al. 2018a), rappresentata da un edificio monocellula-bipiano, avevano evidenziato come la dispersione dei risultati tenda a ridursi passando dalla configurazione A alla D.

Le strutture verticali sono realizzate prevalentemente con una muratura in pietra a spacco (*MUR1* in Tabella 1). Alcune pareti di questa tipologia hanno subito interventi di consolidamento mediante iniezioni di malta e/o con inserimenti di pilastri in mattoni pieni (*MUR1_C* in Tabella 1). E' inoltre presente, pur in maniera più sporadica, anche muratura in mattoni pieni e malta di calce (*MUR2* in Tabella 1). I parametri meccanici adottati nelle analisi sono riportati in Tabella 1. In particolare, questi sono stati definiti adottando i valori medi dell'intervallo proposto nella Circolare Esplicativa 617 2009 per le due classi di muratura presenti nella struttura. Nel caso della muratura consolidata tramite iniezioni si è considerato un coefficiente migliorativo 1.5. Il livello di conoscenza assunto è pari a LC2, che implica l'applicazione di un FC pari a 1.2 sia ai parametri di resistenza della muratura in mattoni che a quella in pietra a spacco. I moduli riportati in Tabella sono da intendersi rappresentativi di una condizione iniziale non fessurata; ai fini dell'esecuzione delle analisi statiche nonlineari le rigidezze elastiche degli elementi strutturali sono state convenzionalmente ridotte del 50%.

Tabella 1. Parametri meccanici adottati nelle analisi.

Muratura	f_m [N/cm ²]	τ_0 [N/cm ²]	E [N/mm ²]	G [N/mm ²]	w [kN/m ³]	
MUR1	NC	320	6.5	1740	580	21
	C	480	9.75	2610	870	
MUR2 (medi per 1.5)	480	11.4	2250	750	18	

f_m = resistenza a compressione della muratura
 τ_0 = resistenza a taglio della muratura per fessurazione diagonale
E= modulo di Young della muratura (in direzione verticale)
G= modulo a taglio della muratura
w = peso specifico della muratura

Il taglio resistente dei pannelli murari è stato calcolato adottando a riferimento il criterio di taglio per fessurazione diagonale proposto in Turnsek e Sheppard (1980) e quello a pressoflessione proposto nelle Norme Tecniche

delle Costruzioni 2008. Anche per le fasce sono stati adottati i criteri proposti in quest'ultimo documento.

Come già anticipato al §2, per ridurre le dispersioni nei risultati sono state condivisi dai vari ricercatori coinvolti:

- i dati geometrici (a titolo di esempio, in Figura 3 sono illustrati in pianta gli spessori murari assunti per le pareti del primo piano);
- la distribuzione dei carichi dei solai (è stato inoltre concordato di non modellare esplicitamente tutti gli elementi strutturali della copertura, ma di simularne l'effetto attraverso un carico equivalente);
- le proprietà dei materiali;
- nel caso dei modelli a telaio equivalente, la geometria di maschi e fasce, come illustrato, ad esempio, in Figura 4 per le pareti P8 e P10.

Riguardo all'ultimo aspetto, l'idealizzazione in telaio equivalente e quindi la dimensione degli elementi in cui concentrare a priori la non linearità della risposta costituisce la prima fonte di arbitrarietà nell'uso di tale approccio di modellazione. In letteratura sono proposti diversi criteri (ad esempio in Dolce 1991, Augenti 2006, Moon et al. 2006, Lagomarsino et al 2013), che producono soluzioni anche significativamente diverse, in funzione del grado di irregolarità nella disposizione delle aperture, ma sui quali non è fornito un univoco indirizzo dalla comunità scientifica né tantomeno prescrizioni cogenti in ambito normativo. Nel caso specifico, è stato deciso di adottare il criterio proposto in Lagomarsino et al. (2013), a seguito di alcune preliminari valutazioni basate sulla reale estensione delle lesioni occorse nell'edificio.

Inoltre, è stato concordato di eseguire le analisi sui modelli a telaio equivalente trascurando il contributo della rigidezza e resistenza fuori piano dei pannelli murari e considerando un efficace ammorsamento tra le pareti.

Nonostante la condivisione e l'adozione coerente delle più significative ipotesi di modellazione nei modelli a telaio, è evidente come i risultati ottenuti possano ancora differire, dal momento che molte sono le ulteriori ipotesi che governano la risoluzione del problema, quali ad esempio:

- gli algoritmi di convergenza;
- i criteri adottati per definire il collasso dei pannelli murari: si osservi al riguardo che benché le norme

prescrivano dei valori limite in termini di drift, non è sempre chiarito come calcolare questa grandezza (ad esempio se depurare o meno il calcolo delle rotazioni);

- le modalità adottate per gestire l'interazione tra pareti incidenti (qualità dell'ammorsamento e effetto flangia). Al riguardo, sono diverse le soluzioni implementate nei *software* utilizzati, quali ad esempio: a) l'inserimento di link rigidi o la condensazione del grado di libertà associato alla componente verticale di spostamento nei nodi di intersezione; b) l'inserimento di travi di collegamento tra i nodi di estremità degli elementi verticali di rigidità definita a priori dal *software* oppure editabile dall'utente (consentendo di graduare l'effetto di accoppiamento); c) l'inclusione del contributo di rigidità della flangia computato manualmente dall'utente;
- le modalità con cui sono modellate le fasce e gestiti gli elementi eventualmente ad esse accoppiati.

L'ambizione della ricerca di effettuare un controllo dettagliato e coerente anche tra approcci di modellazione che operano a scale diverse, quali ad esempio i modelli a telaio (alla scala del pannello strutturale) e quelli al continuo (alla scala del materiale) pone poi ulteriori criticità.

Innanzitutto, un confronto coerente richiede la consapevolezza della corrispondenza tra i parametri meccanici adottati (e quindi una opportuna calibrazione degli stessi) e quella delle differenze intrinseche dei due approcci (ad esempio, in relazione a come sono descritti il degrado della rigidità o il contributo fuori piano, che nel caso dei modelli al continuo in virtù del tipo di elementi scelti non era possibile disattivare). Quando possibile, sono stati adottati anche nei modelli al continuo accorgimenti per rendere più confrontabili i risultati; ad esempio: nel caso dell'applicazione delle forze orizzontali, queste sono state applicate a livello dei solai (ossia in maniera concentrata, come operato dai modelli a telaio a livello dei nodi) e non in maniera distribuita (come più diffusamente adottato anche nella pratica). Una differenza significativa tra i due approcci di modellazione risiede poi nella capacità di descrivere le modalità

di interazione fra gli elementi, ad esempio tra i solai e la muratura, che può portare anche a ripercussioni rilevanti nei risultati, specialmente nel caso delle configurazioni in cui le fasce non sono accoppiate ad alcun elemento resistente a trazione.

Gli approcci di modellazione al continuo pongono poi svariate questioni relative al post-processing dei risultati, in relazione alla loro interpretazione ai fini della verifica secondo criteri compatibili con quelli proposti comunemente dalle normative. Tutti questi aspetti sono più diffusamente trattati in Cattari et al. (2018b).

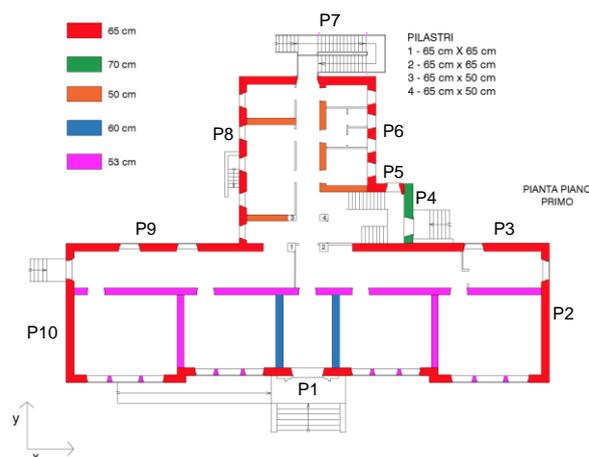


Figura 3. Identificazione degli spessori murari al piano primo e numerazione delle pareti.

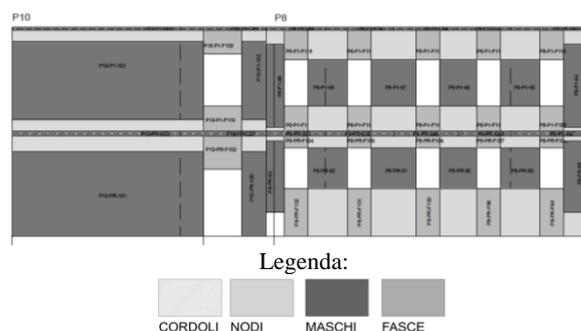


Figura 4. Criteri di idealizzazione in telaio delle pareti P10 e P8 (numerazione in Figura 3).

4 RISULTATI

Nel seguito è presentata una selezione dei risultati più diffusamente illustrati in Cattari et al. (2018b). Per brevità, i risultati sono relativi al sola Caso C illustrato al §3.

La Figura 5 mostra gli scarti percentuali delle masse rispetto al valore medio dei modelli a telaio (assunto convenzionalmente quale termine di riferimento), da cui si osserva come lo scarto massimo sia inferiore al 4%. In Figura, è inoltre

riportata la media delle masse ottenute considerando tutti i *software*.

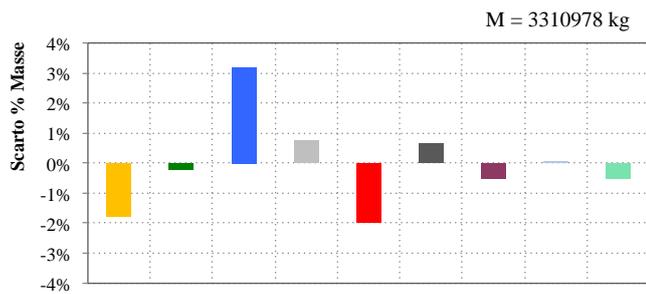


Figura 5. Scarti delle masse rispetto al valore medio valutate da ciascun *software*.

La Figura 6 presenta invece gli scarti dei periodi dei primi tre modi propri, calcolati rispetto al valore medio, assumendo in tutti i modelli rigidezza elastica fessurata per gli elementi strutturali (analogamente a quanto poi adottato nelle analisi statiche nonlineari). Le analisi modali evidenziano, per la maggior parte dei *software*: un modo di vibrazione flessor-torsionale (con percentuali significative di massa attivata sia in direzione X sia in direzione Y); due modi di vibrazione prevalentemente traslazionali, in direzione Y ed X rispettivamente. Il confronto è stato operato a parità di forma modale (definita sulla base del confronto delle componenti degli autovettori e delle percentuali di massa partecipante attivata). Come si osserva dalla Figura 6, nel caso di un modello di calcolo (basato su un approccio di modellazione a telaio equivalente), lo scarto percentuale è un poco più significativo (dell'ordine comunque inferiore al 15%). Questo risultato è imputabile ad un diverso contributo dell'effetto flangia. Mentre gli altri modelli a telaio assumono un perfetto accoppiamento cinematico fra le pareti incidenti, nel caso di questo modello la quota parte di flangia efficace è stata attribuita manualmente, assegnando all'ala una lunghezza pari a due volte lo spessore dell'anima nel caso della sezione ad "L" e a quattro volte lo spessore dell'anima nel caso della sezione a "T".

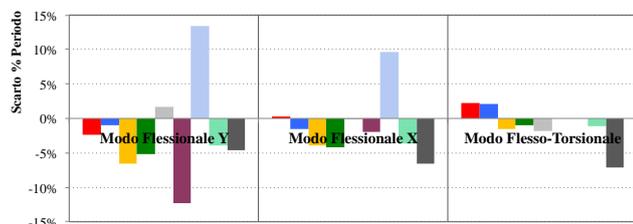


Figura 6. Scarti dei periodi ottenuti con moduli fessurati.

La Figura 7 mostra il fascio di curve pushover ottenute dall'analisi statica nonlineare in direzione $-Y$ (si veda la Figura 3) con distribuzione di forze proporzionale al prodotto delle masse per l'altezza ("triangolare inversa").

Questa direzione è risultata quella più vulnerabile per l'edificio.

La differenza marcata in termini di rigidezza iniziale riscontrabile nei modelli al continuo riflette quella nelle modalità con cui si tiene conto del degrado: nei modelli a telaio, convenzionalmente, assumendo un coefficiente riduttivo delle rigidezze elastiche delle sezioni intere pari a 0.5, nel caso degli altri modelli, progressivamente, in ragione della evoluzione della diffusione del danno ed in misura diversa a seconda della modalità di danno attivata nei pannelli (a pressoflessione o a taglio).

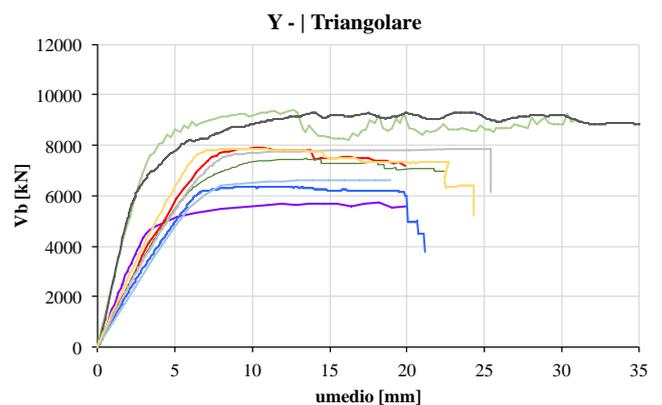


Figura 7. Curve pushover in direzione Y dall'analisi statica nonlineare triangolare inversa (verso negativo).

Lo scarto percentuale risultante, calcolato rispetto al valore medio delle tre grandezze che definiscono la bilineare equivalente (come introdotto al §2), è riportato in Figura 8, integrato con i risultati delle analisi eseguite con la distribuzione di forze "uniforme". Nel caso dei modelli al continuo, lo scarto è valutato rispetto al valore medio ottenuto dai modelli a telaio, solo al fine di avere un termine di paragone comune. Per questi modelli non è stato riportato lo scarto rispetto allo spostamento ultimo poiché - diversamente dai modelli a telaio nei quali sono implementati criteri automatici per la definizione del collasso degli elementi (in termini di superamento delle soglie di drift) che portano al degrado del taglio complessivo di base - la definizione di quest'ultimo richiederebbe svariate valutazioni ex-post, con la necessità di introdurre numerosi criteri convenzionali (quali, ad esempio, l'assegnazione di criteri robusti per attribuire una modalità di danno prevalente ai pannelli). Si osserva come, in generale, lo scarto nel caso dei modelli a telaio si attesti intorno al 15%.

La Figura 9 mostra invece gli scarti dell'accelerazione massima compatibile per due

condizioni prestazionali significative individuate sulla curva pushover (PGA_{SL}) quali:

- PGA_{SLV} : in corrispondenza del raggiungimento dello spostamento ultimo (assunto come stato limite di salvaguardia della vita);
- PGA_{Vy} : in corrispondenza del punto di snervamento della bilineare equivalente.

In particolare, il calcolo delle PGA_{SL} è stato eseguito adottando il metodo N2 (Fajfar 1999) con una forma spettrale coerente con i parametri di pericolosità di Visso (suolo C). Tale valutazione è riportata a titolo di esempio per la distribuzione di forze uniforme. Nelle differenze ottenibili evidentemente incidono quelle sui parametri della bilineare equivalente nonché ad esempio la stima del coefficiente di partecipazione Γ operata dai *software*. Il risultato è utile per quantificare come le differenze nella descrizione della risposta nonlineare sulla struttura possano ripercuotersi sulla valutazione della sicurezza finale.

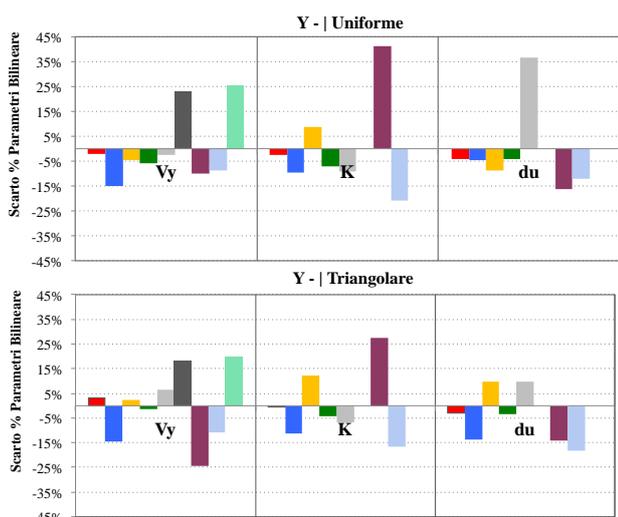


Figura 8. Scarto percentuale rispetto al valore medio delle tre grandezze che definiscono la bilineare equivalente.

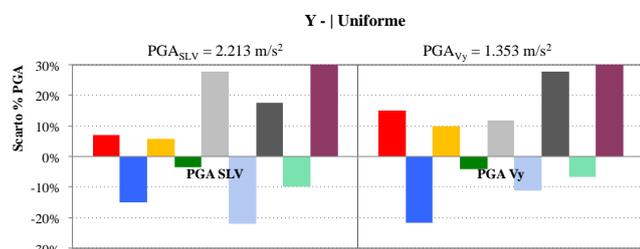


Figura 9. Scarti delle PGA ottenuti per i diversi *software*.

Infine, per ogni elemento strutturale del modello (maschi, fasce, cordoli e pilastri) è stato restituito il quadro del danno, classificandone la gravità e la modalità di collasso. La Figura 10 riporta, a titolo di esempio, il rilievo del danno reale sulla parete 8 (Figura 3) con la numerazione

degli elementi maschio e fascia e gli istogrammi rappresentativi del danno simulato dai diversi *software* per la medesima parete al piano rialzato (PR) e al primo piano (P1) per le analisi in direzione Y. La legenda fa riferimento ai seguenti livelli di danno e modalità di rottura:

- Fase elastica - E, Fase Plastica - P (in corrispondenza del taglio resistente del pannello), Rottura - R (superamento della soglia di drift). Sono indicati inoltre gli elementi non attivi in trazione.
- Modalità di rottura per taglio diagonale-V, pressoflessione- PF e MISTA.

Negli istogrammi è riportato il numero di *software* che ha predetto una stessa modalità di danneggiamento. Si osserva, in generale, un buon accordo tra le previsioni offerte dai diversi programmi di calcolo e, inoltre, un buon accordo con la risposta reale. Si precisa come, in questo caso, quest'ultimo confronto sia del tutto pertinente, essendo la configurazione C quella più coerente con quella reale della scuola.

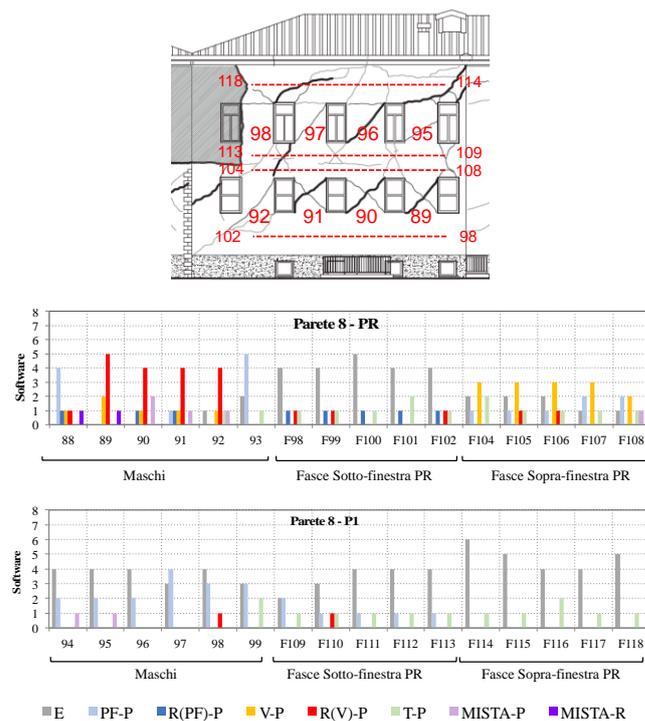


Figura 10. Rilievo del danno reale sulla parete 8 (Figura 3); Istogrammi rappresentativi del danno simulato dai diversi *software* per la parete 8 al piano rialzato (PR) e al primo piano (P1) - analisi in direzione Y.

5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'articolo presenta alcuni risultati dell'attività svolta in sinergia da varie unità di ricerca coinvolte nel progetto ReLUIS 2017/2018 - *Linea Strutture in Muratura*, attinente all'analisi di strutture *benchmark* per la valutazione

dell'affidabilità di codici di calcolo mirati all'analisi sismica delle costruzioni in muratura. L'attività è ancora in corso nell'ambito del programma DPC ReLUIIS 2019-2021 (WP10 – Contributi normativi relativi a costruzioni esistenti in muratura nel Task 10.3), al fine di arricchire il numero di casi studio esaminati per definire: da un lato intervalli di riferimento più robusti, che siano rappresentativi dell'incertezza epistemica di modello; dall'altro, approfondire alcuni aspetti critici emersi dai primi casi *benchmark* analizzati (quali l'effetto flangia, le ripercussioni nei criteri di modellazione delle fasce al variare degli approcci al continuo o a telaio equivalente, il contributo alla risposta fuori piano) e valutare anche le ricadute delle modifiche introdotte dal recente aggiornamento delle Norme Tecniche delle Costruzioni 2018 e relativa Circolare.

E' utile osservare che le dispersioni nei risultati ottenuti nell'ambito della presente ricerca è atteso siano inferiori di quelle che potrebbero risultare dall'analisi da parte di diversi professionisti che eseguano la valutazione indipendentemente su una stessa struttura, ossia senza governare in alcun modo le arbitrarietà insite nel processo di modellazione.

I risultati integrali dell'attività saranno raccolti in futuro in un documento di Linee Guida fruibile da terzi che sintetizzi i risultati ottenuti sulle diverse strutture *benchmark* analizzate di complessità crescente. Ai fini di facilitarne la fruizione da parte anche di professionisti, il documento sarà corredato da opportune schede di sintesi atte a definire tutti i dati di input dei diversi casi studio analizzati in modo che siano facilmente riproducibili con qualunque *software*. Tale documento ambisce a poter costituire un utile supporto anche per i professionisti, fornendo non solo risultati che possano costituire un riferimento con cui confrontarsi, ma anche un esame ragionato delle criticità che l'uso dei *software* può presentare dal punto di vista della modellazione, con particolare riferimento all'analisi delle costruzioni esistenti.

RINGRAZIAMENTI

L'attività di ricerca svolta è stata finanziata dal progetto esecutivo DPC-ReLUIIS 2018 – Linea Strutture in Muratura (Coord. Proff. F.Da Porto, G.Magenes e S.Lagomarsino) (WP4 -Analisi della risposta strutturale a seguito dei recenti

eventi sismici - Task 4.3) e DPC-ReLUIIS 2019 WP10 – *Contributi normativi relativi a costruzioni esistenti in muratura* (Coord. Prof. Gg.Magenes) nel Task 10.3-Validazione/Confronto strumenti software per l'applicazione dei metodi di verifica da norma (Coord. S.Cattari).

Il gruppo di lavoro di cui nella memoria sono presentati i risultati è costituito dalle seguenti unità di ricerca: UNIGE-c (Coord. S. Cattari); UNIPV-a (Coord. Prof. G. Magenes); UNI-CH: (Coord. Proff. E. Spacone e G. Camata); UNICT-a: (Coord. Prof. I. Calì); UNINA-d (Coord. Proff. B. Calderoni); UNIBO (Coord. Prof. de Miranda); IUAV (Coord. Prof.A.Saetta).

BIBLIOGRAFIA

- Abaqus 2018, Theory manual, version 6.18.
Aedes.PCM 2018, Progettazione di Costruzioni in Muratura, versione 2018, AEDES Software.
Agenti, N., 2006. Seismic behavior of irregular masonry walls. *1st European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland.
Calderoni, B., Cordasco, E.A., Sandoli, A., Onofri, V., Tortoriello, G., 2015. Problematiche di modellazione strutturale di edifici in muratura esistenti soggetti ad azioni sismiche in relazione all'utilizzo di software commerciali. *Convegno ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia"*. 13-17 Settembre, L'Aquila, Italia.
Calì, I., Cannizzaro, F., Marletta, M., Pantò, B., 2009. 3DMacro, Il software per le murature (3D computer program for the seismic assessment of masonry buildings), Gruppo Sismica s.r.l., Catania, Italy. Release 3.0, March 2014. www.3dmacro.it.
Calì, I., Marletta, M., Pantò, B., 2012. A new discrete element model for the evaluation of the seismic behaviour of unreinforced masonry buildings, *Engineering Structures*, 40, 327–338.
Castellazzi, G., D'Altri, A.M., de Miranda, S., Chiozzi, A., Tralli, A., 2018. Numerical insights on the seismic behavior of a nonisolated historical masonry tower, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 16(issue2), 933-961 (DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0231-6>).
Cattari, S., Camilletti, D., Magenes, G., Manzini, C.F., Morandi, P., Spacone, E., Camata, G., Marano, C., Calì, I., Pantò, B., Cannizzaro, F., Occhipinti, G., Calderoni, B., De Luca, A., Cordasco, E.A., Brandonisio, G., Sandoli, A., Casapulla, C., Portioli, F., De Felice, G., Malena, M., Lasciarrea, G., 2017. Analisi di strutture *benchmark* per la valutazione dell'affidabilità di codici di calcolo sismico degli edifici in muratura. *Convegno ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia"*. 17 – 21 settembre, Pistoia, Italia.
Cattari, S., Camilletti, D., Magenes, G., Manzini, C.F., Morandi, P., Spacone, E., Camata, G., Marano, C., Calì, I., Cannizzaro, F., Occhipinti, G., Pantò, B., Calderoni, B., Cordasco, E.A., Sandoli, A., 2018a. A comparative study on a 2-storey benchmark case study through nonlinear seismic analysis. *16th European Conference on Earthquake Engineering*. June 18-21, Thessaloniki, Greece.

- Cattari, S., Degli Abbati, S., Ottonelli, D., Magenes, G., Manzini, C.F., Morandi, P., Spacone, E., Marano, C., Camata, G., Calì, I., Pantò, B., Cannizzaro, F., Occhipinti, G., Calderoni, B., Cordasco, A.E., de Miranda, S., Castellazzi, G., D'Altri, A.M., Saetta, A., Berto, L., Doria, A., Talledo, D. 2018b. Report di sintesi e confronto delle simulazioni numeriche sui casi studio benchmark rappresentativi di edifici reali danneggiati, *Prodotto nell'ambito del della Linea Strutture in Muratura del progetto DPC-ReLUIS 2018*, Report scientifico.
- Cattari, S., Degli Abbati, S., Ottonelli, D., Marano, C., Camata, G., Spacone, E., da Porto, F., Modena, C., Lorenzoni, F., Magenes, G., Penna, A., Graziotti, F., Ceravolo, R., Miraglia, G., Lenticchia, E., Fiorini, N., Spina, D., 2019. Discussion on data recorded by the Italian structural seismic monitoring network on three masonry structures hit by the 2016-2017 Central Italy earthquake. *Convegno COMPDYN 2019 "7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering"*. 24 – 26 giugno, Creta, Grecia.
- CDMaWin (Computer Design of Masonries), 2018. Calcolo e verifica di edifici in muratura, versione 2018, STS.
- Circolare Esplicativa 617, 2009. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Circ. C.S.LI.Pp. No. 617 2/2/2009. Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al Decreto Ministeriale 14 Gennaio 2008. *G.U. S.O. n.27 of 26/2/2009*, No. 47.
- De Falco, A., Guidetti, G., Mori, M., Sevieri, G., 2017. Model uncertainties in seismic analysis of existing masonry buildings: the Equivalent-Frame Model within the Structural Element Models approach. *Convegno ANIDIS "L'Ingegneria Sismica in Italia"*. 17-21 Settembre, Pistoia, Italia.
- Dolce, M., 1991. Schematizzazione e modellazione degli edifici in muratura soggetti ad azioni sismiche, *L'industria delle costruzioni*, **25**(242), 44-57.
- Dolce, M., Nicoletti, M., De Sortis, A., Marchesini, S., Spina, D., Talanas, F., 2017. Osservatorio sismico delle strutture: the Italian structural seismic monitoring network, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **15**(2) (DOI:10.1007/s10518-015-9738-x).
- EC8-3, Comité Européen de Normalisation, 2005. Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance – Part 3: assessment and retrofitting of buildings.
- Esposito, R., Messali, F., Ravenshorst, G.J. Schipper, H.R., Rots, J.G., 2019. Seismic assessment of a lab-tested two-storey unreinforced masonry Dutch terraced house, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **17**(8), 4601-4623 (DOI: <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00572-w>).
- Fajfar, P., 1999. Capacity spectrum method based on inelastic demand spectra, *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, **8**(9), 979–93.
- Lagomarsino, S., Penna, A., Galasco, A., Cattari, S., 2013. TREMURI program: an equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings, *Engineering Structures*, **56**, 1787-1799.
- Magenes, G., Manzini, C.F., Morandi, P., Remino, M., Bolognini, D., 2006. SAM II, Software for the Simplified Seismic Analysis of Masonry buildings, Università degli Studi di Pavia, EUCENTRE.
- Manzini, C.F., Morandi, P., Magenes, G., Calliari, R., 2006. ANDILWall - Software di calcolo e verifica di edifici in muratura ordinaria, armata o mista – Manuale d'uso, Università di Pavia, EUCENTRE e CRSoft S.r.l.
- Marques R., Lourenço, P.B., 2014. Unreinforced and confined masonry buildings in seismic regions: Validation of macro-element models and cost analysis, *Engineering Structures*, **64**, 52–67.
- Midas FEA 2016 v1.1 - Build: Nov. 06, 2018. Nonlinear and detail FE Analysis System for Civil Structures. Midas Information Technology Co. Ltd.
- Moon, F.L., Yi, T., Leon, R.T., Kahn, L.F., 2006. Recommendations for Seismic Evaluation and Retrofit of Low-Rise URM Structures, *Journal of Structural Engineering*, **132**(5), 663-672.
- NTC 2018. Norme Tecniche delle Costruzioni, Decreto Ministeriale 17/1/2018. *Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"*. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, G.U. n.42 on 20/2/2018.
- SAP 2000, Release 18, distribuito da CSI Italia srl, CSI Computer and Structures, Inc.
- Selby, R.G., Vecchio, F.J. 1993. Three-dimensional Constitutive Relations for Reinforced Concrete. Tech. Rep. 93-02, Univ. Toronto, dept. Civil Eng., Toronto, Canada.
- Spacone, E., Camata, G., 2007. Cerniere Plastiche sviluppate per telai in cemento armato e implementate nel programma di calcolo Aedes, Issued by GC, Ottobre 2007.
- Spacone, E., Camata, G., Faggella, M., 2008. Nonlinear models and nonlinear procedures for seismic analysis of reinforced concrete frame structures. In: *Charpis D.C., Papadrakakis M., Lagaros N.D., Tsompanakis Y. Computational Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. ISBN: 9780415452618. Taylor and Francis (Netherlands).
- S.T.A.Data 2016, 3Muri Program, Release 10.9.1.7 (www.3muri.com).
- Turnšek, V., Sheppard, P., 1980. The shear and flexural resistance of masonry walls. *Proc. int. research conference on earthquake engineering*, Skopje, Japan (p. 517–573).
- Vecchio, F.J., Collins, M.P., 1986. The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear, *ACI Journal* **83**, 22: 219-231.