

Non-linear Global Analysis with Macro-elements of the Response to Horizontal Seismic Actions in Circular Masonry Buildings. The Case of the “La Rotunda” Prison in Tempio Pausania

Luigi Fenu, Valeria Colasanti, Eleonora Congiu (Università degli Studi di Cagliari)
Bruno Briseghella (Fuzhou University, Fuzhou, Repubblica Popolare Cinese)
Camillo Nuti (Università di Roma Tre, Roma, Italia)
Humberto Varum (Universidade do Porto, Porto, Portogallo)

Nonlinear analysis of the structural response of masonry buildings to horizontal actions, both using finite elements that takes into account cracks and yielding of piers and spandrels, and using discrete elements, often presents convergence problems and requires a considerable computational burden. In this respect, the approach with macroelements with the equivalent frame method is less problematic and allows the non-linear analysis of even very complex box-shaped buildings without significant computational problems. In this article the non-linear analysis by macroelements with the equivalent frame method is extended to buildings of cylindrical shape with a circular section of large dimensions, such as, for example, the important monumental building of neo-classical conception of the prison “La Rotunda” of Tempio Pausania in Sardinia, Italy. A non-linear static analysis (pushover) is performed in order to evaluate the response to the seismic action. The analysis shows how the response of the building to horizontal forces, up to the collapse of the structure, is strongly influenced by the interaction between the circular part of the building and the adjacent parallelepiped part located at the entrance to the “La Rotunda” prison.

HISTORICAL PRISONS

Studies and Proposals for the Reuse of Disposal Prison Heritage in Sardinia

www.archistor.unirc.it

ArchistoR EXTRA 11 (2023)

ISSN 2384-8898

Supplemento di ArchistoR 17/2022

ISBN 978-88-85479-18-0

DOI: 10.14633/AHR377



Analisi globale non lineare con macroelementi della risposta alle azioni orizzontali di edifici in muratura di forma circolare. Il caso del carcere “La Rotunda” di Tempio Pausania

Luigi Fenu, Valeria Colasanti, Eleonora Congiu, Bruno Briseghella, Camillo Nuti, Humberto Varum

L’analisi della risposta sismica di un edificio in muratura deve riferirsi a due principali tipi di analisi, l’analisi dei meccanismi locali e l’analisi della risposta globale dell’edificio. Un edificio in muratura ben progettato, con un buon comportamento scatolare e orizzontamenti di sufficiente rigidità è in generale in grado di fornire una risposta sismica globale sufficientemente duttile purchè sia prevenuto l’insorgere di meccanismi di risposta locale che portano al collasso anticipato di parti localizzate (ma che possono essere anche piuttosto estese) dell’edificio. L’analisi globale diviene significativa solo dopo che si è accertata l’impossibilità dell’insorgere di meccanismi di collasso locale, come è stato preventivamente verificato nel caso in oggetto del carcere “La Rotunda” di Tempio Pausania.

Considerando poi l’analisi non lineare della risposta all’azione delle forze orizzontali di edifici in muratura, si constata che con metodi numerici rigorosi quali i metodi degli elementi finiti e/o degli elementi discreti si viene a avere un onere computazionale assai elevato.

Utilizzando il metodo degli elementi finiti, il comportamento non lineare della muratura può essere accuratamente modellato per mezzo del *Concrete Damage Plasticity (CDP) model*¹. Però, sebbene con l’approccio micro-meccanico si potrebbe modellare in modo accurato la risposta statica e sismica degli edifici in muratura cogliendo le modalità di formazione delle fessure in maschi e fasce,

1. LEE, FENVES 1998; LUBLINER *et al.* 1989; MODÉER 1979; BRISEGHHELLA *et al.* 2019.

questi modelli sono difficili da far convergere sia per l'intrinseco comportamento quasi fragile della muratura con rapido decadimento della resistenza ma ampie deformazioni post-picco, sia perché l'onere computazionale è già alto anche quando si modella con approccio micro-meccanico un semplice pannello murario². Di conseguenza, i modelli non-lineari a elementi finiti sono difficili da utilizzarsi quando si deve modellare il comportamento delle strutture di interi edifici. Simili problemi si incontrano anche utilizzando i modelli a elementi discreti³.

Per tale motivo negli ultimi vent'anni molta ricerca è stata volta a superare tale inconveniente nel caso di edifici con muri piani e comportamento scatolare, che sono di gran lunga gli edifici in muratura più diffusi. A tal fine, fin dalla metà degli anni Ottanta dello scorso secolo, è stato messo a punto un metodo di analisi semplificata con macroelementi a telaio equivalente (*Equivalent Frame Method*, EFM) che schematizza i maschi e le fasce come elementi lineari che, collegati fra loro da nodi rigidi, formano un telaio piano in cui i maschi corrispondono ai ritti e le fasce alle travi⁴. La dimensione dei nodi rigidi dipende dalla lunghezza dei macroelementi, che a sua volta dipende dalla dimensione delle aperture. Nonostante le approssimazioni introdotte, l'EFM è il solo metodo che consente di analizzare correntemente la risposta non lineare di edifici in muratura anche complessi soggetti a azioni statiche e sismiche con un limitato onere computazionale raggiungendo abbastanza agevolmente la convergenza e fornendo risultati sufficientemente attendibili⁵. Il metodo è efficace nel valutare il ruolo di maschi, fasce e nodi nella risposta, in particolare, alle azioni orizzontali, fornendo una buona stima delle azioni interne e del comportamento complessivo, seppur perdendo l'analisi di dettaglio di sforzi e deformazioni nella muratura.

Il primo metodo a telaio equivalente con macroelementi venne messo a punto nei primi anni Ottanta del Novecento da Raithel e Augenti, il cosiddetto metodo RAN⁶. Negli anni, esso è stato successivamente migliorato dallo stesso Augenti⁷, da Parisi⁸ e da Augenti e Parisi⁹, e altri ne sono stati

2. LOURENÇO, ROTS, BLAAUWENDRAAD 1998; LOURENÇO 2009.

3. LEMOS 2007.

4. RAITHEL, AUGENTI 1984.

5. MARQUES, LOURENÇO 2011; GALASCO, LAGOMARSINO, PENNA, RESEMINI 2004.

6. RAITHEL, AUGENTI 1984.

7. AUGENTI 2004.

8. PARISI 2010.

9. PARISI, AUGENTI 2013.

proposti (per es. il metodo POR¹⁰). Oltre al metodo RAN, oggi risultano maggiormente sviluppati tre codici di analisi non-lineare a macroelementi col metodo del telaio equivalente: Tremuri¹¹, il metodo VEM¹² e il metodo SAM¹³.

I metodi a macroelementi con telaio equivalente si caratterizzano dal fatto che le deformazioni, in particolare non lineari, e il danneggiamento sono supposti concentrati in tali elementi lineari, le cui leggi costitutive portano a considerare per essi i due tipici modi di rottura nel piano di maschi e fasce per flessione e/o per taglio¹⁴. Tali semplificazioni consentono di valutare tramite l'EFM la risposta alle azioni orizzontali, in particolare di tipo sismico, di edifici con comportamento scatolare anche molto complessi e di forma anche molto irregolare tramite analisi statica non lineare *pushover*.

Per edifici complessi di forma qualsiasi, per esempio con spazi absidali o di forma circolare, il metodo non è invece tipicamente applicabile, portando di fatto a rendere di difficile valutazione l'analisi non lineare della risposta di tali edifici. Il presente studio si inserisce in una ricerca volta a estendere l'uso dell'analisi a macroelementi in edifici in muratura di forma circolare. Un primo contributo in tal senso è stato fornito analizzando la risposta sismica di un Tulou¹⁵, tipiche grandi case-fortezza circolari in terra cruda della tradizione costruttiva cinese della provincia del Fujian.

L'estensione al caso dei Tulou dell'analisi a macroelementi è stata qui ripresa per altri edifici circolari con differente schema strutturale. La perfezione e l'essenzialità delle forme geometriche degli edifici neoclassici propone un'ampia casistica di edifici in muratura di forma circolare. Fra questi, si distinguono diversi edifici a uso carcerario, fra cui il carcere "La Rotunda" di Tempio Pausania, di notevole qualità architettonica. L'estensione dell'analisi a macroelementi agli edifici di forma circolare è quindi descritta in questo studio mostrandone l'applicazione al caso del carcere di Tempio Pausania. Esso è stato scelto anche per la notevole documentazione disponibile relativamente a forma e dimensioni dell'edificio, nonché a materiali e elementi strutturali con cui è stato costruito¹⁶.

10. BRAGA, DOLCE 1982; DOLCE 1989.

11. LAGOMARSINO, PENNA, GALASCO, CATTARI 2013.

12. FUSIER, VIGNOLI 1993.

13. MAGENES, DELLA FONTANA 1998; MAGENES 2000.

14. GAMBAROTTA, LAGOMARSINO 1997.

15. BRISEGHHELLA *et al.* 2019a; BRISEGHHELLA *et al.* 2019b; BRISEGHHELLA *et al.* 2017.

16. ROMANO, CREMONESI NIANG 2016.

Descrizione dell'edificio

La costruzione di un modello numerico richiede sempre una approfondita conoscenza dell'edificio da modellare. Nel caso de "La Rotunda" di Tempio Pausania la documentazione disponibile è estesa. Essa risale già all'originario progetto della prima metà dell'Ottocento e è poi stata incrementata successivamente fino a arrivare a un recente rilievo fatto dal Politecnico di Milano¹⁷.

Il carcere circondariale "La Rotunda" fu costruito poco prima di metà Ottocento e si trova nel centro storico di Tempio Pausania. L'edificio è stato utilizzato come carcere circondariale per circa 170 anni, fino alla sua dismissione definitiva avvenuta nel 2012. È una tipologia carceraria ottocentesca di tipo neoclassico a pianta circolare con cortile interno, probabilmente progettata dall'ing. Enrico Marchesi, autore anche delle analoghe demolite vecchie carceri di Nuoro.

Attualmente l'edificio si presenta come un grosso complesso circolare, realizzato totalmente in muratura portante e archi in materiali granitico, con un corpo prismatico che si innesta nel volume cilindrico identificando la facciata principale e l'ingresso dell'edificio.

Esso consta di tre livelli fuori terra. Il corpo principale è costituito da una serie di anelli concentrici in muratura portante che delimitano uno spazio interno, nel quale trovavano luogo le celle carcerarie, e uno spazio esterno, un ampio cortile centrale. La struttura principale presenta inoltre sei nuclei di irrigidimento, composti da coppie di pareti di controvento che collegano le due cortine murarie circolari. Adiacente al blocco centrale, sul lato posteriore, si scorge quanto rimane della vecchia Chiesa, originariamente collegata al carcere ma oggi completamente staccata dallo stesso. Tutte le murature portanti dell'edificio sono realizzate ricorrendo a un sistema costruttivo tipico della zona, che prevede l'uso di conci di granito a spacco apparecchiati secondo corsi tendenzialmente sub-orizzontali (Fig. 1), spesso sbazzati verso una forma parallelepipedica, con argilla come legante e realizzati con buona tessitura. Lo spessore delle suddette murature varia all'incirca da un minimo di 50 cm fino a un massimo di 100 cm. Nel cortile interno, oltre alla parte di edificio a forma di segmento di corona circolare, adiacente all'edificio principale circolare e facente parte dell'impianto originale (salvo la recente sopraelevazione di una sua metà fatta in blocchi di calcestruzzo), sono anche presenti delle parti realizzate in tempi più recenti con un solo piano in cantonetti di granito e malta cementizia e di assai minor spessore (circa 25 cm).

Le restanti chiusure e partizioni, di cui si è trascurata la seppur solo eventuale funzione strutturale, sono realizzate in muratura di laterizio. Nell'edificio circolare originale, i solai sono realizzati per lo più

17. ROMANO, CREMONESI NIANG 2016.



Figura 1. Ex carcere “La Rotonda” di Tempio Pausania.

con volte in granito impostate sui maschi murari, mentre nell'avancorpo parallelepipedo i solai sono realizzati con putrelle in acciaio e voltine. La copertura è realizzata anch'essa con volte in lapideo il cui estradosso è sagomato con due falde per lo smaltimento delle acque meteoriche. Le due falde sono rivestite con coppi in laterizio.

Quanto alle caratteristiche meccaniche dei materiali e dei pannelli murari in granito costituenti l'edificio, non si hanno risultati di prove di laboratorio o in situ che le abbiano valutate. Riferendosi però alla Normativa italiana NTC 2018, Circolare 21/1/2019 n.7¹⁸, e classificata sulla base del rilievo la tipologia muraria come muratura in pietra a spacco con buona tessitura, dalla Tabella C8.5.1 si sono stimati i seguenti valori delle proprietà meccaniche della muratura, ovvero:

f	τ_0	E	w
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[kN/m ³]
2.6	0.056	1740	21

18. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (MIT). CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.

dove f è la resistenza media a compressione, τ_0 è la resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali con rottura per trazione diagonale in murature con tessitura irregolare, E è il valore medio del modulo di elasticità normale, w è il peso unitario della muratura. In assenza di dati sperimentali sulla resistenza delle murature dell'edificio de "La Rotunda", si è utilizzato un fattore di confidenza di 1,35, nonchè il valore di resistenza minore dell'intervallo di resistenze indicato dalla normativa¹⁹. Quest'ultima scelta ha evidenziato che, nonostante tale valore di resistenza sia ragionevolmente molto prudentiale, l'edificio è ben in grado di resistere alle forze orizzontali previste, evidentemente anche per il favorevole contributo della sua forma circolare. È chiaro, comunque, che trattandosi di muratura in granito, è ragionevole pensare che la resistenza della muratura sia maggiore, così come lo stesso modulo elastico, per il quale si è scelto il valore medio dell'intervallo suggerito dalla normativa²⁰, perché tale valore almeno si avvicina ai valori minimi riportati in letteratura²¹. Tra l'altro, riguardo alla resistenza e allo stesso modulo elastico, è da notare che nei materiali quasi-fragili quali i lapidei, i mattoni, le malte che concorrono alla resistenza della muratura sotto l'azione di azioni sismiche, si potrebbe anche tener conto dell'incremento di resistenza (DIF, Dynamic Increase Factor) che si manifesta con l'applicazione di carichi dinamici²².

Il modello numerico

Trattandosi di un grosso edificio complesso, la modellazione del carcere di Tempio è stata effettuata estendendo l'EFM alle strutture curve. A tal fine, si è costruito un modello a macroelementi utilizzando il software Tremuri, il quale utilizza il macroelemento inizialmente proposto da Gambarotta e Lagomarsino²³ per modellare i maschi e le fasce. Ricorrendo a un numero limitato di gradi di libertà, viene così descritto il comportamento nel piano della muratura, cogliendo i diversi meccanismi di collasso nel piano (pressoflessione e taglio) di maschi e fasce seppur modellati come elementi lineari.

Il funzionamento del macroelemento e il conseguente comportamento del telaio equivalente hanno mostrato buon accordo con le evidenze sperimentali in muri testati in laboratorio e soggetti a

19. *Ibidem*.

20. *Ibidem*.

21. TOMASZEWSKA, DROZDOWSKA, SZAFRAŃSKI 2020; ARÊDE, ALMEIDA, COSTA, COSTA 2019.

22. FENU, FORNI, CADONI 2016; KRUSZKA, MOĆKO, FENU, CADONI 2015.

23. GAMBAROTTA, LAGOMARSINO 1997.

forze sia verticali che orizzontali²⁴, nonché con l'osservazione dei danni post-sismici sul costruito²⁵ e su modelli testati su tavola vibrante²⁶.

Basandosi anche su queste evidenze sperimentali, la formulazione teorica di questo macroelemento prevede di suddividerlo in tre porzioni: quella centrale e le due di estremità ove sono indirizzate, rispettivamente, la risposta a taglio e quella a pressoflessione (Fig. 2). Per implementare le leggi costitutive del macroelemento, vengono definite otto variabili cinematiche $[u_i, w_i, \varphi_i, u_j, w_j, \varphi_j, \delta, \phi]$ correlate a otto variabili statiche $[n_i, t_i, m_i, n_j, t_j, m_j, \nu, \mu]$. Le forze esterne applicate al macroelemento sono il peso proprio e le forze tr e tl applicate alle connessioni fra i muri a taglio.

Le equazioni costitutive sono ottenute considerando da una parte una risposta unilaterale lineare e elastica alla pressoflessione considerata come concentrata nei due strati inferiore e superiore A e C, dall'altra l'accoppiamento fra danneggiamento e slittamento con attrito per taglio tipico delle murature considerato come concentrato nella parte B del pannello. Per i due strati di estremità A e C, le equazioni costitutive legano le variabili cinematiche w_i, φ_i (w_j, φ_j) con le corrispondenti variabili statiche n_i, m_i (n_j, m_j), mentre i contributi inelastici sono dovuti alla condizione di contatto elastico unilaterale. Si ottengono così relazioni lineari fino al limite per il quale la sezione diventa solo parzialmente compressa a causa del contatto unilaterale. La modellazione della risposta a taglio del macroelemento vien fatta considerando una distribuzione uniforme di deformazioni a taglio $\gamma = [(u_i + u_j)/h] + \varphi$ nella porzione centrale B del pannello. Le equazioni costitutive per taglio sono ottenute sommando il contributo lineare elastico al contributo non-lineare delle forze d'attrito che si oppongono allo slittamento delle facce delle fessure e mettendo in conto il danneggiamento dovuto all'incremento delle deformazioni tangenziali γ . Tale danneggiamento causa deterioramento della resistenza (*softening*) e diminuzione della rigidità. L'espressione del modello costitutivo complessivo del macroelemento è pertanto definita come $q = K\alpha + q^* + q^\circ$, dove q è il vettore delle variabili statiche, α è quello delle variabili cinematiche, K è la matrice elastica, q^* è il vettore che raggruppa il contributo inelastico, e q° è il vettore delle forze esterne.

Maschi e fasce, entrambi in muratura in pietra a spacco di granito realizzata con buona tessitura, sono collegati fra loro da nodi, di fatto indeformabili e quindi considerati rigidi, formando così i telai equivalenti che simulano il comportamento delle singole pareti. Nella letteratura scientifica

24. MARQUES, LOURENÇO 2011; PARISI 2010; MARQUES, LOURENÇO 2014.

25. PARISI 2010; BRAGA, DOLCE 1982; MARQUES, LOURENÇO 2014; BRAGA, DOLCE, LIBERATORE 1982; PENNA, CATTARI, GALASCO, LAGOMARSINO 2005.

26. TARQUE *et al.* 2013; GAVRILOVIC 1996.

sono riportate alcune metodologie per definire le dimensioni dei nodi dei macroelementi²⁷. Il modello tridimensionale scatolare è ottenuto collegando fra loro le singole pareti attraverso i nodi dei maschi laterali, ovvero dei pilastri laterali dei telai equivalenti rappresentanti le singole pareti bidimensionali²⁸. Infine, la modellazione delle volte a botte degli orizzontamenti dell'edificio circolare (copertura compresa) nonché dei solai di interpiano e di copertura rigidi o parzialmente rigidi delle parti di edificio non voltate è gestita ricorrendo a elementi membrana di opportuna rigidità²⁹. In particolare, le volte sono state considerate come orizzontamenti rigidi. Sia negli orizzontamenti di interpiano che in copertura, il guscio lapideo delle volte a botte è realizzato con blocchi sbozzati in granito; negli orizzontamenti di interpiano il pavimento si appoggia su un riempimento ottenuto con materiale lapideo di varia natura, mentre nel solaio di copertura l'apparecchio murario in blocchi sbozzati di granito prosegue in continuità, al di sopra della volta a botte di copertura in blocchi sbozzati in granito, per dar forma alle due falde sulle quali sono direttamente allettate le tegole in laterizio.

La modellazione dell'edificio "La Rotunda" ha interessato solo il corpo principale dell'edificio, costituito dal volume cilindrico e da quello prismatico di accesso in esso innestato, escludendo la chiesa, un tempo costruita in continuità con il resto dell'edificio, ma oggi strutturalmente separata da esso. Anche il muro di cinta, collegato solo marginalmente in pochi punti all'edificio, è escluso dalla modellazione perché non ha effetti sul comportamento dell'edificio.

Un aspetto fondamentale nella costruzione del modello è la discretizzazione che è stato necessario attuare per modellare le pareti portanti principali dell'edificio, di forma circolare, dal momento che il software non prevede al suo interno uno strumento che offra tale possibilità (fig. 2).

La soluzione adottata è analoga a quella utilizzata nello studio dei Tulou del Fujian (case-fortezza cinesi inserite nel patrimonio UNESCO) da Briseghella³⁰ e consiste nell'approssimare le pareti circolari attraverso una serie di pareti verticali consecutive, trasformando di fatto la pianta circolare in una pianta poligonale. Il numero di lati scelto, pari a 20, non è casuale ma dipende da una preliminare valutazione di compatibilità fra la rappresentazione dell'edificio a pianta circolare tramite una poligonale che ne approssimi la sua geometria con sufficiente precisione, e la sua necessaria schematizzazione che ne consenta la modellazione a telaio equivalente. In particolare, il numero di

27. RAITHEL, AUGENTI 1984; AUGENTI 2004; PARISI, AUGENTI 2013; BRAGA, DOLCE 1982; DOLCE 1989.

28. LAGOMARSINO, PENNA, GALASCO, CATTARI 2013.

29. *Ibidem*.

30. BRISEGHELLA *et al.* 2019b.



Figura 2. Schizzi del progetto originale del Carcere.

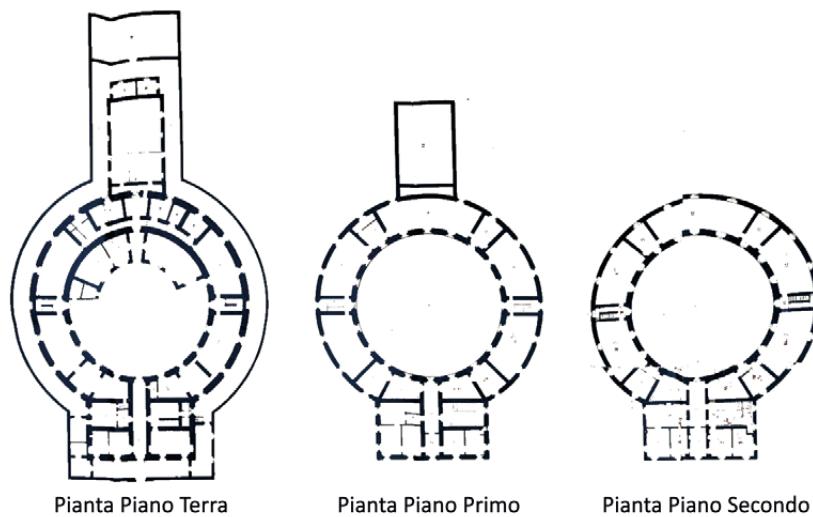


Figura 3. Pianta Penitenziario di Tempio, 1877. Ufficio del Genio Civile di Sassari.

lati scelto è tale che in ogni lato sia presente almeno un'apertura in modo da avere un singolo telaio equivalente per lato. In figura 3 è riportata una rappresentazione della mesh elaborata dal software in cui sono chiaramente riconoscibili maschi, fasce e nodi rigidi.

Il modello del carcere, considerato come sistema strutturale a molti gradi di libertà (MDOF), è stato implementato nel codice Tremuri e sottoposto a analisi statica non lineare (*pushover*) in controllo di spostamento effettuata su un sistema equivalente (oscillatore bilineare) con un solo grado di libertà (SDOF) attraverso opportuna definizione della matrice di rigidità³¹, assegnando le forze orizzontali proporzionali alle masse e monitorando gli spostamenti del nodo di controllo scelto in modo appropriato.

L'analisi della risposta strutturale

Implementato nel codice Tremuri, il sistema strutturale (figg. 4a-b) a più gradi di libertà del carcere "La Rotunda" è stato opportunamente ridotto a un sistema equivalente a un grado di libertà e sottoposto a analisi statica non lineare (*pushover*). Scelto appropriatamente il nodo di controllo rappresentativo dell'unico grado di libertà, ne vengono monitorati gli spostamenti sotto un assegnato sistema di forze rappresentativo dell'azione sismica.

In condizioni ideali, il nodo di controllo dovrebbe corrispondere al centro di massa. Tuttavia, nel caso del carcere "La Rotunda", il centro di massa si troverebbe al centro del suo cortile interno, ma considerando che in esso non ci sono elementi strutturali, nessun nodo di controllo è disponibile per eseguire l'analisi. Sono state pertanto eseguite alcune indagini preliminari che hanno permesso di comprendere la sensibilità del modello alla scelta del nodo di controllo. I risultati di questa analisi hanno dimostrato che se il nodo di controllo viene scelto in una delle pareti perpendicolari rispetto all'azione sismica, gli spostamenti vengono amplificati dalle deformazioni fuori-dal-piano e pertanto i risultati risultano imprecisi. Un risultato attendibile si ottiene invece scegliendo il nodo di controllo in una delle pareti orientata secondo direzione parallela all'azione sismica. Le analisi sono state condotte assegnando forze orizzontali proporzionali alle masse.

All'ex-carcere "La Rotunda" non è stata al momento assegnata la nuova destinazione d'uso. In questo studio si è supposta la classe d'uso II. La curva di capacità ottenuta dall'analisi statica non lineare è stata confrontata con la domanda di spostamento, consentendo così di valutare la sicurezza del carcere

31. LAGOMARSINO, PENNA, GALASCO, CATTARI 2013; LIU, ZORDAN, ZHANG, BRISGHELLA 2015; ALBANESI, NUTI, VANZI 2000.



Figure 4a-b. Immagini di paramenti murari in conci di granito.

soggetto all'azione sismica orizzontale, seppur ridotta, della Sardegna. La domanda di spostamento è stata ottenuta dallo spettro ADRS nello Stato Limite di Salvaguardia della Vita, considerato come Stato Limite Ultimo, e corrispondente a un periodo di ritorno di 475 anni. Lo spettro in termini di accelerazione è stato disegnato secondo le regole dell'Eurocodice 8 e quindi assumendo il valore di accelerazione $a_g = 0.5 \text{ m/s}^2$ proprio dell'intera isola cui associare $F_0 = 2.88$ e $T_c^* = 0.34$. Non appare motivo di considerare alcuna amplificazione topografica mentre, in assenza di dati sperimentali di indagini geofisiche, in questo studio sono stati trascurati gli effetti relativi a una eventuale amplificazione stratigrafica.

Le figure 4 e 5 mostrano i risultati ottenuti dall'analisi pushover applicata all'edificio del carcere "La Rotunda" secondo le due direzioni X e Y indicate in figura, ovvero parallelamente e ortogonalmente alla parte di edificio parallelepipedica contigua a quella circolare.

La capacità di spostamento (indicata con linea tratteggiata nelle figg. 4 e 5) è raggiunta quando si ha una capacità portante inferiore del 20% a quella massima raggiunta. Nelle curve di capacità ottenute tale caduta non è riscontrabile direttamente sulle curve stesse perché quando la capacità di spostamento è raggiunta si ha anche un calo repentino di portanza dovuto alla rottura per taglio di alcuni elementi. La domanda di spostamento (riportata con tratto puntinato nelle figg. 4 e 5) è ottenuta dal confronto fra le curve di capacità e gli spettri ADRS.

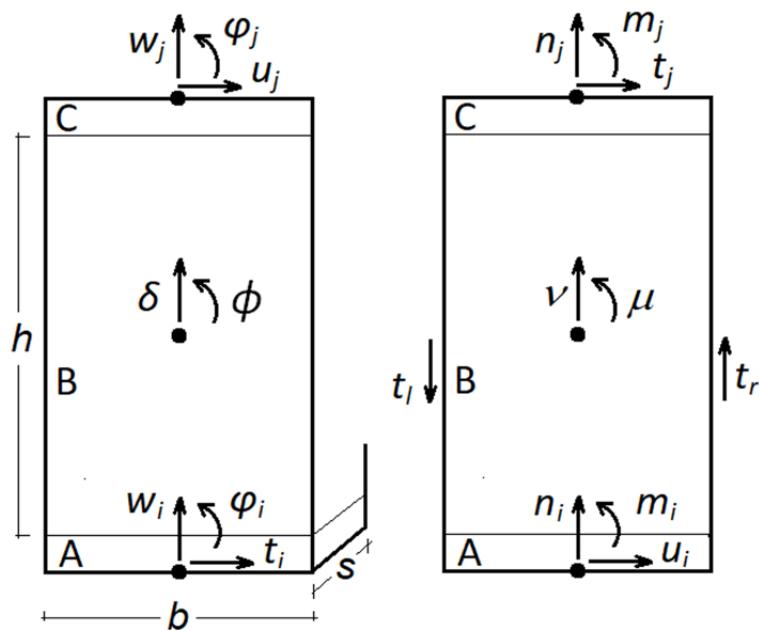


Figura 5. Macroelemento: variabili statiche e cinematiche.

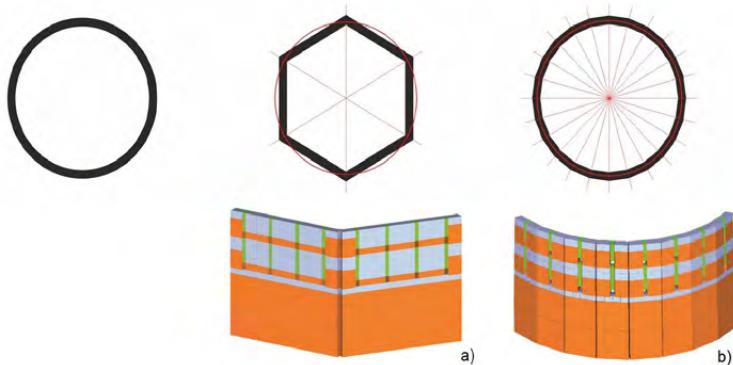


Figura 6. Modellazione della struttura circolare con differenti livelli di discretizzazione (numero di lati variabile).

In tutti i casi analizzati, la domanda di spostamento per l'azione sismica considerata è sempre vicina a 1.10 cm, mentre la capacità di spostamento media è di 4.42 cm in direzione X e di 2.70 cm in direzione Y. Emerge quindi che la capacità di spostamento della struttura è molto maggiore della domanda di spostamento richiesta dalla bassa azione sismica prevedibile in Sardegna. Si può notare inoltre come nella direzione X (parallela al lato maggiore del corpo parallelepipedo) l'edificio ha complessivamente una risposta più duttile che nella direzione Y, in cui l'azione sismica sollecita fuori-dal-piano il lato maggiore del corpo parallelepipedo.

Le analisi sismiche nei due opposti orientamenti nella direzione X mostrano che le due relative curve di capacità hanno sostanzialmente lo stesso andamento nei due versi, con un pronunciato campo di comportamento non lineare in cui viene sviluppata la duttilità dell'edificio. Durante questa fase si assiste alla graduale plasticizzazione per taglio nel piano e solo in minor misura per pressoflessione alla base dei maschi murari soggetti longitudinalmente all'azione sismica. Il danneggiamento per taglio coinvolge dapprima i muri del corpo parallelepipedo paralleli alla direzione X estendendosi poi a quelli adiacenti del corpo principale cilindrico (compresi quelli in comune fra i due corpi) fino a una contemporanea rottura per taglio sia dei muri in direzione X del corpo parallelepipedo che di quelli adiacenti del corpo cilindrico. Alla progressiva plasticizzazione a taglio di più maschi murari corrisponde la pronunciata estensione del tratto duttile della curva di capacità. Nel verso $-X$, il maggior numero di rotture a pressoflessione, soprattutto di fasce, causa le lievi parziali perdite di portanza che si riscontrano nella relativa curva di capacità. In entrambi i versi, la contemporanea rottura per taglio alla base di numerosi maschi è causa del subitaneo crollo della capacità portante con relativo raggiungimento della capacità di spostamento della struttura. È interessante notare l'influenza che il corpo parallelepipedo ha sul comportamento di quello cilindrico. Il primo trasmette infatti l'azione orizzontale al secondo chiamando a resistere diversi dei maschi adiacenti del corpo cilindrico e dunque orientati in direzione prossima a quella dell'asse X. Dalla parte opposta del corpo cilindrico, invece, sono in numero minore i maschi plasticizzati e infine rotti orientati nella medesima direzione e chiamati a resistere a taglio nel piano.

Anche le analisi sismiche nella direzione Y mostrano un andamento perlopiù simile nei due versi, caratterizzato anch'esso da un tratto di comportamento non lineare, ma meno esteso che nel caso della direzione X. In questo caso la duttilità e la capacità di spostamento sono inferiori perché il sisma investe il corpo parallelepipedo con meno maschi chiamati a resistere nel piano rispetto a quelli chiamati a resistere fuori dal piano.

- MASCHI
- FASCE
- NODI RIGIDI

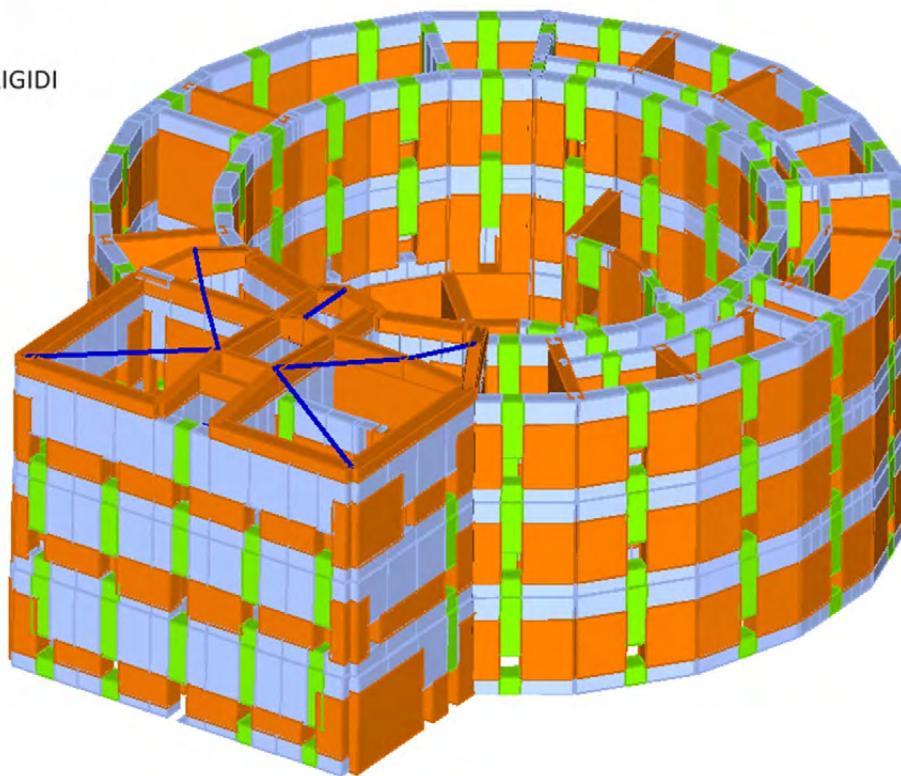


Figura 7. Schematizzazione del modello a telaio equivalente della struttura del carcere.

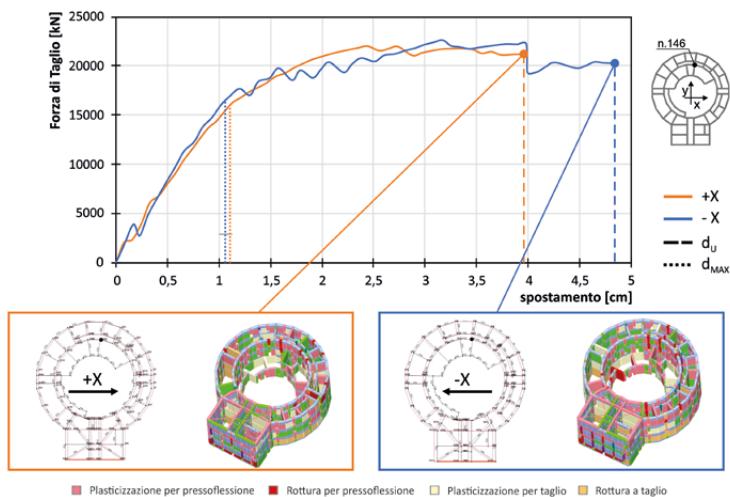


Figura 8. Analisi statica non-lineare nelle direzioni $\pm X$.

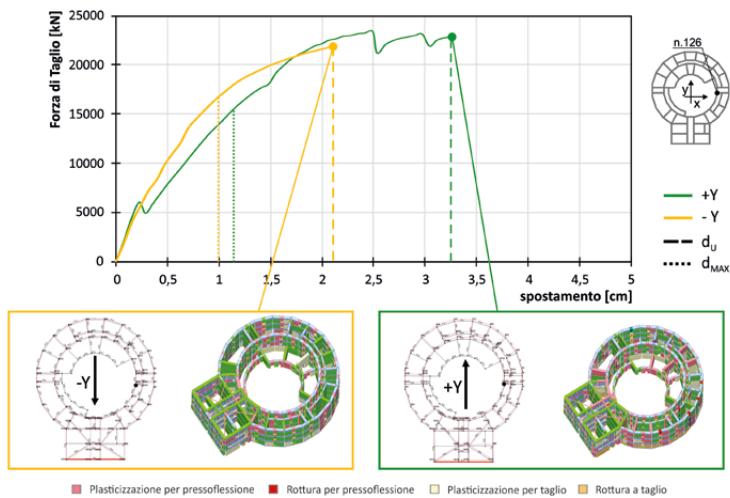


Figura 9. Analisi statica non-lineare nelle direzioni $\pm Y$.

Anche in questo caso la capacità di spostamento finale è raggiunta quando il progredire del danneggiamento prevalentemente per taglio alla base dapprima dei maschi murari paralleli all'asse Y del corpo parallelepipedo, e poi di quelli del corpo cilindrico tangenti alla stessa direzione, porta infine al danneggiamento anche dei maschi murari compresi fra essi, fino alla loro contemporanea rottura per taglio con conseguente immediata perdita di capacità portante.

È da notare l'influenza del corpo parallelepipedo nel differenziare la capacità di spostamento nei due orientamenti +Y e -Y. Infatti, nel verso +Y l'azione sismica investe dapprima il corpo parallelepipedo e poi quello cilindrico, mentre nel verso -Y accade il contrario, ovvero l'azione sismica investe dapprima il corpo cilindrico e poi quello parallelepipedo. Questo fa sì che nel verso -Y, la deformazione del corpo cilindrico (che per forma meglio resiste alle azioni orizzontali di quello parallelepipedo specie se con i maschi prevalentemente sollecitati fuori dal piano) si trasmette poi al corpo parallelepipedo plasticizzandone subito a taglio i pochi maschi orientati parallelamente all'asse Y per poi provocare una anticipata rottura rispetto agli stessi maschi ma sollecitati nel verso +Y.

Appare quindi evidente che l'asimmetria dovuta al grande corpo parallelepipedo di ingresso gioca un ruolo importante nel diverso comportamento della struttura del carcere nelle direzioni + X / -X rispetto a +Y / -Y. Nel suo insieme l'edificio parrebbe, infatti, acquisire beneficio in termini di duttilità dal fatto che nella direzione +X/-X le murature principali dell'edificio parallelepipedo sono sollecitate "nel piano", e "fuori piano" nella direzione ortogonale.

Conclusioni

In questo articolo si mostra come l'analisi a macroelementi col metodo del telaio equivalente possa essere un utile strumento per analizzare edifici complessi in muratura di forma cilindrica o, più in generale, a sezione curva, presentando un esempio composto da una sezione circolare unita a una rettangolare, quale è l'ottocentesco carcere "La Rotunda" di Tempio Pausania.

Si tratta della prima applicazione di questo metodo a edifici in muratura tradizionale di questa geometria costruiti secondo la tradizione occidentale. Una precedente applicazione, eseguita dagli stessi autori, riguardava infatti i "Tulou cinesi", edifici a pianta circolare in terra cruda e legno.

I risultati hanno mostrato che il metodo è ben in grado di analizzare la complessiva risposta all'azione sismica di un edificio circolare complesso quale è il carcere "La Rotunda", evidenziando alcune peculiarità del suo comportamento. In particolare, è di interesse notare come il corpo parallelepipedo di entrata, aderente al corpo circolare, influenza fortemente la risposta complessiva

dell'edificio. Nella direzione X, parallela al lato lungo del corpo parallelepipedo, l'edificio nel suo complesso mostra infatti una maggiore capacità di spostamento, rispetto a quella in direzione Y. Ciò sembra imputabile in gran parte al fatto che i maschi interni del corpo parallelepipedo, paralleli a Y, hanno sviluppo complessivamente inferiore rispetto a quelli longitudinali in direzione X. Interessante notare come la modellazione globale dell'edificio consente di valutare la reciproca interazione fra le due parti cilindrica e parallelepipeda dell'edificio. Nella direzione Y la maggior duttilità della parte di edificio a pianta circolare ammette deformazioni che non sono invece consentite dalla minore duttilità della parte parallelepipeda, con conseguente differente capacità di spostamento dell'edificio nei due versi della direzione Y.

Dal punto di vista strutturale l'edificio è attualmente in buone condizioni, senza quadri fessurativi indice di significativo danneggiamento della struttura che ne infici il comportamento strutturale, e non mostra quindi segni di necessità di interventi di consolidamento. Nei sottotetti sono però visibili numerose tracce di umidità, il che mostra che è necessario intervenire quanto prima sull'impermeabilizzazione dell'edificio affinché l'azione erosiva dell'acqua non porti a dissesti di carattere anche strutturale, come sembra stia in limitata parte avvenendo, seppur in fase iniziale, a livello del cornicione sommitale. L'edificio non mostra invece segni di danneggiamento dovuto ai carichi verticali e alle azioni orizzontali, per le quali ultime la ricerca in oggetto mostra come esso sia ben in grado di resistere con adeguato livello di sicurezza.

Questa modalità di analisi di edifici circolari in muratura è in fase di approfondimento e la futura evoluzione della ricerca è volta alla sua validazione con analisi non-lineari a elementi finiti di edifici circolari semplici.

Bibliografia

- ARÊDE, ALMEIDA, COSTA, COSTA 2019 - A. ARÊDE, C. ALMEIDA, C. COSTA, A. COSTA, *In-situ and lab tests for mechanical characterization of stone masonry historical structures*, in «Construction and Building Materials», 2019, 220, pp. 503-515.
- AUGENTI 2004 - N. AUGENTI, *Il calcolo sismico degli edifici in muratura*, UTET, Torino 2004.
- BRAGA, DOLCE 1982 - F. BRAGA, M. DOLCE, *A method for the analysis of antiseismic masonry multi-storey buildings*, in AA.VV., *Sixth International Brick Masonry Conference*, Atti del Congresso Internazionale, Roma 16-19 maggio 1982, Andil, Roma 1982, pp. 1089-1099.
- BRAGA, DOLCE, LIBERATORE 1982 - F. BRAGA, M. DOLCE, D. LIBERATORE, *A statistical study on damaged buildings and an ensuing review of the MSK-76 scale*, in AA.VV., *7th European Conference on Earthquake Engineering*, Proceedings of the International Conference, Athens 20th-25th September 1982, pp. 431-50.
- BRISEGHELLA *et al.* 2019a - B. BRISEGHELLA, V. COLASANTI, L. FENU, C. NUTI, E. SPACONE, H. VARUM, *Nonlinear Static Analysis by Finite Elements of a Fujian Hakka Tulou*, in *IABSE Symposium 2019 Guimarães. Toward a Resilient Built Environ - Risk Asset Management*, Guimarães 2019, pp. 1140-1147.
- BRISEGHELLA *et al.* 2019b - B. BRISEGHELLA, V. COLASANTI, L. FENU, C. NUTI, E. SPACONE, H. VARUM, *Seismic Analysis by Macroelements of Fujian Hakka Tulous, Chinese Circular Earth Constructions Listed in the UNESCO World Heritage List*, in «International Journal of Architectural Heritage», 2019, 14, pp. 1-16.
- BRISEGHELLA *et al.* 2017 - B. BRISEGHELLA, V. COLASANTI, L. FENU, C. NUTI, E. SPACONE, H. VARUM, *Seismic analysis by macroelements of circular earth constructions: the Fujian Tulou*, in *The 5th International Workshop on "Dynamic Interaction of Soil and Structure (DISS_17)*, Roma 2017.
- DOLCE 1989 - M. DOLCE, *Schematizzazione e modellazione per azioni nel piano delle Pareti*, Corso sul consolidamento degli edifici in muratura in zona sismica, Ordine degli Ingegneri della Provincia di Potenza, Potenza 1989.
- FENU, FORNI, CADONI 2016 - L. FENU, D. FORNI, E. CADONI, *Dynamic behaviour of cement mortars reinforced with glass and basalt fibres*, in «Composites Part B: Engineering», 2016, 92, pp. 142-150.
- FUSIER, VIGNOLI 1993 - F. FUSIER, A. VIGNOLI, *Proposta di un metodo di calcolo per edifici in muratura sottoposti ad azioni orizzontali*, in «Ingegneria Sismica 1993», X (1993), 1, pp. 10-24.
- GALASCO, LAGOMARSINO, PENNA, RESEMINI 2004 - A. GALASCO, S. LAGOMARSINO, A. PENNA, S. RESEMINI, *Non-linear seismic analysis of masonry structures*, in *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6, 2004, Vancouver 2004.
- GALVANETTO, ALIABADI 2009 - U. GALVANETTO, M.H. FERRI ALIABADI (eds), *Multiscale Model in Solid Mechanics: Computational Approaches*, Imperial College Press, London 2009.
- GAMBAROTTA, LAGOMARSINO 1997 - L. GAMBAROTTA, S. LAGOMARSINO, *Damage models for the seismic response of brick masonry shear walls. Part I: the mortar joint model and its applications*, in «Earthquake Engineering & Structural Dynamic», 26 (1997), 4, pp. 423-439.
- KRUSZKA, MOČKO, FENU, CADONI 2015 - L. KRUSZKA, W. MOČKO, L. FENU, E. CADONI, *Comparative experimental study of dynamic compressive strength of mortar with glass and basalt fibres*, in *EPJ Web of Conferences*, 2015, 94, 05008; <https://www.epj-conferences.org/> (ultimo accesso 15 febbraio 2023).
- LAGOMARSINO, PENNA, GALASCO, CATTARI 2013 - S. LAGOMARSINO, A. PENNA, A. GALASCO, S. CATTARI, *TREMURI program: An equivalent frame model for the nonlinear seismic analysis of masonry buildings*, in «Engineering Structures», 2013, 56, pp. 1787-1799.

- LEE, FENVES 1998 - J. LEE, G.L. FENVES, *Plastic-Damage Model for Cyclic Loading of Concrete Structures*, in «Journal of Engineering Mechanics», 124, 1998, 8, pp. 892-899.
- LEμος 2007 - J.V. LEMOS, *Discrete Element Modeling of Masonry Structures*, in «International Journal of Architectural Heritage», 2007, 1, pp. 190-213.
- LOURENÇO, ROTS, BLAAUWENDRAAD 1998 - P.B. LOURENÇO, J.G. ROTS, J. BLAAUWENDRAAD, *Continuum Model for Masonry: Parameter Estimation and Validation*, in «Journal of Structural Engineering», 124, 1998, 6, pp. 642-652.
- LOURENÇO 2009 - P.B. LOURENÇO, *Recent advances in masonry modelling: micromodelling and homogenisation*, in GALVANETTO, ALIABADI 2009, pp. 251-254.
- LUBLINER, MARQUES, LOURENÇO 2011 - J. LUBLINER, R. MARQUES, P.B. LOURENÇO, *Possibilities and comparison of structural component models for the seismic assessment of modern unreinforced masonry buildings*, in «Computers & Structures», 89, 2011, 21, pp. 2079-2091.
- MAGENES, DELLA FONTANA, 1998 - G. MAGENES, A. DELLA, FONTANA, *Simplified non-linear seismic analysis of masonry buildings*, in AA.VV., *Masonry*, Proceedings of the Fifth International Masonry Conference, London 13th-15th October 1998, Vol. 8, British Masonry Society, London 1998, pp. 190-195.
- MAGENES 2000 - G. MAGENES, *A method for pushover analysis in seismic assessment of masonry buildings*, in *Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering*, Auckland 2000, pp. 1-8.
- MARQUES, LOURENÇO 2014 - R. MARQUES, P.B. LOURENÇO, *Unreinforced and confined masonry buildings in seismic regions: Validation of macro-element models and cost analysis*, in «Engineering Structures», 2014, 64, pp. 52-67.
- MODÉER 1979 - M. MODÉER, *A fracture mechanics approach to failure analysis of concrete materials*, Lund University of Technology, Sweden 1979.
- LUBLINER *et al.* 1989 - J. LUBLINER, J. OLIVER, S. OLLER, E. OÑATE, *A plastic-damage model for concrete*, in «International Journal of Solids and Structures», 25, 1989, 3, pp. 299-326.
- PARISI 2010 - F. PARISI, *Non-Linear Seismic Analysis of Masonry Buildings*, PhD Thesis, Tutor: Prof. Nicola Augenti, Programme in Seismic Risk - Coordinator Prof. Aldo Zollo, XIII Cycle, Department of Structural Engineering, Università of Naples Federico II, 2010.
- PARISI, AUGENTI 2013 - F. PARISI, N. AUGENTI, *Seismic capacity of irregular unreinforced masonry walls with openings*, in «Earthquake Engineering & Structural Dynamics», 2013, 42, pp. 101-121.
- PENNA, CATTARI, GALASCO, LAGOMARSINO 2005 - A. PENNA, S. CATTARI, A. GALASCO, S. LAGOMARSINO, *Seismic assessment of masonry structures by non-linear macro-element analysis*, in C. MODENA, P.B. LOURENÇO, P. ROCA (eds), *Structural Analysis of Historical Constructions. Possibilities of Numerical Experimental Techniques*, Proceedings of the IVth International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, Padova 10-13 November 2004, Vol. 2, CRC Press, London 2005, pp. 1157-1164.
- RAITHEL, AUGENTI 1984 - A. RAITHEL, N. AUGENTI, *La verifica dei pannelli murari*, in AA.VV., *La città difficile*, Atti del II Congresso Nazionale ASS.I.R.C.CO, Ferrara 1984.
- TARQUE *et al.* 2013 - N. TARQUE, G. CAMATA, E. SPACONE, H. VARUM, M. BLONDET, *Nonlinear Dynamic Analysis of a Full-Scale Unreinforced Adobe Model*, in «Earthquake Spectra», (2013), 30, pp. 1643-1661.
- TOMASZEWSKA, DROZDOWSKA, SZAFRAŃSKI 2020 - A. TOMASZEWSKA, M. DROZDOWSKA, M. SZAFRAŃSKI, *Material parameters identification of historic lighthouse based on operational modal analysis*, in «Materials», 13, 2020, 17.