



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

FLORE

Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

Analisi sismica di edifici storici in muratura mediante modelli globalmente non lineari

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

Original Citation:

Analisi sismica di edifici storici in muratura mediante modelli globalmente non lineari / Sorace, S; Terenzi, G. - STAMPA. - 1:(2011), pp. 302-313. (Intervento presentato al convegno WONDERmasonry 2011 tenutosi a Firenze nel 10-11 novembre 2011).

Availability:

This version is available at: 2158/879338 since: 2015-11-29T21:04:48Z

Publisher:

-Firenze : Il Sedicesimo : Firenze University Press, 2006 -Polistampa SNC:Di Mauro Pagliai & Co, Via

Terms of use:

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

Publisher copyright claim:

(Article begins on next page)

ANALISI SISMICA DI EDIFICI STORICI IN MURATURA MEDIANTE MODELLI GLOBALMENTE NON LINEARI

Stefano Sorace^a, Gloria Terenzi^b

^aDipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Udine, Udine

^bDipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Università degli Studi di Firenze, Firenze

ABSTRACT

Nell'articolo è presentata un'analisi sismica di due edifici storici in muratura, i cui modelli sono interamente costituiti da elementi a fratturazione diffusa. Il primo caso di studio consiste nell'ipotesi di ricostruzione del nucleo centrale del Castello di Prampero (Magnano in Riviera, Udine), ridotto a rudere dal terremoto del Friuli del 1976, mentre il secondo è rappresentato dalla Villa Orgnani-Deciani di Fagagna, in provincia di Udine. Per entrambi è condotta un'analisi di prestazione basata sull'applicazione di una procedura proposta dagli autori in precedenti lavori, nella quale sono tra gli altri considerati due Stati limite, di Prima fessurazione e di Danno artistico, appositamente formulati per la valutazione della risposta di edifici di valore storico-artistico. Per il Castello di Prampero, non essendo conseguito l'obiettivo base di "corrispondenza diagonale" tra livelli dell'azione in ingresso e livelli di prestazione nell'ipotesi di ricostruzione mediante tecniche tradizionali, viene quindi studiata una soluzione alternativa consistente nell'impiego di un sistema d'isolamento alla base, da cui deriva invece il raggiungimento della massima prestazione attingibile. Per quanto riguarda Villa Orgnani-Deciani, emergono a sua volta capacità di prestazione inferiori alla "corrispondenza diagonale" per tutte le pareti. Partendo da tale dato, viene proposta una semplice soluzione di miglioramento sismico, basata sulla realizzazione di un più efficace ammorsamento dei solai di piano alle pareti stesse. Come mostrato dalle risposte numeriche, tale limitato intervento è in grado di evitare l'innescò di prematuri meccanismi di danno e di collasso delle pareti fuori piano, consentendo un complessivo innalzamento delle capacità di prestazione dell'edificio.

A seismic analysis of two historical buildings, whose models are entirely constituted by smeared cracking elements, is presented. The first case study is a rebuilding hypothesis of the central wing of Prampero Castle (Magnano in Riviera, Udine), destroyed by the Friuli Earthquake in 1976, whereas the second case study is represented by Villa Orgnani-Deciani of Fagagna, in the province of Udine. A seismic performance analysis is carried out for both buildings by an assessment procedure previously proposed by the authors, where two special limit states, named "First cracking" and "Artistic damage", are introduced. The basic objective of "diagonal correlation" between seismic input levels and performance levels is not reached for Prampero Castle. An alternative rebuilding hypothesis is then formulated, based on the incorporation of a base isolation system, which allows reaching the maximum attainable performance. A "diagonal correlation" is not achieved for Villa Orgnani-Deciani too. Therefore, a simple seismic retrofit solution is proposed, which consists in an improved connection of the existing wooden floors to the walls. The results of the analysis highlight that this minimal intervention is capable of preventing premature out-of-plane damage and collapse mechanisms of the walls, which allows improving the global performance of the structure.

PAROLE CHIAVE: Analisi sismica, edifici storici, elementi finiti a fratturazione diffusa, adeguamento sismico, isolamento alla base, miglioramento sismico.

1. INTRODUZIONE

Il recupero ed il miglioramento sismico di edifici di rilevanza storico-artistica rappresentano un problema particolarmente sentito in Paesi come il nostro, in cui tali manufatti costituiscono una

significativa porzione dell'intero patrimonio edilizio. Testimonianza attuale e dolorosa della vulnerabilità sismica del costruito in muratura è costituita da ciò che non è stato ancora riparato e ricostruito a seguito di terremoti non solo recenti, come quello dell'Aquila, ma anche ormai datati, quali ad esempio gli eventi del Belice (1968), del Friuli (1976) e dell'Irpinia (1980). Un caso di studio selezionato all'interno di tale contesto è rappresentato dal Castello di Prampero, situato nel Comune di Magnano in Riviera, in provincia di Udine, del quale è stata solo ultimamente ricostruita una prima porzione (detta Torre Nord), mentre per la zona centrale sono attesi ancora adeguati finanziamenti per avviarne la riedificazione. Ai fini di tale eventualità, nel presente articolo viene ripresa una soluzione progettuale già proposta dagli autori in precedenti lavori (Sorace & Terenzi, 2007a; 2007b; 2008), che prevede la destinazione di alcuni ambienti interni ad aree espositive e museali. La presenza, al piano terra, di statue di pregio appartenenti alla proprietà, ha altresì condotto ad una soluzione d'isolamento alla base del relativo impalcato, in modo da innalzare significativamente il livello di protezione sismica di tali elementi. Gli studi condotti sull'insieme dell'edificio, documentati nelle suddette memorie, sono stati basati sull'impiego di modelli agli elementi finiti con comportamento lineare, generati mediante il programma di calcolo SAP2000NL (Computers & Structures Inc., 2011). In questo articolo, i risultati delle precedenti elaborazioni sono posti a confronto con quelli derivanti da una nuova serie di analisi condotte utilizzando un modello globalmente non lineare, caratterizzato da elementi finiti a fratturazione diffusa, messo a punto mediante il codice ANSYS (Swanson Analysis System Inc., 2010). Il metodo di analisi adottato è di tipo dinamico incrementale, ossia per integrazione al passo di storie di accelerazione in ingresso, le cui ampiezze vengono progressivamente accresciute sino al raggiungimento del collasso numerico. L'analisi della prestazione sismica è condotta applicando una procedura proposta dagli autori in precedenti fasi degli studi concernenti la modellazione delle strutture in muratura (Sorace & Terenzi, 2002), nella quale sono definiti due Stati limite, di Prima fessurazione e di Danno artistico, appositamente formulati per la valutazione della risposta di edifici a carattere storico ed artistico, in aggiunta ai classici di Salvaguardia della vita umana e di Collasso (NTC 2008). Un secondo caso di studio viene affrontato nella seconda parte dell'articolo, costituito da Villa Orgnani-Deciani di Villalta di Fagagna, sempre in provincia di Udine, edificio ottocentesco con struttura muraria regolare in pietra locale. Rispetto alla prospettiva di ricostruzione ex-novo, esaminata nel caso del Castello di Prampero, l'analisi di questa ulteriore costruzione consente di ampliare il campo d'indagine all'accertamento delle prestazioni dell'esistente, ed al possibile intervento su di esso. Per Villa Orgnani-Deciani lo studio è condotto direttamente nel solo campo non lineare, tramite lo stesso tipo di modellazione a fratturazione diffusa ed operando mediante la procedura dinamica incrementale sopra descritti. L'esito delle elaborazioni numeriche pone in evidenza come per la Villa Orgnani-Deciani allo stato attuale, analogamente a quanto verificato anche per il Castello di Prampero nell'originaria ipotesi di ricostruzione mediante tecniche tradizionali (a parte il singolo impalcato della zona espositiva delle statue), si abbiano capacità di risposta inferiori alla "corrispondenza diagonale" tra livelli dell'azione sismica e livelli di prestazione, per tutte le pareti. Per il primo caso di studio viene quindi sviluppata un'ipotesi alternativa di ricostruzione, caratterizzata dall'introduzione di un sistema d'isolamento alla base realizzato mediante dissipatori pendolari ad attrito. Tale soluzione porta a raggiungere il massimo obiettivo di prestazione (conseguimento dei requisiti relativi al livello di Prima Fessurazione per il massimo livello dell'azione in ingresso). Riguardo al secondo edificio, viene invece proposta una semplice ipotesi di miglioramento sismico, consistente nell'esecuzione di un più efficace ammassamento dei solai lignei alle pareti, al fine di avvicinare il comportamento allo schema limite di "scatolarità". L'analisi di tale configurazione pone in evidenza come un così semplice intervento riesca a prevenire prematuri meccanismi di risposta delle pareti fuori dal piano, consentendo un complessivo innalzamento delle ampiezze dell'azione in ingresso per le quali vengono conseguiti i diversi stati limite di prestazione.

2. PRIMO CASO DI STUDIO: IL CASTELLO DI PRAMPERO

2.1. Cenni agli studi precedentemente condotti

In Fig. 1 sono mostrate due immagini fotografiche riproducenti il castello di Prampero prima del terremoto del 1976 (Fig. 1a) e dopo lo stesso evento (Fig. 1b). L'ipotesi di ricostruzione del corpo

centrale, pressoché totalmente distrutto, ha previsto la conservazione dello schema strutturale originario sfruttando, per i paramenti murari, gli stessi blocchi in pietra costituenti le pareti demolite. In Fig. 2 sono mostrati un “rendering” rappresentativo del corpo centrale nella configurazione pre-terremoto ed una sezione del fabbricato riprogettato. È inoltre indicata la parete presente nella struttura originaria (Fig. 2a) ed eliminata nell’ipotesi di ricostruzione, in corrispondenza dei primi due piani, in modo da favorirne la fruizione a spazio espositivo (Fig. 2b). Tale scelta architettonica ha reso necessaria la rotazione dell’orditura dei travetti lignei degli impalcati sovrastanti che hanno in tal caso assunto luci fino ad 8 metri. E’ stata pertanto prevista la realizzazione di solai composti legno-calcestruzzo, conformi allo schema indicato in Fig. 3 (Sorace & Terenzi 2008). Come accennato nell’Introduzione, al fine di garantire il massimo livello di protezione alle statue esposte, è stata altresì studiata una soluzione d’isolamento del relativo impalcato, mediante un sistema misto di isolatori HDRB ed appoggi in acciaio-PTFE (Sorace & Terenzi 2007a; 2007b; 2008). In tal modo, la risposta delle statue risulta equivalente a quella di masse rigide solidali all’impalcato mobile, riducendone le accelerazioni di risposta sino all’85% rispetto all’ipotesi d’impalcato fisso alla base.

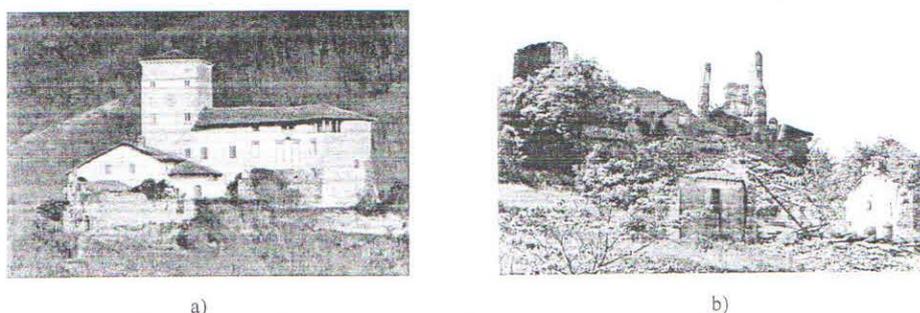


Figura 1. Immagini fotografiche del Castello di Prampero prima (a) e dopo (b) il terremoto del 1976

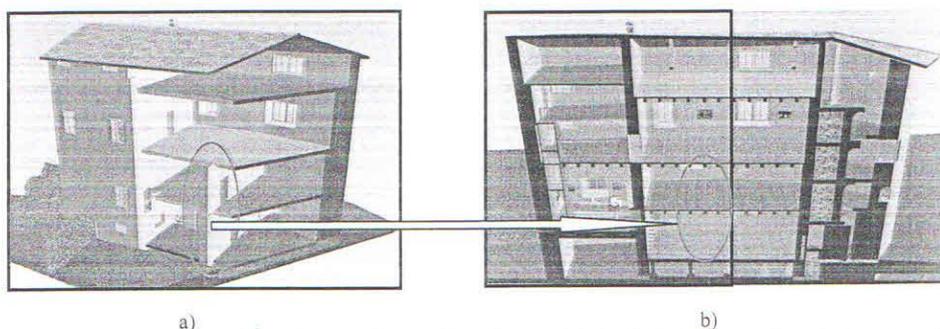


Figura 2. Rendering riproducenti l’originaria distribuzione interna dell’edificio (a) e quella relativa all’ipotesi di progetto (b), con indicazione della posizione della parete eliminata

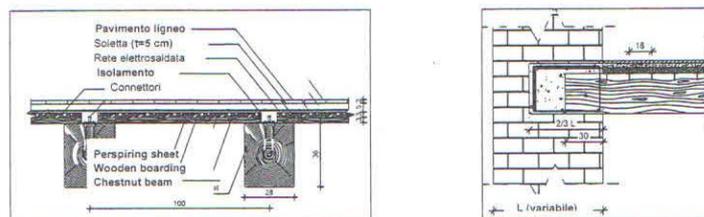


Figura 3. Dettaglio progettuale dei solai e del relativo ancoraggio ai cordoli inseriti nella muratura

2.2. Stati limite di riferimento per la valutazione della prestazione sismica

Il metodo applicato per la valutazione delle capacità di prestazione delle pareti murarie è quello proposto in Sorace & Terenzi (2002), che prevede l'inclusione di uno Stato Limite di Prima Fessurazione (SL1F) ed uno Stato Limite di Danno Artistico (SLDA), oltre ai due più classici stati limite di Salvaguardia della Vita Umana (SLV) e di Collasso (SLC). La procedura si basa classicamente sul confronto tra i valori di predeterminati parametri di risposta ai diversi livelli dell'azione sismica in ingresso con corrispondenti valori stabiliti come accettabili per i quattro stati di riferimento. Nella prima formulazione del metodo, gli stati SL1F e SLDA prevedevano il controllo degli spostamenti relativi fra nodi significativi del modello che, normalizzati rispetto alla mutua distanza, dovevano risultare inferiori allo 0,5‰ (SL1F), ed all'1‰ (SLDA), rispettivamente. Nel caso in cui l'analisi fosse condotta ricorrendo a programmi di tipo lineare, i requisiti associati agli SLV ed SLC venivano correlati allo stato tensionale. Ove il codice di calcolo prescelto per lo svolgimento dell'analisi fosse non lineare, i controlli dovevano essere effettuati in termini di stato fessurativo (SLV) e di collasso numerico (SLC). Una volta verificato il soddisfacimento o meno della corrispondenza diagonale fra i livelli dell'azione in ingresso e gli stati limite di riferimento, la procedura prevede la valutazione finale delle necessità d'intervento (Sorace & Terenzi, 2002; Lampariello *et al.*, 2004).

Nel presente lavoro i limiti precedentemente prestabiliti sono stati ricalibrati in maniera più cautelativa. Per lo SL1F ed analisi lineari, il controllo avviene sullo stato di trazione, verificando per quale intensità dell'azione sismica in ingresso in uno o più punti delle pareti venga raggiunto il valore limite di resistenza $f_{t,lim}$; nel caso invece in cui i modelli siano non lineari, la valutazione dei requisiti di prestazione viene condotta direttamente sulla base del quadro fessurativo. Per lo SLDA, lo spostamento relativo di piano non deve essere superiore allo 0,5‰ (tale limite viene considerato valido anche per analisi con modelli non lineari). Lo SLV si individua attraverso un danneggiamento che prefiguri un possibile cinematismo per analisi sia lineari che non lineari. Lo SLC viene infine individuato allorquando, detta L la lunghezza della porzione di parete in stato di trazione, la zona soggetta alle massime tensioni abbia un'estensione circa di $3/4L$. Quest'ultima limitazione viene controllata direttamente sulla base del quadro fessurativo anche per analisi di tipo non lineare. In Fig. 4 sono riepilogati i limiti di riferimento precedentemente indicati, assunti nel seguito per lo svolgimento dell'analisi di prestazione.

2.3. Livelli dell'azione sismica e svolgimento dell'analisi non lineare

L'indagine di verifica in campo non lineare dell'edificio riprogettato, è stata condotta utilizzando un modello agli elementi finiti con proprietà di fratturazione diffusa ed applicando un procedimento di tipo dinamico-incrementale, mediante accrescimento dell'accelerazione di picco in ingresso, a partire da 0,02g, con passo di 0,02g. Conformemente alle disposizioni delle nuove Norme Tecniche per le costruzioni (NTC 2008), i quattro livelli dell'azione in ingresso da assumere nell'analisi, denominati nel seguito con i simboli LA11, LA12, LA13 e LA14, corrispondono a probabilità di superamento, nel periodo di riferimento V_R , pari all'81%, al 63%, al 10% ed al 5%, rispettivamente. I valori delle accelerazioni massime attribuite al Comune di Magnano in Riviera, per coefficiente d'uso $C_u=1,5$ e categoria di sottosuolo C, risultano i seguenti: 0,128g (LA11), 0,167g (LA12), 0,382g (LA13) e 0,45g (LA14). Le analisi sono state condotte mediante una famiglia di sette accelerogrammi generati a partire dagli spettri di risposta relativi ai quattro suddetti livelli dell'azione. Le risposte sono state elaborate in termini medi sull'insieme dei sette segnali. Il modello computazionale dell'edificio, generato mediante il codice ANSYS, è costituito da elementi isoparametrici ad otto nodi denominati *SOLID65*, cui è assegnato un comportamento tipo "concrete", con associato un dominio di rottura alla Willam-Warnke (1975) ed un criterio di plasticizzazione alla Drucker-Prager (Drucker et al. 1952). I parametri caratteristici del primo sono i seguenti: ρ =densità di massa; E =modulo di Young; ν =coefficiente di Poisson; σ_t =tensione limite di resistenza a trazione; σ_c =tensione limite di resistenza a compressione; c =coefficiente di coesione; ϕ =angolo di attrito interno; β_t =coefficiente di trasmissione del taglio in condizione di fessura aperta; β_c =coefficiente di trasmissione del taglio in condizione di fessura chiusa. In Tab. 1 sono riepilogati i valori attribuiti a tali parametri nel caso considerato.

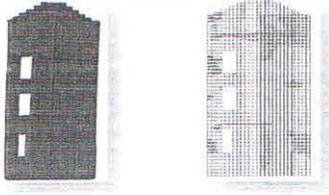
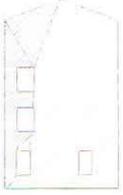
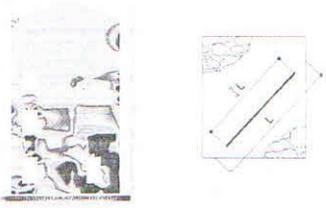
	Analisi lineare	Analisi non lineare
SLIF	 <p>$f_t = f_{t,lim}$</p>	 <p>Valutazione del quadro fessurativo</p>
SLDA	 <p>$\Delta/H = 0,5\text{‰}$</p>	 <p>$\Delta/H = 0,5\text{‰}$</p>
SLV	 <p>Individuazione di un possibile meccanismo</p>	 <p>Individuazione di un possibile meccanismo</p>
SLC	 <p>Estensione della zona di massima trazione</p>	 <p>Collasso numerico</p>

Figura 4. Parametri di riferimento relativi ai quattro stati limite considerati nell'analisi, per l'individuazione delle capacità di prestazione delle pareti

Tabella 1. Parametri caratterizzanti la muratura nel modello di tipo "concrete"

ρ (kg/mm^3)	E (MPa)	ν	c (MPa)	ϕ ($^\circ$)	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	β_t	β_c
2200	2500	0,3	0,24	38	0,2	6	0,15	0,75

L'indagine dinamica incrementale condotta ha posto in evidenza il raggiungimento dello stato di prima fessurazione per accelerazioni di picco mediamente pari a 0,08g, confermando il risultato già ottenuto in tal senso dall'analisi lineare sviluppata nei precedenti studi. Per i restanti stati di riferimento si osserva invece una certa riduzione delle massime intensità per le quali si intercettano le condizioni limite prefissate, nel passare dal modello lineare a quello integralmente fratturante. In particolare, i valori rilevati risultano i seguenti: 0,2g – SLDA, 0,22g – SLV, 0,24g – SLC,

dall'analisi non lineare; 0,25g – SLDA, 0,28g – SLV, 0,32g – SLC, da quella lineare. A titolo di esempio degli esiti delle elaborazioni condotte, in Fig. 5 è mostrata la storia di spostamento relativo tra i punti di controllo T2 e T0 riportati sullo schema della parete di facciata principale, ottenuta dall'applicazione dell'accelerogramma più severo scalato all'ampiezza LAI2. In Fig. 6 è altresì mostrato il quadro fessurativo rilevato per la parete di testata anteriore, per l'intensità LAI4.

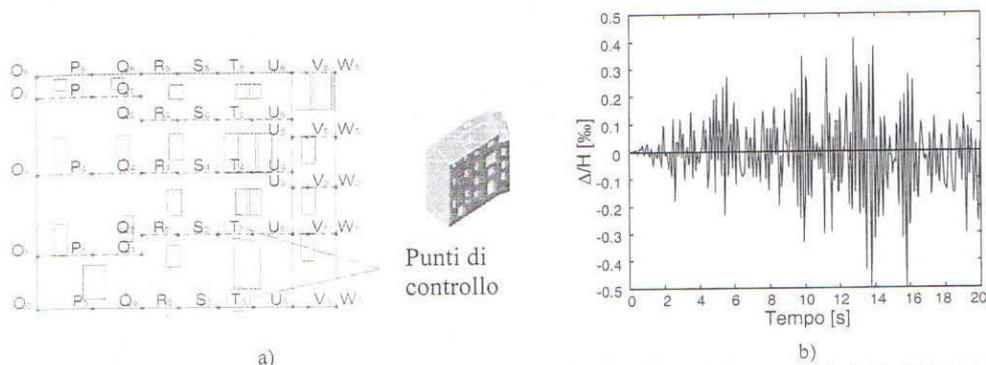


Figura 5. Spostamento relativo normalizzato tra i punti di controllo T0 e T2 (a) della parete principale di facciata, per il più severo accelerogramma scalato all'ampiezza LAI2

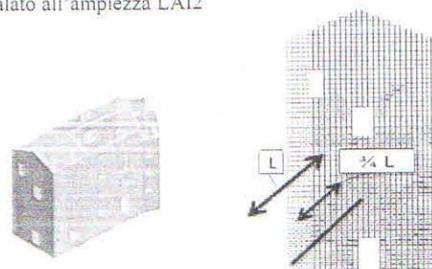


Figura 6. Quadro fessurativo della parete di testata anteriore per l'ampiezza LAI4 dell'azione

2.4. Analisi formale di prestazione ed ipotesi di ricostruzione con isolamento alla base

L'analisi formale della prestazione sismica offerta dalle pareti dell'edificio, progettato secondo procedimenti tradizionali di realizzazione di una buona muratura con pareti solidamente ammortate ed un comportamento scatolare efficace, non riesce tuttavia a soddisfare per tutte le pareti l'obiettivo di corrispondenza diagonale fra livelli dell'azione e stati limite di riferimento. Ciò è mostrato nelle tabelle-matrici riportate in Fig. 7, dalle quali emerge che, anche nei migliori casi (pareti di facciata), si hanno al massimo due correlazioni sulla diagonale principale. Per la parete di testata anteriore e per quella trasversale interna adiacente non risulta conseguita alcuna correlazione diagonale. Ne deriva pertanto una prestazione ridotta rispetto all'obiettivo-base "ottimale", come generalmente avviene anche per strutture murarie di ottima fattura, concepite similmente a questo caso di progetto simulato di ricostruzione. Partendo da tali dati, è stata formulata un'ipotesi alternativa con isolamento alla base dell'intero edificio e non solo del singolo impalcato della zona espositiva. Gli isolatori prescelti, schematizzati in Fig. 8a, sono di tipo pendolare a semplice curvatura con raggio di curvatura pari a 2,238 m e coefficiente di attrito $\mu=0,06$. La disposizione in pianta dei 28 dispositivi adottati è illustrata in Fig. 8b. I risultati dell'analisi dinamica incrementale mostrano come per lo SL1F vi sia convergenza fra le risposte dei modelli elastico e non lineare; ad esempio, per le due pareti longitudinali la prima fessurazione viene raggiunta per un'azione in ingresso teoricamente di ampiezza pari a 0,5g. Per gli stati limite superiori, il raggiungimento delle condizioni limite avviene per valori decisamente più elevati, e dunque virtuali, dell'azione sismica. In base a tali esiti l'analisi formale della risposta indica come l'isolamento consenta di raggiungere i massimi obiettivi di prestazione per tutte le pareti (Fig. 9).

	SL1F	SLDA	SLV	SLC		SL1F	SLDA	SLV	SLC
LAI1	SI				LAI1	SI			
LAI2		SI			LAI2		SI		
LAI3			NO		LAI3			NO	
LAI4				NO	LAI4				NO

	SL1F	SLDA	SLV	SLC		SL1F	SLDA	SLV	SLC
LAI1	NO				LAI1	NO			
LAI2		NO			LAI2		NO		
LAI3			NO		LAI3			SI	
LAI4				NO	LAI4				SI

	SL1F	SLDA	SLV	SLC		SL1F	SLDA	SLV	SLC
LAI1	NO				LAI1	NO			
LAI2		NO			LAI2		NO		
LAI3			SI		LAI3			NO	
LAI4				SI	LAI4				NO

Figura 7. Analisi formale di prestazione delle singole pareti dell'edificio

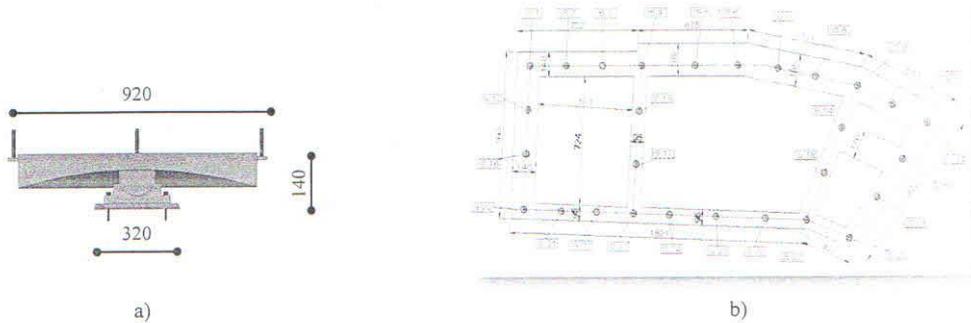


Figura 8. Sezione geometrica dell'isolatore-tipo assunto per il sistema d'isolamento alla base (a) e disposizione in pianta dei 28 dispositivi (b)

3. SECONDO CASO DI STUDIO: VILLA ORGNANI-DECIANI

Villa Orgnani-Deciani di Villalta di Fagagna (UD) è una villa ottocentesca, attualmente di proprietà dell'Ente Friuli nel Mondo, con struttura muraria regolare in pietra locale e pareti di spessore circa pari a 50 cm (Fig. 10). Ai fini della generazione del modello non lineare mediante il codice ANSYS, è stato considerato solamente il corpo centrale dell'edificio, escludendo i piccoli annessi che accolgono le scuderie, ad esso semplicemente addossati in epoche successive. Anche per questo secondo caso di studio la muratura è stata modellata mediante elementi "concrete", con caratteristiche definite in Tab. 2. I valori ivi riportati sono quelli che, in base ad un'estesa indagine di sensibilità agli stessi parametri, hanno fornito il risultato numerico più stabile. In Fig. 11 è mostrata una vista assonometrica del modello, arrecante la numerazione delle pareti costituenti. I solai di piano sono stati schematizzati come masse eccitate e tramite vincoli di rigidità per le pareti alle differenti quote. Le analisi dinamiche-incrementali sono state ancora condotte utilizzando una famiglia di sette accelerogrammi, con ampiezze massime crescenti da 0,02g e passo di 0,02g.

	SL1F	SLDA	SLV	SLC		SL1F	SLDA	SLV	SLC
LAI1	SI				LAI1	SI			
LAI2		SI			LAI2		SI		
LAI3			SI		LAI3			SI	
LAI4	SI	SI	SI	SI	LAI4	SI	SI	SI	SI
	SL1F	SLDA	SLV	SLC		SL1F	SLDA	SLV	SLC
LAI1	SI				LAI1	SI			
LAI2		SI			LAI2		SI		
LAI3			SI		LAI3			SI	
LAI4	SI	SI	SI	SI	LAI4	SI	SI	SI	SI
	SL1F	SLDA	SLV	SLC		SL1F	SLDA	SLV	SLC
LAI1	SI				LAI1	SI			
LAI2		SI			LAI2		SI		
LAI3			SI		LAI3			SI	
LAI4	SI	SI	SI	SI	LAI4	SI	SI	SI	SI

Figura 9. Analisi formale di prestazione delle singole pareti dell'edificio nell'ipotesi alternativa di ricostruzione mediante un sistema d'isolamento alla base



a)



b)

Figura 10. Vista fotografica del prospetto anteriore di Villa Orgnani-Deciani (a) e di una delle sale interne (b)

Tabella 2. Parametri caratterizzanti la muratura nel modello non lineare

ρ (kg/mm ³)	E (MPa)	ν	c (MPa)	ϕ (°)	σ_t (MPa)	σ_c (MPa)	β_t	β_c
2200	2500	0,3	0,24	38	0,25	6	0,3	0,75

Le ampiezze limiti per i quattro livelli dell'azione in ingresso sono le seguenti: 0,074g – LAI1, 0,096g – LAI2, 0,257g – LAI3 e 0,341g – LAI4. In Tab. 3 sono riepilogati i valori medi delle accelerazioni massime agenti, per i quali si registra il raggiungimento dei differenti stati di riferimento sulle singole pareti dell'edificio. Da tali dati emerge come lo SL1F venga conseguito per risposta nel piano delle pareti 1, 3, 5a e 5b a 0,06g, mentre i successivi stati limite sono raggiunti per risposta delle pareti 1 e 3 fuori dal piano. Ponendo a confronto gli stessi esiti con i livelli d'intensità dell'azione LAI1-LAI4, si osserva altresì il soddisfacimento della condizione di corrispondenza diagonale solo per lo SLDA (Tab. 4). In base a questi risultati, è stato concepito un intervento di miglioramento sismico consistente nella semplice realizzazione di un più efficace ammortamento dei solai alle pareti, al fine di ritardare i meccanismi di fuori piano ed ottenere una più uniforme distribuzione degli stati tensionali all'interno dei paramenti murari. Ciò è confermato dalla nuova analisi sviluppata in condizioni modificate, che pone in luce un generale miglioramento di prestazione (Tab. 5), anche se i requisiti minimi risultano ancora non soddisfatti per le pareti longitudinali 1, 3, 5a e 5b (Tab. 6).

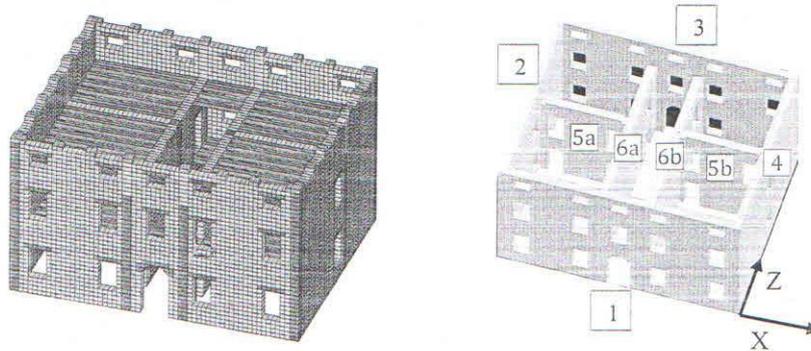


Figura 11. Modello di calcolo generato mediante il codice ANSYS

Tabella 3. Prestazione media di tutte le pareti allo stato attuale

PARETI	SL1F		SLDA		SLV		SLC	
1 Esterna N	X-0,06g nel piano	Z-0,16g fuori piano	X-0,2g nel piano	Z-0,16g fuori piano	X-0,2g nel piano	Z-0,18g fuori piano	X-0,22g nel piano	Z-0,24g fuori piano
2 Esterna E	X-0,14g fuori piano	Z-0,12g nel piano	X-0,18g fuori piano	Z-0,22g nel piano	X-0,20g fuori piano	Z-0,2g nel piano	/ fuori piano	/ nel piano
3 Esterna S	X-0,06g nel piano	Z-0,12g fuori piano	X-0,2g nel piano	Z-0,16g fuori piano	X-0,2g nel piano	Z-0,18g fuori piano	X-0,22g nel piano	Z-0,2g fuori piano
4 Esterna W	X-0,14g fuori piano	Z-0,12g nel piano	X-0,18g fuori piano	Z-0,22g nel piano	X-0,20g fuori piano	Z-0,2g nel piano	/ fuori piano	/ nel piano
5a,b Interne X	X-0,06g nel piano	Z-0,22g fuori piano	X-0,18g nel piano	/ fuori piano	X-0,2g nel piano	/ fuori piano	/ nel piano	/ fuori piano
6a,b Interne Z	X-0,14g fuori piano	Z-0,1g nel piano	X-0,18g fuori piano	Z-0,18g nel piano	X-0,20g fuori piano	Z-0,2g fuori piano	/ fuori piano	/ nel piano

Tabella 4. Analisi formale di prestazione dell'edificio allo stato attuale

Tutte le pareti	SL1F	SLDA	SLV	SLC
LAI1	NO			
LAI2		SI		
LAI3			NO	
LAI4				NO

Tabella 5. Prestazione media di tutte le pareti nello stato d'intervento

PARETI	SL1F		SLDA		SLV		SLC	
1	X-0,06g	Z-0,18g	X-0,21g	Z-0,32g	X-0,22g	Z-0,34g	X-0,24g	Z-0,36g
Esterna N	nel piano	fuori piano						
2	X-0,14g	Z-0,14g	X-0,22g	Z-0,32g	/	Z-0,34g	/	Z-0,36g
Esterna E	fuori piano	nel piano						
3	X-0,06g	Z-0,18g	X-0,21g	Z-0,32g	X-0,22g	Z-0,34g	X-0,24g	Z-0,36g
Esterna S	nel piano	fuori piano						
4	X-0,14g	Z-0,14g	X-0,22g	Z-0,32g	/	Z-0,34g	/	Z-0,36g
Esterna W	fuori piano	nel piano						
5a,b	X-0,06g	Z-0,24g	X-0,21g	/	X-0,22g	/	X-0,26g	/
Interne X	nel piano	fuori piano						
6a,b	X-0,14g	Z-0,14g	X-0,21g	Z-0,34g	/	Z-0,36g	/	Z-0,38g
Interne Z	fuori piano	nel piano	fuori piano	nel piano	fuori piano	fuori piano	fuori piano	nel piano

Tabella 6. Analisi formale di prestazione dell'edificio nello stato d'intervento

Pareti 1,3,5a,5b	SL1F	SLDA	SLV	SLC	Pareti 2,4,6a,6b	SL1F	SLDA	SLV	SLC
LAI1	NO					SI			
LAI2		SI					SI		
LAI3			NO					SI	
LAI4				NO					SI

A titolo d'esempio dei risultati dell'analisi, in Fig. 12 viene mostrata l'evoluzione del quadro fessurativo conseguente alla progressiva amplificazione dell'azione in ingresso per la parete 1 (identica a quella della parete "speculare" 3), allo stato attuale e nella configurazione d'intervento. Si osserva come, nel secondo caso, lo stato limite SLDA sia raggiunto per gli effetti deformativi nel piano e non più fuori di esso. In Fig. 13 sono riprodotti i grafici di sintesi dell'analisi incrementale, tracciati riportando gli spostamenti massimi del baricentro della copertura, mediati sulla risposta ai sette segnali utilizzati, in funzione delle accelerazioni in ingresso, per lo stato di fatto e quello d'intervento. Da tali grafici emerge una sostanziale coincidenza dei risultati per intensità sismiche inferiori a 0,1g, motivata da una risposta complessivamente elastica del modello, solo lievemente fessurato per entrambe le configurazioni sino a quest'ampiezza dell'azione. Per i successivi valori di accelerazione si registrano abbattimenti dello spostamento anche superiori al 40% nella soluzione d'intervento rispetto allo stato attuale dell'edificio, unitamente ad una traslazione del collasso numerico da 0,21g a 0,24 g.

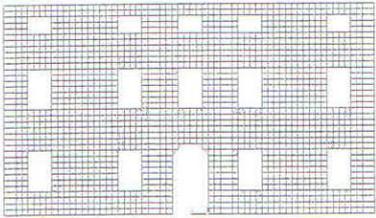
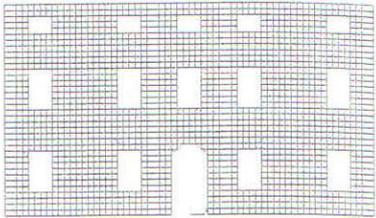
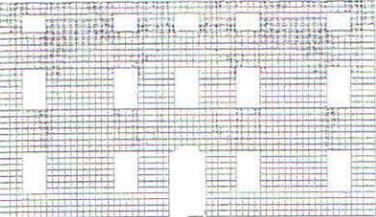
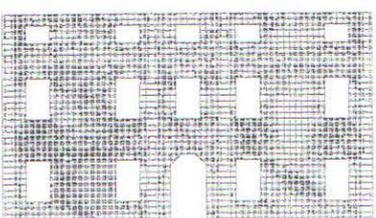
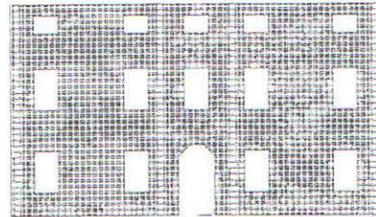
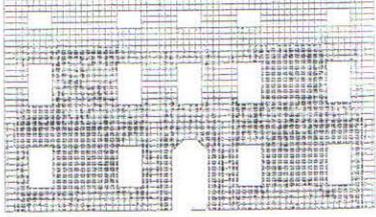
Stato di fatto	Stato Limite	Stato d'intervento
 <p data-bbox="379 568 568 595">X (nel piano) - 0.06g</p>	SL1F	 <p data-bbox="979 568 1168 595">X (nel piano) - 0.06g</p>
 <p data-bbox="379 833 568 860">X (nel piano) - 0.2g</p>  <p data-bbox="379 1093 568 1120">Z (fuori piano) - 0.18g</p>		SLDA
 <p data-bbox="379 1352 568 1379">X (nel piano) - 0.2g</p>	SLV	
 <p data-bbox="379 1617 568 1644">X (nel piano) - 0.22g</p>	SLC	 <p data-bbox="979 1617 1168 1644">X (nel piano) - 0.24g</p>

Figura 12. Evoluzione del quadro fessurativo della parete 1 negli stati attuale e d'intervento

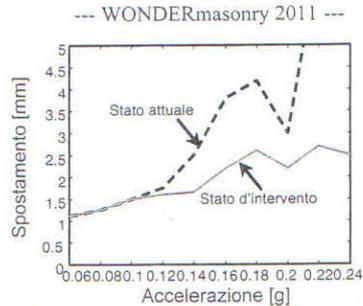


Figura 13. Curva di sintesi dell'analisi dinamica incrementale negli stati attuale e d'intervento

4. CONCLUSIONI

I modelli globalmente fratturanti sviluppati in questa nuova fase degli studi dedicati all'analisi sismica di edifici storici in muratura hanno consentito, per entrambi i casi esaminati, di seguire accuratamente l'evoluzione del quadro fessurativo con acquisizione di chiare indicazioni riguardo alle prestazioni esplicabili dalle strutture fino al raggiungimento della condizione di collasso numerico. Nel caso del Castello di Prampero, il confronto con gli esiti di una precedente indagine condotta mediante un modello lineare ha portato ad una più restrittiva valutazione delle specifiche capacità possedute, pur a fronte di una buona corrispondenza di massima tra i risultati ottenuti. Il passaggio ad un'ipotesi di ricostruzione includente un sistema d'isolamento alla base mostra il superamento dei limiti di prestazione emersi per la soluzione di ricostruzione di tipo tradizionale (e tipici di ogni struttura muraria, pur se di ottima fattura). Per quanto concerne la Villa Orgnani-Deciani, appare d'interesse la capacità del modello non lineare nel cogliere il seppur moderato innalzamento del livello di risposta causato dall'intervento simulato di miglioramento sismico "di minimo". La considerevole riduzione degli oneri e dei tempi di elaborazione richiesti dall'analisi per integrazione al passo condotta con modelli globalmente fratturanti sembra ormai renderne ragionevolmente estendibile l'applicazione all'accertamento della risposta degli edifici in muratura anche nell'ambito della comune pratica professionale.

BIBLIOGRAFIA

- Lampariello A., Sorace S., Spinelli P., Terenzi G. (2004). "Analisi della prestazione sismica di edifici storici allo stato attuale ed in presenza di isolamento alla base", *Atti dell'11° Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, Genova, 24-29 gennaio 2004, Servizi Grafici Editoriali, Padova, 2004, Articolo J1-01, 12 pp., CD-ROM.
- Swanson Analysis System, Inc. (2010). *ANSYS, Engineering Analysis System – Theory/users' manual*. Release 10.0, Canonsburg, PA.
- Computers & Structures, Inc. (2011). *SAP2000NL. Structural Analysis Programs - Theoretical and Users Manual*, Version No. 14.03, CSI, Berkeley, CA.
- Drucker D.C., Prager W., Greenberg H.J. (1952). "Extended limit design theorems for continuous media", *Quart. Appl. Mathem.*, Vol. 9, p. 381.
- NTC 2008, *Norme tecniche per le costruzioni*, di cui al D.M.LL.PP del 14.01.2008.
- Sorace S., Terenzi G. (2002). "Seismic evaluation and retrofit of historical churches", *Structural Engineering International, IABSE*, Zurich, Vol. 12, N. 4/2002, November 2002, pp. 241-246.
- Sorace S., Terenzi G. (2007a). "Rebuilding of an ancient castle including a base-isolated museum hall", *Proc., International Conference STREMAH 2007*, Prague, Czech Republic, WIT Press, Southampton, July 2007, pp. 419-428.
- Sorace S., Terenzi G. (2007b). "Traditional and innovative technologies in the rebuilding of a medieval castle", *Proc., WONDERMasonry 2007*, Ischia, Ottobre 2007, pp. 367-375.
- Sorace S., Terenzi G. (2008). "Redesign of a historical masonry stronghold incorporating a base isolated floor", *14th International Brick & Block Masonry Conference*, 17-20 February 2008, Sydney, Australia, paper 148, CD-ROM
- Willam K., Wamke E. (1975). "Constitutive model for the triaxial behavior of concrete", *International Association for Bridge and Structural Engineering*, Vol. 19. ISMES, Bergamo, Italy, p. 174.