



Proposal of an expeditious procedure for the seismic vulnerability analysis of masonry structures

Sonia Boschi^a, Andrea Borghini^a, Alberto Ciavattone^a, Andrea Vignoli^a, Carlo Vienni^b, Federico Vigni^b

^a Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Via di Santa Marta 3, 50139 Firenze

^b Ingegnere civile libero professionista

Keywords: Italian churches fragility; cultural heritage; earthquake damage; post earthquake investigation

ABSTRACT

The assessment of the structural vulnerability for existing buildings in Italy is a key aspect for the seismic risk reduction, for strategic and relevant buildings in particular, because of their importance for the civil protection. Different approaches can be used: expeditious/empirical methods, based on qualitative evaluations, analytical methods, based on detailed models, or hybrid methods, based instead on simplified numerical models. In case of a wide sample of buildings, the use of empirical methods is necessary in order to obtain a first screening of the buildings and to delineate a vulnerability ranking, which can be used as a priority list for further detailed analyses. In this work, the comparison among an empirical approach (Vulnerability Index Method, G.N.D.T., 1993) and a detailed approach (pushover analysis performed with the "Frame by Macro-element" approach) on a sample of 32 masonry structures is carried out. The critical analysis of the results has allowed the upgrade of an empirical assessment procedure recently proposed by the Authors, able to estimate the peak ground acceleration of capacity of masonry structures, using the information required by the II Level Vulnerability Form.



Proposta di una procedura speditiva per la stima della vulnerabilità sismica di strutture in muratura

Sonia Boschi^a, Andrea Borghini^a, Alberto Ciavattone^a, Andrea Vignoli^a, Carlo Vienni^b, Federico Vigni^b

^a Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Via di Santa Marta 3, 50139 Firenze

^b Ingegnere civile libero professionista

Keywords: vulnerabilità sismica, schede GNDT di II livello, strutture in muratura, PGA di collasso, correlazione

ABSTRACT

La valutazione della vulnerabilità sismica a larga scala per edifici esistenti è un aspetto fondamentale nell'ottica della riduzione del rischio sismico, in particolare per edifici strategici e/o rilevanti, a causa della loro importanza per la protezione civile. Differenti metodologie possono essere adottate per la valutazione di essa: metodi empirici/speditivi, basati su valutazioni qualitative ed applicabili ad un cospicuo campione di studi, metodi analitici, basati su analisi numeriche, o ibridi, che utilizzano metodi analitici semplificati. Per campioni di edifici consistenti, l'uso di metodi speditivi risulta necessario per definire un primo screening del costruito ed una graduatoria di vulnerabilità, da utilizzare come lista di priorità per indirizzare verso quali edifici eseguire successive analisi dettagliate.

Nel presente lavoro vengono riportati i risultati del confronto dell'applicazione di un metodo speditivo (metodo dell'Indice di Vulnerabilità) e uno dettagliato (analisi sismiche di dettaglio) su un campione consistente di strutture in muratura collocate nel territorio toscano.

L'analisi critica di quanto ottenuto ha permesso di elaborare una correlazione tra i risultati dei due metodi, che consente una stima della capacità strutturale degli edifici (in termini di peak ground acceleration di capacità - PGAc) utilizzando le sole informazioni richieste dal metodo speditivo.

1 INTRODUZIONE

Il territorio italiano è caratterizzato da un'intensa attività sismica. La maggior parte del patrimonio edilizio esistente risulta molto vulnerabile poiché ricco di edifici storici, spesso carenti di presidi antisismici; è dunque evidente che sia soggetto ad un elevato rischio sismico.

Dal punto di vista scientifico, come noto, il rischio sismico viene definito come funzione di tre fattori: la vulnerabilità sismica del costruito, dipendente dalle caratteristiche intrinseche delle strutture, la pericolosità del sito di costruzione, funzione della ubicazione della costruzione, e l'esposizione, ovvero la quantificazione del *bene* esposto al rischio (in termini di utilizzatori, funzioni e beni contenuti all'interno delle strutture, etc...).

In questo contesto risulta evidente l'importanza della valutazione della vulnerabilità sismica a larga scala del costruito, per effettuare un primo screening degli edifici e in modo da

allocare le risorse verso quelli maggiormente critici per la definizione di analisi di dettaglio ed eventualmente la progettazione di interventi di miglioramento o adeguamento sismico.

In questo lavoro l'attenzione sarà focalizzata sulla vulnerabilità sismica; in particolare verranno analizzati un numero consistente di edifici specialistici in muratura presenti sul territorio toscano, tramite metodi speditivi/empirici e metodi analitici.

Sulla base di quanto emerso attraverso le analisi effettuate, verrà proposta una correlazione fra i risultati ottenuti dall'applicazione dei due diversi tipi di approcci utilizzati. Tale correlazione permette, sfruttando i soli dati utili alla compilazione delle schede GNDT di II livello per la determinazione dell'indice di vulnerabilità (Metodo dell'Indice di Vulnerabilità - G.N.D.T. 1993), di stimare l'accelerazione sismica di capacità della struttura relativa al comportamento globale di essa (PGAc).

Il Gruppo di Ricerca del Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale (UNIFI) lavora in

questo ambito da diversi anni: già a partire dagli anni 2008-2011 è stata definita una procedura standardizzata per la valutazione della vulnerabilità sismica attraverso l'utilizzo di metodi di analisi speditivi (Del Monte et al. 2008); tale è stata applicata per l'analisi di vulnerabilità di alcuni edifici ospedalieri siti nei Comuni di Firenze, Prato e Pistoia (Ciavattone et al. 2013). Successivamente, su 20 unità strutturali ospedaliere contenute nel campione analizzato, è stata ricercata una possibile correlazione tra i risultati dei metodi dettagliati, rappresentati da analisi statiche non lineari, e quelli del metodo speditivo dell'Indice di Vulnerabilità (Ciavattone et al. 2016, Boschi et al. 2017). La conclusione del lavoro ha consentito di proporre un nuovo metodo speditivo per la valutazione della vulnerabilità che, basandosi sulle informazioni qualitative richieste dal metodo semplificato originale, permette la stima della PGA_C riferita al comportamento globale di una data struttura.

Il presente studio si configura come prosecuzione del lavoro di ricerca, con il duplice obiettivo di incrementare il numero degli edifici indagati alla base della correlazione (da 20 a 32 edifici), al fine di assicurare una maggior affidabilità dei risultati, e di aggiornare i risultati delle analisi numeriche ai contenuti delle normative tecniche per le costruzioni attualmente in vigore (NTC 2018).

2 METODI DI VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ SISMICA

Lo studio della vulnerabilità sismica è stato argomento di ricerca fin dai primi anni '70, e può essere affrontato secondo tre diversi approcci (D'Ayala e Novelli 2010):

- metodi analitici, che consentono uno studio dettagliato della vulnerabilità utilizzando diversi tipi di modelli e di analisi per valutare il comportamento strutturale di un edificio;
- metodi speditivi, basati su osservazioni qualitative, particolarmente utili quando si deve analizzare un consistente numero di edifici per i quali le analisi di dettaglio risulterebbero molto onerose;
- metodi ibridi, che rappresentano una combinazione dei primi due.

2.1 Metodi speditivi

I primi studi nell'ambito dei metodi speditivi risalgono agli anni '70; uno dei metodi sviluppati in quel periodo è il "Damage Probability Matrix

Method" (Whitman et al. 1973), che si basa sull'utilizzo di matrici di probabilità di danno, implementate dall'osservazione dei danni prodotti su oltre 1600 edifici dal terremoto di San Fernando del 1971 (California, $M_w=6.5$). Un simile approccio è stato adottato per la definizione della scala macrosismica europea EMS-98, European Macroseismic Scale (Grünthal 1998), che propone una classificazione della vulnerabilità in funzione della tipologia strutturale dell'edificio (materiale e livello di progettazione sismica), inserendo in un unico sistema di riferimento di vulnerabilità tutte le tipologie strutturali più comuni.

Uno dei metodi più diffusi nel territorio italiano a partire dagli anni '80 è il Metodo dell'Indice di Vulnerabilità (Benedetti e Petrini 1984, G.N.D.T. 1993), inizialmente sviluppato per le strutture in muratura e poi esteso a quelle in calcestruzzo armato. Tale metodo prevede la compilazione di una scheda di 11 parametri descrittivi della struttura, ognuno dei quali caratterizzato da un peso (W_i , Tabella 1): a ciascun parametro viene assegnata una classe, da A a D (A rappresenta la condizione migliore e D la peggiore). La scelta della classe da assegnare è guidata dalle indicazioni fornite nei manuali applicativi del metodo e funzione delle caratteristiche tipologico-strutturali del fabbricato. A ciascuna classe corrisponde un punteggio numerico. Tali punteggi, mediati sul peso di ciascun parametro, consentono di determinare l'indice di vulnerabilità (I_v), espresso in percentuale 0-100. Ad un alto indice di vulnerabilità è associata una struttura vulnerabile.

Alcuni parametri della scheda sono direttamente collegati alle caratteristiche strutturali degli edifici (tipo di materiale, organizzazione planimetrica, etc...) mentre altri sono collegati ad aspetti non strutturali.

Tabella 1. Parametri per la determinazione dell'indice di vulnerabilità per edifici in muratura.

N.°	Parametro	W_i
1	Organizzazione del sistema resistente	1.00
2	Qualità del sistema resistente	0.25
3	Resistenza convenzionale	1.50
4	Posizione dell'edificio e fondazioni	0.75
5	Orizzontamenti	var.*
6	Configurazione planimetrica	0.50
7	Configurazione in elevazione	var.**
8	Massima distanza tra le murature	0.25
9	Copertura	var.***
10	Elementi non strutturali	0.25
11	Stato di fatto	1.00

* variabile in funzione di rigidità e ammorsamento solai

** variabile in funzione della tipologia di irregolarità

*** variabile in funzione del tipo e del peso della copertura.

In ogni caso per tutti e tre i parametri $0.50 \leq W_i \leq 1.00$.

Inoltre, nel caso delle strutture murarie, i parametri relativi agli aspetti strutturali sono attinenti sia al comportamento globale sia locale delle strutture sotto azione sismica (ad esempio il parametro 8 rappresenta la distanza massima tra pareti di controvento e può essere collegato alla propensione di attivazione dei meccanismi fuori piano di facciate o pareti esterne).

Il metodo dell' I_v ha il vantaggio di essere semplice e di rapida esecuzione, e quindi è ben applicabile allo studio di un vasto campione di edifici.

2.2 Metodi ibridi

In tempi recenti sono state sviluppate delle procedure, definite ibride, che consentono di ricavare parametri descrittivi del comportamento della struttura mediante valutazioni semplificate. Questi metodi consentono la quantificazione di indicatori del comportamento strutturale mediante analisi semplificate, da un lato evitando l'eccessivo onere di calcolo delle valutazioni analitiche e dall'altro portando a risultati fisicamente correlati alla struttura in esame, abbandonando quindi l'approccio tipologico dei metodi empirici, che è invece riferibile ad una *tipologia* o classe di edifici.

Un esempio di metodo ibrido è rappresentato dal progetto S.A.V.E. (Strumenti Aggiornati per la Vulnerabilità sismica del patrimonio Edilizio e dei sistemi urbani), proposto dal gruppo I.N.G.V.-G.N.D.T. per la valutazione degli edifici pubblici nel 2005 (Dolce e Moroni 2005). Tale metodo consente la stima numerica della PGA_C attraverso analisi semplificate, riconducibili ad analisi statiche lineari che tengono in conto della dimensione di tutti gli elementi resistenti della struttura e diverse modalità di collasso degli elementi strutturali.

Il Progetto RE.SIS.TO (Resistenza SISmica Totale), proposto recentemente dall'Università di Bologna (Chinni e al. 2013), combina il progetto S.A.V.E. con il metodo dell'Indice di Vulnerabilità.

2.3 Metodi analitici

I metodi analitici consentono di quantificare parametri indicativi del comportamento della struttura attraverso analisi numeriche di dettaglio che tengono in conto, solitamente attraverso modellazioni tridimensionali dettagliate, della reale distribuzione di masse e rigidità dell'intero fabbricato. Questi metodi permettono il calcolo della capacità della struttura (solitamente espressa in termini di Peak Ground

Acceleration, PGA_C) e dell'indice di sicurezza sismico, come rapporto tra capacità e domanda sismiche.

Focalizzando l'attenzione sulle strutture in muratura, è utile ricordare che la valutazione della vulnerabilità sismica si compone della verifica di attivazione di cinematismi locali di collasso per quelle strutture che mostrano carenze nei collegamenti (tra elementi verticali ortogonali ed elementi verticali e orizzontali) e dell'analisi del comportamento globale qualora non siano attivabili cinematismi.

Nel presente lavoro, vista la natura degli edifici analizzati, a funzione rilevante, con caratteristiche del costruito mediamente a regola d'arte e migliori rispetto a quelle dell'edilizia ordinaria, è stato scelto di focalizzare l'attenzione sul comportamento globale delle strutture, ricavando in ogni caso un indice di affidabilità del risultato ottenuto funzione della possibilità di attivazione di cinematismi fuori piano, come in seguito meglio esplicitato.

2.4 Metodi utilizzati e procedura adottata

Per ciascun edificio del campione analizzato, descritto al paragrafo successivo, sono state compilate le schede G.N.D.T. di II livello (metodo empirico) e parallelamente sono state eseguite analisi statiche non lineari con modellazione a telaio equivalente degli edifici per calcolare la PGA_C (metodo analitico).

Partendo dal confronto dei risultati ottenuti in termini di indice di vulnerabilità I_v e di PGA_C , si intende fornire una correlazione fra queste grandezze, in modo da proporre la formulazione di un nuovo metodo speditivo che, attraverso le informazioni richieste dalla compilazione delle schede G.N.D.T. di II livello, fornisca una stima diretta della PGA_C il più possibile coerente col risultato delle analisi dettagliate.

3 CAMPIONE DI ANALISI

Il campione di edifici analizzato nel presente lavoro è costituito da:

- 20 unità strutturali (U.S.), costituite dagli edifici ospedalieri di Firenze, Prato e Pistoia, oggetto di studio negli anni 2010-2016. Per l'analisi del campione si rimanda a Ciavattone et al. (2016).
- 12 U.S. universitarie dell'Ateneo Fiorentino, sulle quali la classificazione della vulnerabilità attraverso metodi speditivi è stata effettuata dal DICEA-UNIFI negli anni 2017-2019.

3.1 Campagna di sopralluoghi

L'analisi di vulnerabilità del campione di edifici analizzati è stata effettuata mediante un approccio empirico-semplificato (metodo dell'Indice di Vulnerabilità – G.N.D.T.) dal Gruppo di Ricerca DICEA-UNIFI. Tale lavoro è consistito in una serie di sopralluoghi volti alla valutazione della vulnerabilità di alcuni edifici presenti nel territorio Toscano, ed in particolare nelle città di Firenze, Prato e Pistoia.

Il lavoro si divide in due fasi:

Fase I – Sopralluoghi: attività di sopralluogo propedeutica al rilievo delle caratteristiche e criticità degli edifici. Lo scopo è definire tipologia e geometria delle strutture portanti verticali e degli orizzontamenti, indagare lo stato di fatto in cui si trovano i fabbricati, rilevandone l'eventuale quadro fessurativo, la presenza di eventuali elementi di rinforzo, eventuali situazioni di degrado strutturale o non strutturale. L'analisi viene svolta con un livello di dettaglio limitato che determina un livello di conoscenza della struttura LC1, così come definito dalla Cir. Min. n.7/2019 (MIT 2019), ovvero basato su rilievo visivo e acquisizione di documentazione relativa alla struttura e agli interventi realizzati su di essa, per quanto possibile.

Fase II – Elaborazione Dati: redazione di tavole rappresentanti il rilievo strutturale del fabbricato e compilazione delle schede di vulnerabilità. Viene inoltre redatta una relazione in cui sono riportate la documentazione fotografica, l'analisi storico-critica, la documentazione acquisita, le caratteristiche generali e gli aspetti strutturali di ciascuna unità investigata.

3.2 Caratteristiche generali del campione

Attraverso la campagna di sopralluoghi, è stato possibile acquisire informazioni utili alla caratterizzazione del campione indagato.

La maggior parte degli edifici è stata realizzata nella prima metà del secolo scorso (indicativamente gli anni '30-'40). Le strutture verticali sono realizzate in muratura, prevalentemente in pietrame disorganizzato, conci sbazzati in alcuni casi sono presenti murature di mattoni pieni (quest'ultime spesso sono disposte in allineamenti interni di spina delle strutture). Gli orizzontamenti risultano essere realizzati con differenti tecnologie costruttive: sono presenti solai con putrelle e tavelloni, solai in latero-cemento nei casi di edifici più recenti o oggetto di ristrutturazioni consistenti, oppure solai tradizionali quali sistemi voltati per le strutture maggiormente datate. Le

coperture risultano essere realizzate spesso con elementi lignei a singola o doppia orditura.

Dal punto di vista della regolarità plano-altimetrica, sono presenti differenti configurazioni, a partire da edifici estremamente regolari, fino ad arrivare a situazioni molto articolate che evidenziano irregolarità sia in pianta sia in elevazione. In ogni caso, le situazioni riscontrate sono ragionevolmente schematizzabili attraverso la modellazione a telaio equivalente.

Dal punto di vista generale, l'organizzazione strutturale degli edifici analizzati risulta in genere di medio/buona qualità; tale aspetto può essere direttamente collegato alla scelta di impiegare tali strutture per funzioni di natura strategica, rilevante e anche scolastica.

4 ANALISI CON METODO SPEDITIVO

Per ciascun edificio è stata compilata la scheda di Vulnerabilità di II Livello del metodo G.N.D.T..

Dal punto di vista statistico, risulta interessante sottolineare alcuni aspetti ricorrenti, legati ai giudizi assegnati mediamente a ciascuno degli 11 parametri della scheda per gli edifici oggetto di studio:

- il parametro 3 – resistenza convenzionale, è presente unicamente nelle due classi peggiori (C o D) visto che le tipologie murarie sono prevalentemente di pietrame o conci sbazzati, con tassi di lavoro per carichi verticali in alcuni casi consistenti;
- i parametri 5 e 9, relativi agli orizzontamenti e coperture, si attestano nelle due classi intermedie (B e C), evidenziando il fatto che non sono state rilevate situazioni altamente critiche o vulnerabili tali da giustificare un giudizio peggiore;
- i parametri relativi alla regolarità planimetrica (par. 6) e altimetrica (par. 7), hanno invece un range di variazione maggiore, e coprono tutte le possibili valutazioni di giudizio, data l'ampia variabilità delle casistiche analizzate in termini di regolarità strutturale.

Il campione di 32 edifici analizzati è caratterizzato da un ampio range di valori dell'indice I_V : in particolare i valori dell'Indice di Vulnerabilità sono compresi nell'intervallo [30%-82%], come mostrato nella seguente Figura 1, dove è riportata la classificazione di vulnerabilità sismica per il campione studiato, in ordine crescente di indice I_V . Partendo da sinistra è

leggibile la struttura più vulnerabile, con un indice di vulnerabilità attorno all'80% fino alla meno vulnerabile, a destra.

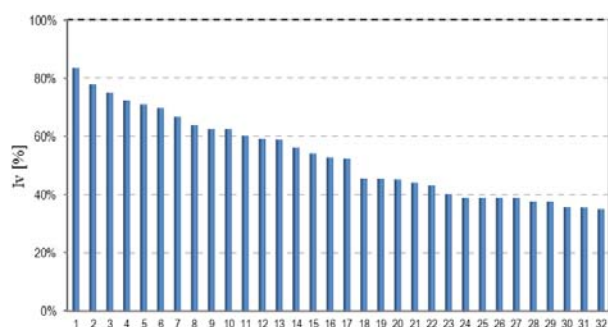


Figura 1. Classificazione di I_v per i 32 edifici analizzati con il metodo speditivo (GNDT 1993).

In Figura 2 si riporta la distribuzione dei valori che l'Indice di Vulnerabilità assume nelle U.S. che compongono il campione complessivo. Si nota come gli indici di vulnerabilità risultano essere omogeneamente distribuiti nel range di variazione [30%-82%]; si evidenzia che circa il 30% del campione ricade nella fascia di vulnerabilità I_v [30%-40%] e circa il 54% invece avente vulnerabilità $I_v > 50%$ (vulnerabilità medio-alta).

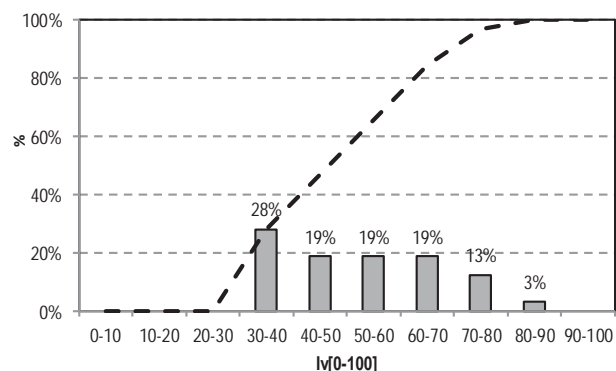


Figura 2. Distribuzione dell' I_v per le strutture in muratura.

5 ANALISI CON METODO ANALITICO

5.1 Introduzione

È stato deciso di concentrare l'attenzione sul comportamento globale delle strutture assumendo che per le tipologie strutturali oggetto di studio i pannelli murari lavorino nel proprio piano, grazie alla presenza di una buona qualità muraria (Boschi et al. 2019), di efficaci collegamenti tra pareti ortogonali e tra queste e gli orizzontamenti, semirigidi o rigidi nel proprio piano. Il comportamento locale delle strutture verrà in ogni caso considerato mediante la definizione di un Indice di Affidabilità (Reliability Index – R_I), definito in funzione della probabilità

dell'instaurarsi di meccanismi locali, sulla base dei giudizi espressi ad alcuni parametri del metodo I_v per il campione di studio analizzato.

Vengono eseguite analisi statiche non lineari tramite il software di calcolo 3Muri[®] (Galasco et al. 2002, Figura 3), sviluppato da S.T.A. DATA, modellando le strutture a telaio equivalente, mediante individuazione degli elementi maschi, fasce e nodi. Viene ricavata per ciascuna struttura la curva di capacità e, mediante trattazione prevista dalla vigente normativa, viene determinata la capacità strutturale in termini di PGA_C .

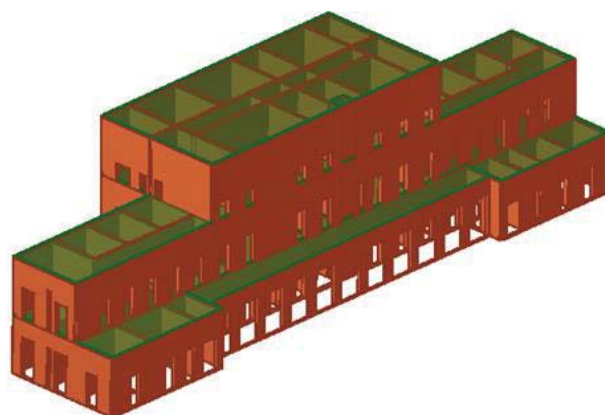


Figura 3. Modello 3d di uno degli edifici analizzati.

In particolare, per ogni edificio sono state effettuate 24 analisi pushover, tenendo in conto dei due profili di forza (uno proporzionale alla prima forma modale e l'altro proporzionale alle masse, come previsto dalla vigente normativa), delle due direzioni principali, dei versi di applicazione del carico e dell'eccentricità accidentale. L'accelerazione di capacità PGA_C è valutata per ogni curva, partendo dallo spostamento ultimo di capacità d_c della struttura, ricavato direttamente dalla curva di capacità, e scalando il relativo spettro elastico di domanda.

Si precisa che per le valutazioni numeriche è stata impiegata un'azione sismica comune, relativa al territorio fiorentino (dato che tutti gli edifici appartengono a tale area), vita nominale di 50 anni e classe d'uso III (edifici rilevanti). Dal punto di vista geotecnico, non avendo informazioni di dettaglio sui siti di costruzione di ciascuna struttura, è stato scelto di adottare una categoria di sottosuolo comune; nello specifico, e per semplicità, si è fatto riferimento alla categoria "A" della vigente normativa, secondo quanto riportato alla Tab.3.2.II di NTC 2018.

5.2 Analisi Statica Non Lineare secondo NTC 2018 e Circ. Min. n.7/2019

Uno degli obiettivi primari del presente lavoro è stato quello di aggiornare i risultati ottenuti

nelle precedenti ricerche alle disposizioni del nuovo quadro normativo italiano (NTC 2018). Si sottolineano di seguito le principali differenze riscontrate nella definizione ed applicazione dell'analisi statica non lineare secondo la NTC 2018, con particolare riferimento agli edifici in muratura.

1. Introduzione dello Stato Limite di Collasso

La precedente normativa NTC 2008 assumeva come stato limite ultimo di riferimento per le costruzioni esistenti in muratura lo stato limite di salvaguardia della vita, SLV; le norme attualmente in vigore prevedono invece la verifica nei confronti dello stato limite di collasso SLC, ritenendo che lo SLV sia raggiunto per un valore di spostamento ultimo pari a $\frac{3}{4}$ dello spostamento ultimo allo SLC.

La capacità di spostamento dei singoli maschi murari viene modificata facendo riferimento alla rotazione di corda dell'elemento e affidando al valore ultimo di tale spostamento il significato di stato limite di collasso. Nello specifico, lo spostamento ultimo allo SLC è definito in corrispondenza di una rotazione alla corda pari a 0.01 per quanto riguarda la pressoflessione, mentre per il taglio si fa riferimento al valore di rotazione alla corda pari a 0.005.

2. Meccanismi di rottura a taglio adottabili per murature esistenti

Un'ulteriore modifica apportata dalla nuova normativa riguarda i meccanismi di rottura nel piano da adottare per la muratura esistente: accanto alla rottura per taglio fessurazione diagonale già presente, viene introdotta la rottura a taglio definita "a scaletta" per murature a tessitura regolare, ovvero la rottura del pannello attraverso i giunti di malta.

3. Duttilità dei maschi murari in caso di rottura per pressoflessione

Viene introdotto un legame tra la duttilità dei maschi murari, in caso di rottura per pressoflessione nel piano, ed il livello di compressione al momento del collasso. Nella Circ. Min. 7/2019 viene definito che la capacità di spostamento ultima allo SLC, pari a 0.01, è coerente con rotture a pressoflessione caratterizzate da bassi valori dello sforzo di compressione medio ($\nu = \sigma_0/f_d < 0.2$); per valori $\nu > 0.2$ è invece richiesto di assumere valori più bassi di duttilità, tanto minori quanto maggiore è il valore di ν .

Delle tre novità apportate dal nuovo quadro normativo e brevemente qui richiamate, nel presente lavoro è stato considerato il punto 1, ovvero l'introduzione dello stato limite di collasso per edifici in muratura.

5.3 Risultati delle analisi pushover

Per ognuna delle 32 U.S. analizzate è stata ricavata la capacità strutturale in termini di PGA_c , come minima tra tutte le analisi svolte. Tale valore può quindi essere confrontato con il corrispondente valore dell'Indice di Vulnerabilità, I_v , ricavato col metodo empirico.

Nella seguente Figura 4 è riportato l'andamento delle PGA_c relative a tutte le unità strutturali del campione analizzato.

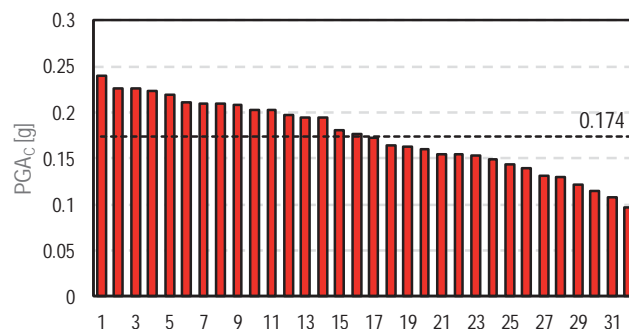


Figura 4. Classificazione della PGA_c per i 32 edifici.

Il range di variazione della PGA_c risulta appartenere all'intervallo $[0.10g-0.23g]$, con valori omogeneamente distribuiti all'interno di tale intervallo. Si ha infatti che circa il 38% ha valori compresi nell'intervallo $[0.15g-0.2g]$, il 25% valori compresi tra $[0.10g-0.15g]$, circa il 35% ha valori superiori a 0.20g. Un solo valore risulta minore di 0.1g. La media dei valori delle PGA_c è pari a 0.174g.

6 CONFRONTO TRA METODI SPEDITIVI E DETTAGLIATI

Con il fine di analizzare la relazione tra l' I_v e la PGA_c calcolati per il campione di studio analizzato, è stata plottata la nuvola di punti (I_v , PGA_c). Ciascun edificio dei 32 analizzati è rappresentato da un punto; il risultato è riportato nella seguente Figura 5. L'equazione che meglio approssima la nuvola dei punti è un'equazione esponenziale ($R^2=0.547$).

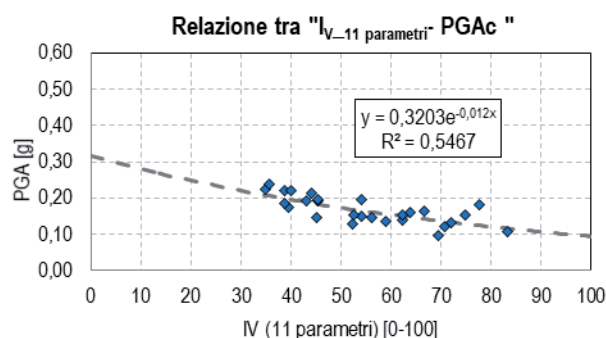


Figura 5. Relazione tra i risultati del metodo speditivo ed analitico e regressione esponenziale.

Dalla curva si può ricavare un'informazione qualitativamente corretta: strutture molto vulnerabili (alti valori di I_V) sono contraddistinte da bassi valori di PGA_C ; viceversa, strutture non molto vulnerabili (bassi valori di I_V) mostrano elevati valori di PGA_C .

Stimando l'accelerazione di capacità in funzione dell' I_V con l'equazione esponenziale sopra definita si ottengono errori elevati, variabili tra $\pm 30\%$.

6.1 Proposta di modifica del calcolo dell'Indice di Vulnerabilità

L'equazione mostrata in Figura 5 non appare pienamente affidabile al fine di stimare la PGA_C di una data struttura utilizzando come input l'indice I_V ($R^2=0.547$). Tale aspetto è una diretta conseguenza delle differenze intrinseche delle due metodologie di valutazione utilizzate (metodo GNDT e analisi pushover). Nello specifico, riferendosi ai parametri del Metodo dell' I_V , si può osservare come alcuni di essi siano implicitamente assunti nella miglior condizione nella modellazione numerica a telaio equivalente. Difatti:

- il parametro 1, che considera la presenza e la qualità dei collegamenti tra pareti ortogonali e tra queste e gli orizzontamenti, è sempre considerato nelle migliori condizioni nell'analisi del comportamento globale degli edifici, in quanto l'analisi pushover non prevede l'attivazione di cinematici fuori piano;
- il parametro 4, relativo alle condizioni geotecniche e alle fondazioni, è implicitamente assunto nelle migliori condizioni nel caso dell'analisi numerica, in quanto la fondazione viene schematizzata mediante incastri perfetti;
- il parametro 8, che rappresenta la distanza massima tra murature di controvento e che è dunque relativo alla possibilità di istaurarsi di meccanismi locali, non è tenuto in conto nei modelli tridimensionali;
- i parametri 10 -11, relativi agli elementi non strutturali ed allo stato di conservazione, non sono tenuti in conto nella modellazione.

Considerando quanto osservato sopra, al fine di ottenere una correlazione più affidabile tra i risultati ottenuti tra i due metodi, è stato deciso di ricalcolare l'indice di vulnerabilità in funzione dei soli 6 parametri relativi al comportamento globale delle strutture, ed assegnando il miglior giudizio (e quindi peso nullo nel calcolo della

vulnerabilità) agli altri parametri restanti. La nuova correlazione tra $I_{V_6\text{parametri}}$ e PGA_C è riportata nella figura seguente (Figura 6).

Anche in questo caso la linea di tendenza che meglio approssima la nuvola di punti ($I_{V_6\text{parametri}}-PGA_C$) è esponenziale. Utilizzando tale curva di regressione ($R^2=0.82$), è possibile stimare la PGA_C utilizzando come dato di input il nuovo Indice di Vulnerabilità (a 6 parametri variabili), commettendo un errore massimo pari al 20%.

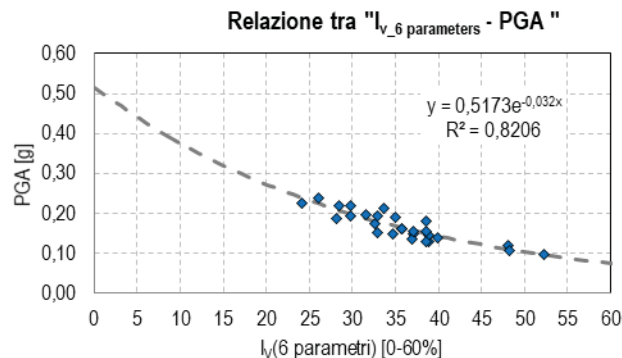


Figura 6. Relazione tra i risultati del metodo speditivo (a 6 parametri) ed analitico e regressione esponenziale.

I risultati hanno evidenziato che esiste una correlazione tra i risultati del Metodo dell'Indice di Vulnerabilità e quelli dei modelli analitici: la relazione è migliore se i parametri considerati del metodo speditivo sono unicamente quelli relativi al comportamento globale della struttura, in quanto sono quelli effettivamente modellati nell'effettuazione delle analisi non lineari.

7 SVILUPPO DI UN NUOVO METODO SPEDITIVO PER LA VALUTAZIONE DELLA VULNERABILITÀ

Preliminarmente allo sviluppo della nuova metodologia speditiva, si esegue un'analisi critica dei parametri inseriti nella scheda GNDT.

Si osserva dalla Tabella 2, dove è riportata la percentuale di influenza di ciascun parametro nel calcolo dell'Indice di Vulnerabilità, che il parametro che ha maggior peso della scheda è il parametro 3, la resistenza convenzionale: esso è l'unico degli 11 derivante da un calcolo quantitativo. Nonostante questo, nella scheda originale, tenuto anche conto dei limiti di ciascun giudizio per tale parametro, mostra spesso giudizi critici e medio-bassi (C o D), riducendo quindi la sua efficacia nel differenziare l' I_V per i vari edifici analizzati.

Si osserva inoltre che il peso assegnato ai solai e alla copertura è fissato indipendentemente dal numero dei piani.

Si propone quindi lo sviluppo di un nuovo metodo speditivo basato su 4 nuovi parametri

collegati ai 6 della scheda GNDT originale funzionali e ben correlati alla PGA_C . I parametri sono definiti nel seguito.

Tabella 2. Percentuale di influenza di ciascun parametro.

Parametro	%
1 - Organizzazione sistema resistente	12.5%
2 - Qualità sistema resistente	3.1%
3 - Resistenza convenzionale	18.8%
4 - Posizione edificio e fondazioni	9.4%
5 - Orizzontamenti	12.5%
6 - Configurazione planimetrica	6.3%
7 - Configurazione in elevazione	12.5%
8 - D_{max} murature	3.0%
9 - Copertura	6.3%
10 - Elementi non strutturali	3.1%
11 - Stato di fatto	12.5%

1. Indice di Resistenza Laterale

Il primo è l'indice di resistenza laterale, dato dal prodotto $a_0\tau_k$: a_0 rappresenta il rapporto fra l'area dei maschi resistenti e l'area totale di piano; τ_k è la resistenza a taglio della muratura, stimata in base ai valori di normativa per la classe di muratura considerata rappresentativa dell'edificio. Questa variabile sintetizza i parametri 2 e 3 originali della scheda GNDT, e viene definita come una variabile continua, in grado di diversificare in modo migliore le diverse configurazioni strutturali dei vari edifici. Si riporta nel seguente grafico la relazione di tale variabile con la PGA_C ricavata dalle analisi pushover per il campione di analisi; la Figura 7 evidenzia una forte correlazione ($R^2=0.784$) tra le due grandezze, motivo per il quale è stato scelto di definire tale variabile come continua.

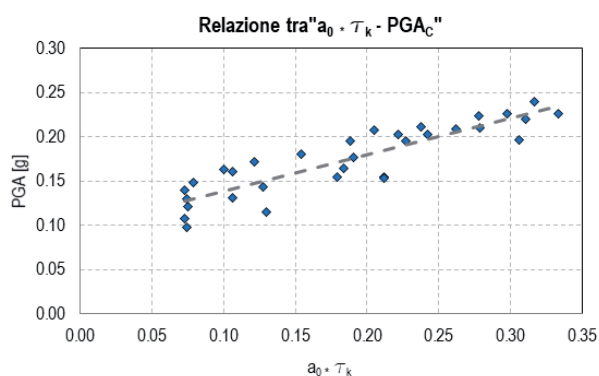


Figura 7. Relazione tra la PGA_C e il nuovo parametro $a_0\tau_k$.

2. Orizzontamenti (solai+copertura)

Il secondo parametro è quello relativo agli orizzontamenti, comprendenti sia i solai interpiano sia la copertura, il cui valore viene assegnato in funzione, oltre che dalle caratteristiche degli orizzontamenti, anche dal numero dei piani. In particolare, viene assegnato un punteggio da 4 a 1 sia ai solai che alla copertura (4 = caratteristiche migliori) e viene poi

definito il punteggio complessivo in funzione del numero dei piani:

$$(P5 + P9) = \frac{P5 \cdot (n.^\circ \text{ floors} - 1) + P9 \cdot (1)}{n.^\circ \text{ floors}}$$

3-4. Regolarità

I parametri 3 e 4 rappresentano la regolarità planimetrica ed altimetrica: vengono lasciati invariati rispetto al metodo GNDT originale: alla classe A, B, C, D viene assegnato un punteggio decrescente da 4 a 1 in funzione della regolarità.

7.1 Sviluppo del nuovo metodo speditivo

I pesi assegnati ai quattro nuovi parametri devono essere calcolati ottimizzandoli in funzione della PGA_C calcolata mediante le analisi non lineari: l'importanza relativa tra i parametri è valutata calcolando il peso di ciascuno di essi in modo tale da correlare nel migliore dei modi i dati di input del metodo speditivo ai risultati del metodo dettagliato. Si è utilizzata la regressione multilineare (Equazione 1):

$$y = \sum m_i \cdot x_i + b \quad (1)$$

dove m_i rappresentano i pesi assunti da ogni parametro x_i e b è un valore costante.

Attraverso questa procedura è stata ottenuta la seguente equazione per la stima della PGA_C di un edificio (Equazione 2). Il massimo errore registrato tra la PGA_C reale e quella stimata attraverso il modello è circa $\pm 15\%$.

$$PGA_C = 0.3375x_1 + 0.020x_2 + 0.014x_3 + 0.005x_4 + 0.0524 \quad (2)$$

Risulta utile evidenziare il valore dei pesi m_i assunti dai coefficienti delle 4 variabili della regressione: osservando la percentuale di incidenza di ciascun parametro sulla stima della capacità, si osserva che la variabile x_1 assume un peso medio del 34%, ed è quindi la variabile determinante nella stima: questo risultato è in linea con quanto definito dalla scheda GNDT dove il parametro 3 è quello che più influenza la determinazione dell' I_V . A seguire in ordine di importanza si trova il parametro relativo agli orizzontamenti, caratterizzato da una influenza media del 28% ed infine, i parametri legati alla regolarità planimetrica ed altimetrica che assumono un peso rispettivamente del 15% e 7%.

I valori trovati risultano dipendenti dalle caratteristiche del campione indagato: obiettivo futuro è quello di incrementare la popolazione di tale campione in modo da garantire maggiore affidabilità al risultato ottenuto.

7.2 Affidabilità del nuovo metodo

Il metodo implementato per la stima della capacità di una struttura è valido fintanto che la capacità stessa non sia determinata dai meccanismi locali fuori piano. Si definisce perciò un Indice di Affidabilità dello stesso, che in funzione della possibilità di instaurarsi dei meccanismi locali, fornisce l'affidabilità della stima della PGA_C così calcolata.

L'indice di affidabilità R_I (Reliability Index) è calcolato attraverso l'Equazione 3, utilizzando i valori dei parametri 1, 5 e 8 del Metodo originale dell'Indice di Vulnerabilità (che, come espresso in precedenza, sono parametri collegati alla possibilità di instaurarsi dei meccanismi fuori piano):

$$R_I = 1 - \frac{\sum_{1,5,8} V_i \cdot P_i}{101.25} \quad (3)$$

Sono stati identificati 4 intervalli di R_I : minore del 25%, 25%-50%, 50%-75% e superiore a 75%.

Nei primi due intervalli, R_I evidenzia una bassa affidabilità della capacità globale stimata, in quanto i problemi locali sono di primaria importanza nella valutazione della vulnerabilità dell'unità strutturale in oggetto. Il terzo intervallo (50%-75%) è caratteristico di strutture in cui l'approccio globale inizia ad essere affidabile, e infine il quarto (75%-100%) è riferito a strutture realizzate con tecnologie tali da far evitare presumibilmente l'instaurarsi dei meccanismi fuori piano.

Molte delle U.S. del campione analizzato sono caratterizzate da un Indice di Affidabilità R_I appartenente al 3° e 4° intervallo: ciò è dovuto al fatto che il campione di edifici analizzato è costituito da strutture a funzione rilevante per le quali, in linea generale, i dettagli costruttivi risultano ben curati.

Si fa presente che anche la stima della PGA_C per edifici caratterizzati da affidabilità $R_I < 50$ non è comunque da scartare in quanto, in seguito a futuri interventi di miglioramento per l'inibizione di cinematismi locali, la correlazione torna ad essere affidabile.

8 CONCLUSIONI

Il risultato del presente lavoro consiste nella proposta di una correlazione multi-lineare per la stima della PGA_C relativa al comportamento globale di un edificio esistente in muratura, partendo dalle informazioni qualitative effettuate mediante il metodo semplificato GNDT che sono facilmente reperibili per cospicui gruppi di edifici attraverso valutazioni e sopralluoghi preliminari.

L'equazione è stata aggiornata rispetto al lavoro effettuato negli anni precedenti dal Gruppo di Ricerca DICEA-UNIFI, ampliando il campione oggetto di analisi (32 U.S.) ed aggiornando i modelli del campione alle nuove prescrizioni normative.

Il metodo è utile per analisi di vulnerabilità sismica su ampi campioni di edifici in muratura. Con tale approccio può essere determinata la classificazione di vulnerabilità in termini di PGA_C : tale può rappresentare un utile strumento per le Amministrazioni per una maggior corretta gestione delle risorse economiche disponibili che potranno essere indirizzate verso le strutture più critiche.

BIBLIOGRAFIA

- Benedetti, D., Petrini, V., 1984. Sulla vulnerabilità di edifici in muratura: proposta di un metodo di valutazione. *L'industria delle Costruzioni*, Vol. 149, No. 1, pp. 66-74.
- Boschi, S., Ciavattone, A., Vignoli, A., 2017. Estimation of the seismic structural capacity of masonry buildings through simplified procedures. *XVII Convegno ANIDIS*. 17-21 Settembre 2017, Pistoia, Italia.
- Boschi, S., Galano, L. & Vignoli, A., 2019. *Bull Earthquake Eng* (2019) 17: 413. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0451-4>.
- Chinni, C., Mazzotti, C., Savoia, M., Perri, G., 2013. RE.SIS.TO@: una metodologia speditiva per la valutazione di vulnerabilità sismica di edifici in muratura e calcestruzzo armato. *Atti del XV Convegno ANIDIS*. Padova, Italia.
- Ciavattone, A., Borghini, A., Del Monte, E., Ortolani, B., Vignoli, A. 2013. Analisi della vulnerabilità sismica degli edifici ospedalieri situati in tre Province della Regione Toscana. *Atti del XV Convegno ANIDIS, Giugno 2013*. Padova, Italia.
- Ciavattone, A., Vignoli, A., Matthies, G., 2016. Seismic vulnerability analysis for masonry hospital structures: expeditious and detailed methods. *Proceedings of 16th IB²MAC*, Giugno 2016, Padova, Italia.
- D'Ayala, D. e Novelli, V. 2010. Deliverable 8. review and validation of existing vulnerability displacement-based models. *PERPETUATE project*.
- Del Monte, E., Galano, L., Ortolani, B., Vignoli, A. 2008. Structural Identification And Seismic Analysis Of An Existing Masonry Building. DOI: 10.1063/1.2963804.
- Dolce, M., Moroni, C., 2005. Inventario e vulnerabilità degli edifici pubblici e strategici dell'Italia centro-meridionale, Vol.IV - La valutazione della vulnerabilità e del rischio sismico degli edifici pubblici mediante le procedure VC (vulnerabilità c.a.) e VM (vulnerabilità muratura). I.N.G.V./G.N.D.T., L'Aquila, 2005.
- Galasco, A., Lagomarsino, S., Penna, A., 2002. TREMURI Program: Seismic Analyser of 3D Masonry Buildings. University of Genoa.
- G.N.D.T. 1993. Rischio sismico di edifici pubblici, Parte I: aspetti metodologici. Proceedings of CNR - Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma, Italia.

- Grünthal, G. (1998). EMS 1998. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg.
- MIT 2009. Circolare n. 617 del 2 febbraio 2009. Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni» di cui decreto ministeriale 14 gennaio 2008. G.U. n. 47 del 26/02/2009.
- MIT 2019. Circolare 21 Gennaio 2019. Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.
- NTC 2008. D.M. del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 14/01/2008. Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni. G.U. n. 29 del 04.02.2008, S.O. n. 30.
- NTC 2018. D.M. del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17/01/2018. Aggiornamento delle “Norme Tecniche per le Costruzioni”. *G.U. n. 42 del 20 febbraio 2018*.
- Whitman, R.V., Reed, J.W., Hong, S.T., 1973. Earthquake Damage Probability Matrices. *Proceedings of the 5th WCEE*, Rome, Italy, Vol. 2, pp. 2531-2540.