

Il metodo EAL-M per la classificazione sismica degli edifici in muratura esistenti: confronto tra diversi metodi proposti e prime considerazioni sull'estensione ad altre tipologie

The EAL-M method for the seismic classification of the existing masonry buildings: a comparison between different methods and preliminary evaluations of other typologies

Antonio Borri¹, Alessandro De Maria², Simone Casaglia³ ■

Sommario

L'esigenza di una classificazione sismica degli edifici esistenti nasce dalla particolare situazione di rischio delle costruzioni italiane, caratterizzate in generale dalla negativa combinazione tra un'alta vulnerabilità, una elevata pericolosità ed una forte esposizione. In questo lavoro si presenta un nuovo metodo di classificazione, chiamato EAL-M, basato sul danno economico previsto a seguito di terremoti di intensità variabile e si propone un confronto tra diversi metodi di classificazione sismica degli edifici. In particolare l'attenzione viene rivolta ai soli edifici in muratura, che costituiscono peraltro la tipologia costruttiva più diffusa nel territorio nazionale, oltre a risultare, nel caso di edifici esistenti, tra le tipologie più vulnerabili.

L'obiettivo è quello di valutare le diverse proposte attualmente presenti in letteratura, esaminando i seguenti aspetti:

- rapidità e semplicità della procedura, requisito decisivo per estendere la valutazione al maggior numero possibile di edifici;
- congruenza dei risultati con quanto ottenibile attraverso un modello oggettivamente riconosciuto come affidabile come, ad esempio, la valutazione di sicurezza ai sensi delle vigenti norme tecniche (NTC 2008);
- onerosità della procedura.

A tal fine saranno nel seguito esposte in modo sintetico le principali caratteristiche di ciascuna procedura di classificazione sismica e successivamente saranno confrontati i risultati ottenuti da ciascuna di esse su un campione di edifici esistenti ed appartenenti a diverse tipologie strutturali.

Parole chiave: Classificazione sismica, edifici esistenti, rischio sismico.

Abstract

The need for seismic classification of existing buildings arises from the particular risk of the Italian buildings, which are characterized in general by the negative combination of high vulnerability, high hazard and high exposure. This paper presents a new classification method, called EAL-M, based on the expected economic damage (Expected Annual Loss – Masonry) as a result of earthquakes of varying intensity and shows a comparison between different methods of seismic classification of buildings.

In particular, attention is focused only on masonry buildings, which are the most common type of construction in the country. Moreover existing masonry buildings usually can be considered extremely vulnerable constructions. The objective is to evaluate the various proposals currently found in the technical literature by examining the following aspects:

- *speed and simplicity of the procedure, decisive requirement to extend the assessment to the greatest number of buildings;*
- *consistency of the results with those generated by a model objectively recognized as reliable as, for example, the safety assessment in accordance with current Italian technical standards (NTC 2008);*
- *burden of the procedure.*

To this purpose in this paper the main characteristics of each seismic classification procedure will be briefly displayed. Then every seismic certification procedure will be performed on 22 existing buildings belonging to different structural types. The results obtained by each seismic certification procedure will be compared to those obtained by the safety assessment according to current Italian NTC 2008.

Keywords: Seismic classification, existing buildings, seismic risk.

¹ DI – Dipartimento di Ingegneria. Università degli Studi di Perugia - ✉ antonio.borri@unipg.it

² Servizio Controllo Costruzioni e Protezione Civile. Provincia di Perugia - ✉ ale.dm2002@libero.it

³ DI – Dipartimento di Ingegneria. Università degli Studi di Perugia - ✉ simone86sc@libero.it

1. Introduzione

L'esigenza di una classificazione sismica degli edifici esistenti nasce dalla particolare condizione di rischio delle costruzioni italiane, caratterizzate spesso dalla negativa combinazione tra un'alta vulnerabilità, una elevata pericolosità (almeno in gran parte del territorio) e una forte esposizione. Tale situazione ha portato, nei sismi passati, a perdite gravissime, sia in termini di vite umane che dal punto di vista economico. Basti ricordare come negli ultimi 50 anni le emergenze del terremoto hanno pesato sul bilancio dello Stato per circa 130 miliardi⁴ di euro (2.6 miliardi di euro all'anno) con perdite di vite umane stimabili, per lo stesso periodo, in oltre 4700 vittime.

Lo sviluppo di una appropriata strategia di prevenzione appare la strada più opportuna per affrontare il problema e, in tale direzione, un punto di particolare rilievo è rappresentato dalla valutazione del rischio sismico delle costruzioni, riferimento necessario per qualunque strumento operativo rivolto a individuare priorità e destinazione di risorse.

Per questo motivo da più parti si stanno proponendo metodi più o meno speditivi, rivolti ad attribuire una "classe sismica" agli edifici esistenti, in maniera analoga a quanto si sta già facendo in campo energetico.

La conoscenza della classe sismica degli edifici permetterebbe peraltro di sensibilizzare proprietari ed utilizzatori delle costruzioni in questione al problema della risposta sismica, e quindi a quella dei danni attesi in caso di sisma. Tale parametro può costituire anche un importante parametro di tipo economico, sia per il valore effettivo di un edificio che per la valutazione degli oneri per eventuali coperture assicurative.

2. Oggetto e finalità

I metodi di classificazione sismica hanno come obiettivo principale quello di esprimere una valutazione sintetica del comportamento atteso di un edificio nei confronti del sisma. Tali metodi possono seguire approcci diversi, basati sulla valutazione della sicurezza nei confronti di alcuni stati limite (SLV o SLU) oppure su una valutazione di tipo economico dei danni attesi. Nel primo tipo di approccio rientra il metodo C/Q (Certificazione/Qualificazione sismica) sviluppato nell'ambito di una convenzione stipulata tra Regione Umbria e l'Università degli Studi di Perugia (Borri e De Maria, 2011; Borri e De Maria, 2013) che si propone come un

metodo speditivo di classificazione sismica degli edifici in muratura.

Nel secondo tipo rientra il metodo di classificazione sismica, qui denominato "metodo EAL-M", esposto nel presente lavoro. Esso si basa su una proposta di Calvi (2013) che gli Autori hanno adattato al caso degli edifici in muratura mediante lo sviluppo di una particolare procedura. Tale metodo segue, a differenza del metodo C/Q, un approccio di tipo essenzialmente economico ed è basato sulla valutazione dei danni annuali attesi espressi in percentuale rispetto al costo di ricostruzione.

Se la valutazione della sicurezza allo SLV rappresenta l'approccio tradizionalmente seguito in materia di sismica, la possibilità di una valutazione economica dei danni attesi per una costruzione in muratura, sebbene approssimata, può fornire un utile strumento per la messa a punto di adeguate strategie di prevenzione.

Peraltro, la differenza concettuale tra i due tipi di approccio potrebbe far pensare a sostanziali differenze in termini di classe sismica attribuita ad uno stesso edificio. Come si vedrà in seguito, tali differenze possono però risultare abbastanza limitate.

Nel presente articolo verranno quindi prese in considerazione le diverse proposte presenti in letteratura, e saranno esaminati i seguenti aspetti:

- rapidità e semplicità della procedura, requisito utile per estendere la valutazione al maggior numero possibile di edifici;
- congruenza dei risultati con quanto ottenibile attraverso un modello "rigoroso", oggettivamente riconosciuto come riferimento, quale, ad esempio, la valutazione di sicurezza eseguita ai sensi delle vigenti norme tecniche (NTC2008);
- onerosità della procedura.

Dopo aver riassunto in modo sintetico le caratteristiche principali delle varie procedure, saranno confrontati i risultati ottenuti da ciascuna di esse su un campione di edifici appartenenti a diverse tipologie strutturali.

Le metodologie considerate, oltre ai metodi C/Q ed EAL-M, sono le seguenti:

- il metodo RE.SIS.TO., sviluppato in ambito DICAM (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna, Savoia et al., 2012);
- il metodo "Treviso", sviluppato dalla commissione strutture dell'Ordine degli Ingegneri della provincia di Treviso (2012);
- il metodo "Marche", sviluppato dalla Fede-

razione degli Ordini degli Ingegneri delle Marche (2012).

Tutti i metodi appena elencati si basano su un approccio basato sulla sicurezza intesa come "salvaguardia della vita umana", attribuendo la classe sismica in funzione del minimo tra i fattori di sicurezza ricavati da analisi globali e locali. Va infine osservato che un aspetto importante di qualsiasi metodo di classificazione consiste nella possibilità di poterlo applicare in modo coerente e omogeneo, pur seguendo vie differenziate, alle diverse tipologie strutturali. Verranno quindi esaminate, nelle considerazioni conclusive, anche le possibilità offerte in tal senso dai diversi metodi.

3. Metodo "EAL-M"

Il metodo, proposto da Calvi (Calvi, 2013; Welch et al, 2014) è stato qui adattato, mediante lo sviluppo di una specifica metodologia, agli edifici in muratura, che costituiscono peraltro la tipologia costruttiva più diffusa nel territorio nazionale, oltre a risultare, in molti casi, quella più vulnerabile.

Il parametro EAL (Expected Annual Loss) rappresenta, in percentuale, la perdita di valore economico dell'edificio in un anno, valutata come rapporto tra costo di ripristino dopo il sisma e costo totale di ricostruzione.

Ad esempio, considerando un edificio per il quale è prevedibile il collasso per un terremoto con periodo di ritorno di quattrocento anni, mentre qualsiasi intensità con periodo di ritorno più breve non induce alcun danno, si può dire che la perdita totale dell'edificio, e quindi il costo totale di ricostruzione, si ha in quattrocento anni.

La perdita annuale attesa (EAL) è quindi pari a:

$$EAL = 100\% / 400 = 0.25\% \quad (1)$$

La valutazione di EAL viene condotta trascurando

la probabilità di superamento ripetuta nel corso del medesimo anno, ed è riferita alle sole perdite "materiali" dirette, trascurando quindi sia i cosiddetti "costi intangibili" (vite umane) sia le perdite indirette, ossia le perdite legate al periodo di inagibilità della costruzione.

Per la valutazione di EAL nel caso di edifici in muratura esistenti è necessaria anzitutto una distinzione tra meccanismi di collasso globali e meccanismi di collasso locali. Questi ultimi in particolare, nel caso di edifici esistenti, possono contribuire in maniera determinante nella definizione del livello di danno atteso. Pertanto sarà necessario distinguere tra un $EAL_{globale}$, riferito al meccanismo resistente globale e un EAL_{locale} che stimerà il livello di perdite attese dovute all'instaurarsi di meccanismi di collasso locali.

2.1 Valutazione di $EAL_{globale}$

Per calcolare $EAL_{globale}$ è necessario disporre di una curva di vulnerabilità dell'edificio che legghi la PGA attesa al livello di perdite previste. La sua valutazione richiede la preventiva determinazione della curva di capacità della struttura, in quanto ad ogni punto di tale curva (rappresentato dalle coordinate d_i^* , F^* nel piano spostamento del punto di controllo - taglio alla base) è possibile associare un livello di danno (o di "prestazione" dell'edificio).

Nel presente lavoro sono state valutate in maniera speditiva le curve di capacità bilineari elastiche perfettamente plastiche definite da un numero limitato di parametri (Figura 1).

Le grandezze caratteristiche che definiscono la curva di capacità semplificata sono:

- la rigidezza K^* dell'edificio;
- la resistenza (espressa in termini di accelerazione alla base al limite elastico α_y^*);
- lo spostamento ultimo del punto di controllo d_u^* .

La rigidezza K^* dell'edificio può essere definita in funzione del periodo proprio T^* dell'edificio (ricavabile anche dalle formulazioni semplificate delle NTC2008) e in funzione della massa

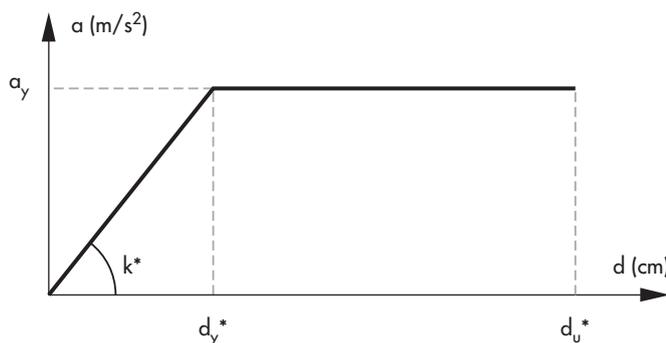


Figura 1
Curva di capacità semplificata.

partecipante m^* .

La forza di taglio alla base corrispondente al limite elastico F_y^* si valuta invece, per la generica direzione x considerata, come il minimo dei tagli resistenti di ogni livello, valutati singolarmente in maniera analoga a quanto proposto per il metodo C/Q per la qualificazione sismica, per il quale si rimanda al successivo paragrafo. Tale forza, divisa per la massa partecipante, fornisce la accelerazione alla base al limite elastico α_y^* .

Lo spostamento ultimo d_u^* del punto di controllo può valutarsi in modo differente a seconda della modalità di collasso ipotizzata. In particolare, la scelta della modalità di collasso potrà condursi tra meccanismo globale (collasso uniforme; Equazioni 2 e 3), e meccanismo di piano debole (Equazioni 4 e 5), così come per entrambe sarà possibile definire una rottura prevalente dei maschi per taglio o per pressoflessione (Figura 2).

Fissata la modalità di collasso, lo spostamento ultimo d_u^* potrà allora valutarsi nei seguenti modi:

1. Meccanismo globale - rottura per taglio:

$$d_u^* = \frac{0.004 H}{\Gamma_1} \quad (2)$$

2. Meccanismo globale - rottura per pressoflessione:

$$d_u^* = \frac{0.006 H}{\Gamma_1} \quad (3)$$

3. Meccanismo di piano debole - rottura per taglio:

$$\delta_u^* = \delta_y^* + \frac{0.004 h_{deb}}{\Gamma_1} \quad (4)$$

4. Meccanismo di piano debole - rottura per pressoflessione:

$$\delta_u^* = \delta_y^* + \frac{0.006 h_{deb}}{\Gamma_1} \quad (5)$$

- h_{deb} è l'altezza di interpiano del piano nel quale si ipotizza si attivi il meccanismo di piano debole (Figura 2);
- Γ_1 è il fattore di partecipazione modale;
- d_y^* è lo spostamento al limite elastico, dedotto dal taglio resistente F_y^* e dal periodo elastico T^* .

Ricavata la curva di capacità è necessario selezionare una serie di terremoti di intensità crescente che servono per svolgere la valutazione della risposta strutturale sulla curva di capacità.

Nel presente lavoro sono stati scelti nove terremoti con periodo di ritorno crescente (da 30 anni - sisma debole - a 2475 anni - sisma molto forte) ai quali sono associate delle probabilità annue di superamento decrescenti.

Nota il sito in cui ricade l'edificio in esame, a questi nove terremoti corrispondono:

- le PGA;
- gli spostamenti in domanda d_i^* .

In particolare qui interessano gli spostamenti d_i^* in quanto il danneggiamento di un edificio in muratura, in prima approssimazione, può essere correlato allo spostamento.

Gli spostamenti d_i^* dipendono dal sito dove ricade l'edificio in esame, dall'amplificazione del sottosuolo e dal taglio alla base corrispondente al limite elastico F_y^* . Infatti essi si valutano per mezzo delle seguenti formulazioni (in Figura 3 tali spostamenti sono riportati sulla curva di capacità semplificata):

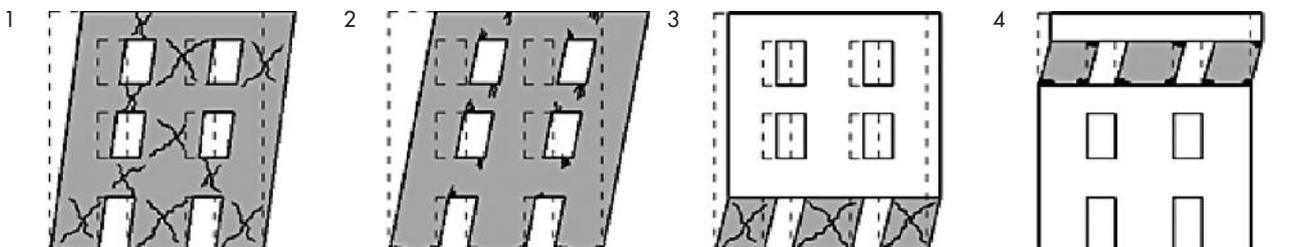
se

$$T^* \geq T_C \quad d_i^* = S_{De}(T^*) \quad (6)$$

se

$$T^* < T_C \quad d_i^* = \frac{S_{De}(T^*)}{q^*} \left[1 + (q^* - 1) \frac{T_C}{T^*} \right] \geq S_{De}(T^*) \quad (7)$$

Figura 2
1) Meccanismo globale - rottura per taglio.
2) Meccanismo globale - rottura per pressoflessione.
3) Meccanismo di piano debole - rottura per taglio.
4) Meccanismo di piano debole - rottura per pressoflessione.



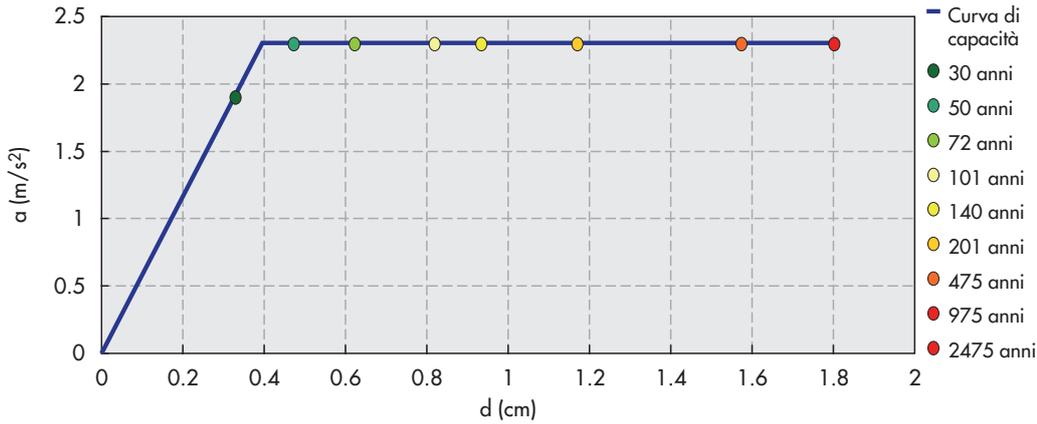


Figura 3 Individuazione della risposta del sistema equivalente per i nove tempi di ritorno considerati.

con:

q^* coefficiente definito come il rapporto tra la forza di risposta elastica e la forza di snervamento del sistema equivalente:

$$q^* = \frac{m^* S_{e(T^*)}}{F_y^*} \quad (8)$$

$S_{De(T^*)}$ ordinata dello spettro di risposta in spostamento, per il periodo del primo modo di vibrare.

La perdita di valore subita dall'edificio per un sisma con un dato periodo di ritorno è valutata come il rapporto tra lo spostamento indotto da quel sisma d_i^* e lo spostamento ultimo d_u^* sostenibile dall'edificio.

Lo spostamento ultimo d_u^* è valutato mediante la curva di capacità associata all'edificio e ad esso si associa una perdita di valore pari al 100% del valore dell'edificio. Pertanto si assume che lo spostamento ultimo corrisponde alla non convenienza economica di interventi di ripristino rispetto alla demolizione e ricostruzione dell'opera.

Per ognuno dei nove terremoti di cui si sono valutati gli spostamenti è quindi possibile, tramite la curva di capacità, valutare il danno prodotto sull'edificio come percentuale R_d del valore economico perso dallo stesso edificio, ossia come costo necessario per il suo ripristino. Se si esprimono i terremoti in termini di accelerazione attesa al suolo PGA si ottiene la curva di vulnerabilità (PGA - R_d) (Figura 4).

Nota, per il sito in esame, la correlazione tra la probabilità annua di superamento P_y di una certa PGA e la PGA stessa (Figura 5) è possibile esprimere le due curve delle Figure 4 e 5 in un unico diagramma che riporta la percentuale di perdite subite da un edificio per un dato terremoto e la probabilità annua di superamento di quel terremoto.

Tale diagramma è riportato in Figura 6 e si dimostra (Calvi, 2013; Welch et al., 2014) che l'area sottesa dalla curva è pari proprio a $EAL_{globale}$.

2.2 Valutazione di EAL_{locale}

La valutazione di tale parametro si conduce stimando, mediante analisi cinematica lineare, l'accelerazione di attivazione a_0^* dei meccani-

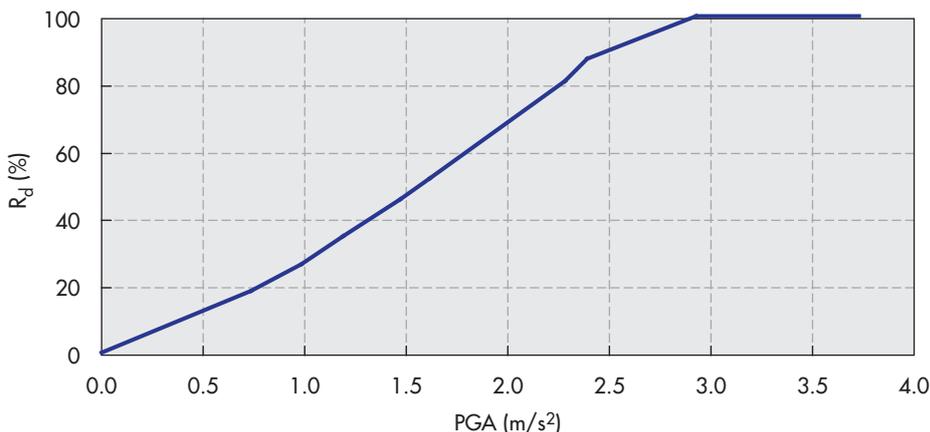


Figura 4 Curva di vulnerabilità dell'edificio (accelerazione di picco attesa al suolo PGA - percentuale di perdite R_d).

Figura 5
Curva di pericolosità per sito nel comune di Perugia (accelerazione di picco al suolo PGA - probabilità annua di superamento P_y).

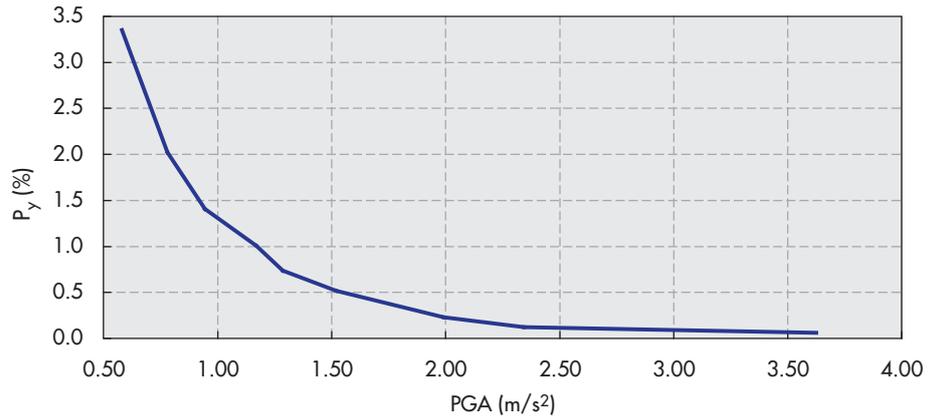
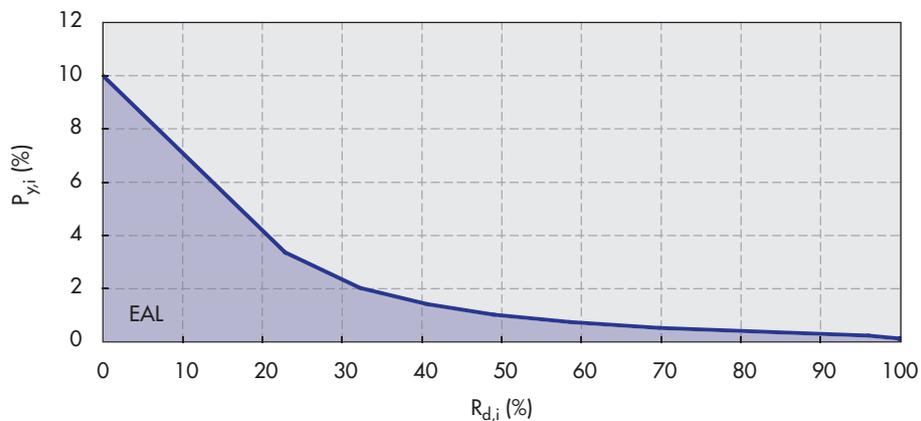


Figura 6
Valutazione di $EAL_{globale}$ in direzione x (percentuale di perdite dirette $R_{d,i}$ - probabilità annua di superamento $P_{y,i}$).



smi locali riguardanti le pareti perimetrali dell'edificio.

Si confronta l'accelerazione di attivazione a_0^* con le domande a_i , per tutti i nove periodi di ritorno dell'azione sismica già considerati per valutare $EAL_{globale}$:

$$a_i = \frac{a_{g,i} S}{q} \quad (9)$$

L'accelerazione di attivazione a_0^* sarà compresa in un intervallo delimitato da due particolari accelerazioni in domanda:

- a_i che è la più alta accelerazione in domanda per cui non si attiva il meccanismo ($a_0^* > a_i$);
- a_{i+1} che è la più bassa accelerazione in domanda per cui si attiva il meccanismo ($a_0^* < a_i$).

In corrispondenza di a_i si ipotizza che il meccanismo non si sia attivato e pertanto il danno è espresso da una perdita di valore $R_{d,i}$ nulla, riferita unicamente alla parete coinvolta nel cinematico.

In corrispondenza di a_{i+1} si ipotizza che il meccanismo si sia attivato e pertanto il danno è

espresso da una perdita di valore $R_{d,i+1}$ del 100% riferita unicamente alla parete coinvolta nel cinematico.

Il danno per terremoti che producono domande comprese tra a_i ed a_{i+1} è assunto variare linearmente tra zero e 100%.

Tenendo conto che ad ogni domanda a_i è possibile associare un sisma con probabilità annua di superamento $P_{y,i}$, è possibile realizzare, per ogni meccanismo investigato, una curva $R_{d,i} - P_{y,i}$ (Figura 7) che esprime il danno della parete coinvolta dal meccanismo in funzione della probabilità annua di superamento del sisma.

$EAL_{locale,k}$ esprime il costo di ripristino, in percentuale rispetto al costo di ricostruzione della singola parete interessata dal meccanismo, pertanto sarà necessario tener conto della totalità delle pareti per le quali è possibile individuare identiche condizioni geometriche e di vincolo, e quindi interessate dallo stesso meccanismo k -esimo.

Ciò può essere fatto moltiplicando $EAL_{locale,k}$ per un fattore μ_k : quest'ultimo rappresenta il rapporto tra la lunghezza l_k delle pareti dove si attiva tale meccanismo e la lunghezza complessiva l_p delle pareti perimetrali (assumendo, come detto, che solo per le pareti perimetrali sia possi-

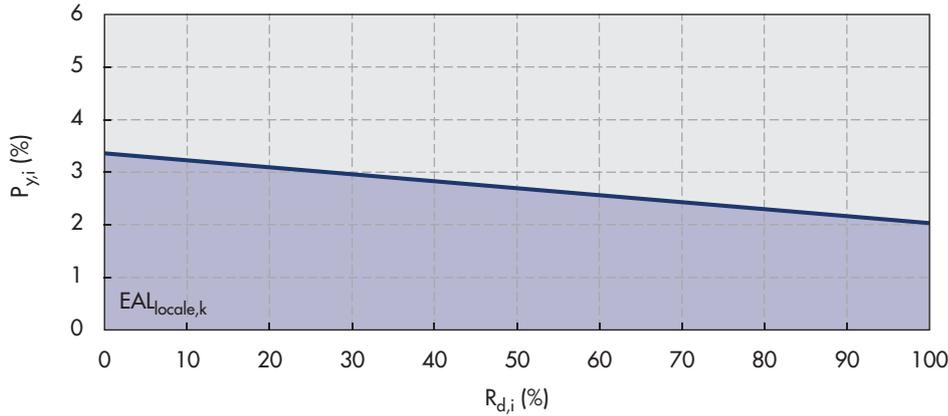


Figura 7
Valutazione di $EAL_{locale,k}$ per meccanismo k (percentuale di perdite dirette $R_{d,i}$ - probabilità annua di superamento $P_{y,i}$).

bile l'attivazione di meccanismi locali⁵). Per ogni edificio sarà possibile individuare m meccanismi possibili, pertanto EAL_{locale} si valuterà come:

$$EAL_{locale} = \sum_{k=1}^m \mu_k EAL_{locale,k} \quad \mu_k = \frac{I_k}{I_p} \quad (10)$$

2.3 Valutazione di EAL

EAL complessivo, qui brevemente chiamato EAL, è il parametro che tiene conto delle perdite economiche subite dalla costruzione in conseguenza di terremoti che attivano sia i meccanismi globali che quelli locali.

È necessario osservare come i due EAL, globale e locale, siano riferiti a costi di ricostruzione differenti: EAL_{locale} esprime, infatti, la perdita annua attesa in percentuale rispetto al costo di ricostruzione delle pareti interessate da meccanismi di collasso attivati, dunque si riferisce solo ad una porzione di edificio.

$EAL_{globale}$ esprime invece la perdita media annua attesa in percentuale rispetto al costo di ricostruzione dell'intero edificio e non di una sua porzione.

In altri termini: un EAL_{locale} del 100% può rappresentare una perdita economica molto minore, in valore assoluto, di quella rappresentata da un $EAL_{globale}$ anche inferiore al 100%, in quanto il primo si riferisce solo ai volumi di edificio interessati dai cinematismi di collasso, mentre il secondo è relativo a danni subiti dall'intero edificio.

Per sommare i due valori è necessario quindi esprimere il costo di ricostruzione delle pareti interessate da meccanismi locali come percentuale del costo totale di ricostruzione dell'intero edificio. Tale percentuale è stata stimata come il rapporto tra la somma dei volumi di pertinenza delle pareti interessate da meccanismi locali, ed il volume complessivo dell'edificio:

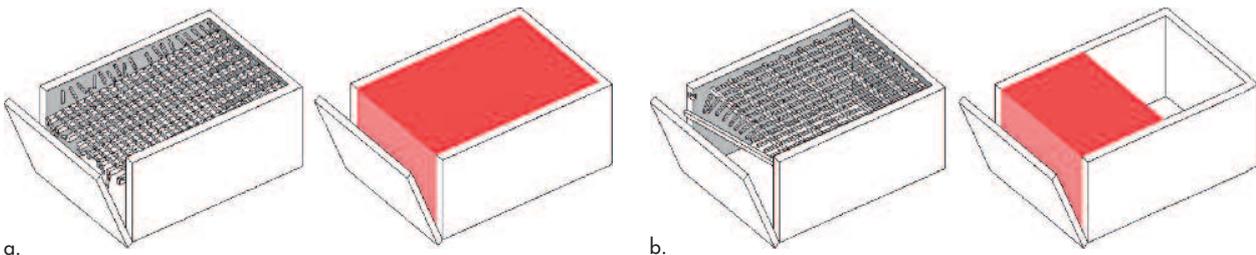
$$\varepsilon = \frac{\sum_{k=1}^m V_{e,k}}{V_{tot}} \quad (11)$$

essendo:

- $V_{e,k}$ il volume di pertinenza delle pareti interessate dal k -esimo meccanismo locale;
- V_{tot} il volume complessivo dell'edificio.

Per volume di pertinenza si intende il volume del vano delimitato dal solaio adiacente la parete

Figura 8
Volume di pertinenza del meccanismo considerato, nel caso di orditura ortogonale alla parete interessata (a), nel caso di orditura parallela alla parete interessata (b).



⁵ È possibile considerare anche eventuali meccanismi locali delle pareti interne, possibili comunque solo per particolari configurazioni, come vani a doppia altezza o solai sfalsati. In questi casi è sufficiente modificare la definizione del fattore μ_k , sostituendo l_p con l_{tot} , lunghezza complessiva delle pareti dell'edificio (interne ed esterne).

interessata dal k-esimo meccanismo di collasso: in particolare si assumerà l'intero volume nel caso in cui detto solaio sia impostato sulla parete (ipotizzando il crollo dello stesso solaio), metà volume nel caso l'orditura del solaio sia parallela alla parete (Figura 8).

Definito ε , è possibile valutare EAL come la somma dei due valori di EAL globale e EAL locale, riferiti allo stesso costo totale di ricostruzione:

$$EAL = EAL_{globale} + \varepsilon EAL_{locale} \quad (12)$$

2.4 Classi sismiche secondo il metodo EAL-M

Vengono qui definite cinque diverse classi di prestazione sismica per il metodo EAL-M (Tabella 1): dalla A, la migliore, alla E, la peggiore.

I valori numerici di EAL che sono stati scelti come confine fra le varie classi di prestazione sismica derivano da calibrazioni del metodo, basate sull'esame di una serie di edifici esistenti, esame che viene successivamente presentato.

3. Altri metodi di classificazione sismica

Vengono qui illustrati, in modo sintetico, gli altri metodi di classificazione sismica introdotti da vari Autori negli anni più recenti.

3.1 Metodo c/q (certificazione/qualificazione sismica)

Si tratta di una metodologia speditiva per la valutazione del comportamento sismico atteso per gli edifici in muratura e per l'attribuzione della classe sismica, sviluppata nell'ambito di una convenzione stipulata tra Regione Umbria e

l'Università di Perugia (Borri e De Maria, 2011; Borri e De Maria, 2013)

Il metodo C/Q distingue fra la vera e propria "certificazione", che può derivare solo da una valutazione di sicurezza svolta ai sensi delle NTC2008 e con livelli di sicurezza pari a quelli dell'adeguamento, e la "qualificazione", che invece si basa su una serie di verifiche numeriche semplificate e su una ricognizione speditiva di elementi di vulnerabilità.

La classe sismica da attribuire ad un edificio deriva da una tabella che considera il livello di vulnerabilità dell'edificio ed il coefficiente di sicurezza minimo tra quelli derivanti dalle analisi numeriche. In particolare si definiscono nove classi di qualificazione sismica (da A ad E) (Tabella 2) ed una classe di certificazione sismica A+.

3.1.1 Valutazione della vulnerabilità

L'analisi prevede la ricognizione speditiva dei principali elementi che possono determinare la risposta sismica di un edificio in muratura, elencati nella Tabella 3, mediante la compilazione di una scheda di vulnerabilità.

L'obiettivo dell'analisi è quello di determinare la vulnerabilità per l'edificio in esame, in accordo alla seguente scala: vulnerabilità bassa, vulnerabilità media, vulnerabilità alta, vulnerabilità altissima, assegnando ad ognuno degli elementi strutturali esaminati un giudizio ed assumendo che il livello di vulnerabilità globale dell'edificio coincida col giudizio più negativo.

3.1.2 Verifica globale semplificata per l'edificio

La verifica globale semplificata consiste in un'analisi di tipo VeT che riprende in parte quella prevista dalle Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio cul-

Tabella 1 - Classificazione EAL-M

Classe	EAL
A	$EAL \leq 1\%$
B	$1\% < EAL \leq 1.5\%$
C	$1.5\% < EAL \leq 2\%$
D	$2\% < EAL \leq 3\%$
E	$EAL \leq 3\%$

Tabella 2 - Classificazione metodo C/Q (Certificazione/Qualificazione sismica)

Giudizio di vulnerabilità	Esito verifiche numeriche				
	>80%	80-60%	60-40%	40-20%	<20%
Vulnerabilità bassa	A	B1	B2	C1	D1
Vulnerabilità media	B1	B2	C1	C2	D2
Vulnerabilità alta	B2	C1	C2	D1	D3
Vulnerabilità altissima	C1	C2	D1	D2	E

Tabella 3 - Elementi di vulnerabilità nel metodo C/Q

N. Descrizione vulnerabilità	
1. Stato di conservazione	Estensione e gravità di lesioni significative o faticenza grave.
2. Qualità muraria	Valutazione del rispetto della regola dell'Arte e quantità di pareti di fattura scadente.
3. Collegamenti	Connessioni o incatenamenti delle pareti esterne con i muri di spina e con i solai e la copertura.
4. Solai e copertura	Luce o appoggio insufficiente.
5. Regolarità strutturale (solo sugli impalcati "rigidi")	Presenza di irregolarità in pianta.
6. Edificio facente parte di un agglomerato o una schiera	Posizione di angolo o di testata oppure sporgenze o elevazioni non contrastate dagli altri edifici.
7. Regolarità in elevazione	Variazioni di massa o rigidità fra due livelli consecutivi.
8. Fondazioni e terreno	Evidenza di cedimenti fondali.
9. Carenze strutturali locali	Elementi spingenti, muri o pilastri in falso, superfetazioni, martellamento con edifici adiacenti.
10. Elementi non strutturali vulnerabili	Comignoli, parapetti, balconi, gronde, velette, controsoffitti di peso significativo e mal collegati.

turale – allineamento alle nuove Norme tecniche per le costruzioni (2011) per la verifica LV1 di ville e palazzi. Si valuta l'accelerazione al suolo che porta al raggiungimento dello SLV di riferimento:

$$a_{SLU} = \frac{r \cdot q \cdot F_{SLU}}{M \cdot F_0} \quad (13)$$

- F_{SLU} è la resistenza a taglio dell'edificio, ottenuta come la minore tra quelle valutate secondo due direzioni perpendicolari, in funzione dell'area resistente dei maschi murari e della resistenza a taglio della muratura secondo il criterio di Turnšek e Cacovic (1970);
- M è la massa sismica totale;
- r è un coefficiente correttivo che tiene conto delle semplificazioni adottate;
- q è il fattore di struttura;
- F_0 è l'amplificazione spettrale allo SLV.

Il fattore di sicurezza, espresso in termini percentuali, è dato dal rapporto tra a_{SLU} e la PGA attesa al sito allo SLV:

$$F.SIC = 100 \cdot \frac{a_{SLU}}{a_g \cdot S} \quad (14)$$

3.1.3 Verifica locale

La verifica dei meccanismi locali è condotta ricorrendo all'analisi cinematica lineare per valutare il moltiplicatore di attivazione del meccanismo α_0 ; l'accelerazione di attivazione pertanto risulta:

$$a_0^* = \frac{\alpha_0 \cdot g}{e^* \cdot FC} \quad (15)$$

e^* la frazione di massa partecipante, che può assumersi unitaria;
 FC il fattore di confidenza.

Il fattore di sicurezza, per ciascun meccanismo analizzato, si calcola nel modo seguente:

$$F.SIC = 100 \cdot \frac{a_0^*}{a_g \cdot S/q} \quad (16)$$

3.1.4 Verifica statica semplificata

Si tratta di una verifica riferita ai soli carichi gravitazionali. Detta α la tensione media normale, il fattore di sicurezza è definito come:

$$F.SIC = 100 \cdot \frac{f_m / \gamma_m \cdot FC}{\sigma / 0.65}, \text{ con } \sigma = \frac{N}{A} \quad (17)$$

essendo f_m la resistenza media a compressione della muratura.

3.2 Metodo RE.SIS.TO.

Il metodo RE.SIS.TO. è stato sviluppato dal DICAM (Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali dell'Università di Bologna da Savoia et al., 2012). Esso si articola in una ricognizione di vulnerabilità attuata mediante la compilazione della scheda di Il livello del GNDT (1994) e in una valutazione numerica semplificata della resistenza dell'edificio.

3.2.1 Valutazione della vulnerabilità sismica dell'edificio

Tale fase si svolge definendo un modello meccanico semplificato, al fine di valutare l'accelerazione di collasso per l'edificio, intesa come la minima accelerazione di collasso valutata ai diversi piani dell'edificio. Il piano più debole viene individuato come quello caratterizzato dal minimo rapporto taglio resistente/taglio sollecitante:

$$\frac{V_{r,i}}{V_{s,i}} \quad (18)$$

In particolare, il taglio resistente $V_{r,i}$, per l'i-esimo piano si valuta moltiplicando la minima area della muratura portante nelle due direzioni caratteristiche dell'edificio per la resistenza a taglio della muratura, definita mediante il criterio di fessurazione diagonale di Turnšek e Cacovic (1970). Il taglio sollecitante $V_{s,i}$, invece, è valutato applicando alla struttura una distribuzione di forze statiche equivalenti ottenuta considerando un'accelerazione spettrale unitaria ($S_e(T_1) = g$). Individuato il piano più debole se ne valuta l'accelerazione spettrale di collasso $S_{a,c}$ (rapporto tra il taglio resistente e la somma delle masse sovrastanti).

La resistenza dell'edificio, ridotta mediante un coefficiente C_{rid} ed espressa in termini di accelerazione spettrale, è ricondotta all'accelerazione massima attesa al suolo PGA_c mediante la formula:

$$PGA_c = \frac{S_{a,c} C_{rid}}{\alpha_{PM} \alpha_{AD} \alpha_{DT} \left(\frac{1}{\alpha_{DUC}} \right)} \quad (19)$$

- α_{PM} è il coefficiente di partecipazione modale;
- α_{AD} è il coefficiente di amplificazione spettrale;
- α_{DT} è un coefficiente che tiene conto dei fenomeni dissipativi;
- α_{DUC} è il fattore di struttura;
- C_{rid} è un coefficiente derivante dalla compilazione della scheda di vulnerabilità di II livello del GNDT (1994) per l'edificio in questione.

3.2.2 La classificazione secondo RE.SIS.TO.

In funzione del rapporto tra capacità e domanda, con la capacità valutata mediante la procedura esposta nel paragrafo precedente, si attribuisce la classe sismica come indicato nella seguente Tabella 4.

Secondo la metodologia sviluppata le eventuali vulnerabilità/criticità locali (meccanismi locali) dell'edificio che non siano state considerate nella fase di analisi precedente, devono essere valutate riconoscendo una classe peggiorativa rispetto a quella che risulta dal solo rapporto tra PGA.

3.3 Metodo Marche

La Federazione degli Ordini degli Ingegneri delle Marche (2012) ha elaborato una proposta di legge regionale per l'attestazione della classe sismica basata sull'esecuzione di analisi globali e locali secondo quanto previsto dalle NTC2008. Per semplicità espositiva tale metodo verrà qui identificato come "Metodo Marche".

La classificazione sismica è definita in base al valore del fattore di sicurezza e all'anno di costruzione/adequamento secondo la Tabella 5. In tale metodo è stato introdotto come riferimento l'anno di costruzione o dell'ultimo adeguamento dell'edificio; nel caso questo risulti antecedente al 1983⁶ l'edificio andrà collocato in classe E, mentre nel caso in cui l'anno di costruzione/adequamento sia successivo al 1983 la classe sismica è determinata dal fattore di sicurezza derivante dall'analisi.

In particolare, la classe A è prevista solo nel caso in cui risultino soddisfatte le verifiche secondo le

Tabella 4 - Classificazione RE.SIS.TO.

PGA _c /PGA _d	Classe di resistenza
0% - 25%	V
25% - 50%	IV
50% - 75%	III
75% - 100%	II
>100%	I

Tabella 5 - Classificazione Metodo Marche

Classe	Fattore di sicurezza	Anno di costruzione
A	F.sic > 100%	Successivo al 1983
B	F.sic > 100%	
C	F.sic > 75%	
D	F.sic > 50%	
E	/	Antecedente al 1983

⁶ Tale riferimento temporale coincide con l'approvazione da parte del Ministero dei Lavori Pubblici del decreto ministeriale 10 febbraio 1983, aggiornamento delle zone sismiche della Regione Marche.

NTC2008 con fattore di struttura pari a 1 o vengano adottate tecniche innovative di limitazione del danneggiamento come l'isolamento alla base. La classe B richiede il soddisfacimento delle verifiche in adeguamento secondo le NTC2008.

3.4 Metodo "Treviso"

Nel 2012 un gruppo di lavoro dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Treviso ha sviluppato un'ipotesi di classificazione sismica degli edifici esistenti e di nuova costruzione. Tale metodo verrà qui di seguito identificato come "Metodo Treviso".

L'elemento base considerato per tale classificazione è il periodo di ritorno T_R dell'evento sismico che porta la costruzione in esame a raggiungere lo stato limite di salvaguardia della vita (SLV) secondo quanto previsto dal paragrafo 8.3 delle NTC2008. Si considerano sia i meccanismi resistenti globali sia i meccanismi locali.

La scala di classificazione proposta è articolata in otto livelli (da G ad A+), seguendo lo standard reso ormai familiare dalle classificazioni di efficienza energetica. Le soglie che dividono le classi di prestazione sismica sono espresse in funzione dei valori di vita di riferimento V_R e di periodo di ritorno del sisma T_R : il primo varia tra 3 e 200 anni, mentre il secondo corrispondentemente varia tra 30 e 1898 anni. Le classi sismiche sono definite come in Figura 9.

Si può qui evidenziare una importante differenza fra il metodo Treviso e i metodi C/Q, RE.SIS.TO. e Marche: mentre questi ultimi assegnano la classe sismica tenendo conto anche della classe d'uso degli edifici, il metodo Treviso non ne tiene conto.

Inoltre, a differenza dei metodi C/Q e RE.SIS.TO., che propongono un approccio di tipo speditivo e semplificato, il metodo Treviso ed il metodo Marche richiedono la valutazione della sicurezza secondo le NTC2008, classifi-

cando poi l'edificio in base ai risultati ottenuti da tale analisi.

4. Applicazione dei metodi di classificazione sismica ad un campione di edifici

Per valutare le diverse problematiche applicative dei diversi metodi di classificazione sismica è stato preso in esame un campione di 22 edifici in muratura (Tabella 6, pagina successiva) aventi diverse caratteristiche strutturali e tipologiche (Figura 10).

Le procedure applicate per ciascun edificio sono quelle precedentemente descritte:

- Metodo EAL-M
- Metodo C/Q
- Metodo RE.SI.STO.
- Metodo Treviso
- Metodo Marche

Per poter confrontare tra loro i risultati delle diverse metodologie occorre fare alcune operazioni preliminari.

In primo luogo, i diversi metodi di classificazione sismica suddividono il campo delle possibili prestazioni degli edifici in un numero di classi differente. Si va, per esempio, dalle cinque classi del metodo EAL-M alle nove classi del metodo Treviso. Occorrerà quindi scegliere un numero di classi comune e riportare a tale suddivisione i metodi che prevedono un numero di classi superiore.

Nel fare tale operazione si terrà conto del fatto che ciascun metodo attribuisce alle singole classi dei significati specifici, differenti da metodo a metodo in termini di comportamento dell'edificio. Ad esempio, nel metodo Treviso la classe B corrisponde ad edifici che in base alle NTC2008 sono in grado di resistere ad un sisma con T_R maggiore o uguale a 475 anni. È chiaro che un edificio ordinario che ricade in classe B con il

Figura 9
Classificazione Metodo Treviso.

A+	$V_R \geq 200 - T_R (SLV) \geq 1898$ – Edifici verificati NTC 2008
A	$V_R \geq 100 - T_R (SLV) \geq 949$ – Edifici verificati NTC 2008
B	$V_R \geq 50 - T_R (SLV) \geq 475$ – Edifici verificati NTC 2008
C	$V_R \geq 35 - T_R (SLV) \geq 332$ – Edifici verificati NTC 2008
D	$V_R \geq 15 - T_R (SLV) \geq 146$ – Edifici verificati con DM 96 e Circ. 97 e zonizzazione sismica vigente
E	$V_R \geq 6 - T_R (SLV) \geq 60$ – Edifici verificati con DM 96 e zonizzazione sismica vigente
F	$V_R \geq 3 - T_R (SLV) \geq 30$ – Edifici verificati con altra normativa sismica e zonizzazione sismica vigente
G	$V_R < 3 - T_R (SLV) < 30$ – Edifici verificati con altra normativa sismica e zonizzazione sismica vigente

**Riferimento
Legislativo
 $V_R = 35$
LS 100%**

Tabella 6 - Campione di edifici esaminati

# ed.	Tipologia muratura	Tipologia solai e copertura	# piani	Tipologia strutturale	Stato di fatto	Ubicazione (Comune)	Classe d'uso
1	Blocchi in laterizio e malta cementizia	Laterocemento	2	Edificio isolato	Nuova costruzione	Perugia	II
2	Pietra squadrata/blocchi in laterizio	Laterocemento	3	Edificio isolato	Edificio esistente	Corciano (PG)	II
3	Conci sbazzati	Laterocemento	3	Edificio in aggregato	Edificio esistente	Perugia	III
4	Conci sbazzati	Laterocemento	3	Edificio in aggregato	Edificio esistente	Perugia	III
5	Pietra squadrata/blocchi in laterizio	Laterocemento	1	Edificio isolato	Edificio esistente	Perugia	II
6	Blocchi in laterizio e malta cementizia	Laterocemento	2	Edificio isolato	Nuova costruzione	Deruta (PG)	II
7	Blocchi in laterizio e malta cementizia	Laterocemento	1	Edificio isolato	Nuova costruzione	Perugia	II
8	Mattoni semipieni e malta cementizia	Laterocemento	2	Edificio in aggregato	Edificio consolidato	Marsciano (PG)	II
9	Pietrame disordinato/blocchi in tufo	Laterocemento	2	Edificio isolato	Edificio esistente	Foligno (PG)	II
10	Mattoni pieni e malta di calce	Laterocemento	2	Edificio isolato	Edificio esistente	Foligno (PG)	III
11	Mattoni pieni e malta di calce/blocchi in laterizio	Laterocemento	2	Edificio isolato	Edificio 10 consolidato	Foligno (PG)	III
12	Pietra a spacco	Laterocemento/lignei	3	Edificio isolato	Edificio esistente	Montecastello di Vibio (PG)	II
13	Muratura a sacco in conci sbazzati	Laterocemento	3	Edificio in aggregato	Edificio consolidato	Foligno (PG)	II
14	Pietra a spacco/mattoni pieni e malta di calce	S.a.p.	1	Edificio isolato	Edificio esistente	Perugia	III
15	Conci sbazzati/mattoni pieni e malta di calce	S.a.p.	1	Edificio isolato	Edificio esistente	Perugia	III
16	Conci sbazzati/mattoni pieni e malta di calce	Laterocemento/acciaio-laterizio	2	Edificio isolato	Edificio esistente	Perugia	III
17	Pietrame disordinato/mattoni pieni e malta di calce	Lignei/acciaio-laterizio	2	Edificio isolato	Edificio esistente	L'Aquila	II
18	Pietrame disordinato/mattoni pieni e malta di calce	Lignei/s.a.p./acciaio-laterizio	3	Edificio isolato	Edificio esistente	L'Aquila	II
19	Pietrame disordinato	Lignei/acciaio-laterizio/volte in laterizio	4	Edificio isolato	Edificio esistente	Piegara (PG)	II
20	Mattoni pieni e malta di calce	Lignei	2	Edificio isolato	Edificio esistente	Gavazzana (AL)	II
21	Mattoni pieni e malta di calce	Lignei	2	Edificio isolato	Edificio 21 consolidato	Gavazzana (AL)	II
22	Mattoni pieni e malta di calce	Lignei/Laterocemento	3	Edificio isolato	Edificio esistente	San Giacomo delle Segnate (MN)	II

Figura 10
Alcuni edifici del campione
esaminato.



metodo Treviso risulta verificato secondo le NTC2008 e quindi potrebbe essere considerato di classe A secondo altri metodi.

Scelta la suddivisione in cinque classi, i risultati ottenuti da ciascun metodo verranno confrontati con quelli ricavati dall'applicazione "rigorosa" delle NTC2008, scelta qui come analisi di riferimento, essendo peraltro questa la procedura "di legge" da utilizzare quando si voglia valutare la sicurezza di un edificio.

Anche i risultati ottenuti dalle NTC2008 sono stati quindi suddivisi in cinque classi, identificate nelle figure con colori dal verde intenso al rosso intenso e corrispondenti a diversi livelli di soddisfacimento delle NTC2008, espressi in termini di rapporto tra PGA (Tabella 7).

È evidente che sarebbero possibili altre suddivisioni, e i risultati del confronto potrebbero cambiare, ma da un lato i valori scelti (80%, 60%, 40%, 20%) appaiono logici e plausibili, dall'altro si è potuto verificare che anche cambiando tali intervalli – ovviamente entro certi limiti – le differenze tra i diversi metodi restano qualitativamente le stesse.

Per i metodi in esame, ai fini del confronto con i risultati ottenuti dalle NTC2008, è stata intro-

dotta quindi una suddivisione in cinque classi, raggruppando, per i metodi che ne prevedevano di più, alcune delle classi originarie.

A ciascuna classe sono state quindi ricondotte le classi dei diversi metodi, considerando le possibili equivalenze tra classi del metodo in esame e quelle stabilite per le NTC2008 (Tabella 7).

Ad esempio (ved. Figura 11), le prime tre classi del metodo Treviso (A+, A, B) sono tutte ricondotte al gruppo G1 (verde intenso) dato che corrispondono al pieno soddisfacimento di quanto previsto per lo SLV nelle NTC2008 per edifici ordinari, mentre le ultime quattro classi del metodo C/Q sono tutte nel gruppo G5 (rosso intenso) in quanto, pur con scalatura diversa, corrispondono tutte a situazioni fortemente non verificate. Lo stesso approccio è stato seguito per il metodo Marche, considerando che sia le classi A e B corrispondono al soddisfacimento dei requisiti di sicurezza in adeguamento secondo le NTC2008. I risultati ottenuti dai vari metodi per i 22 edifici esaminati sono confrontati con quelli ottenuti dalle NTC2008 nella Figura 12, nella quale il numero di cubetti della ultima riga evidenzia le differenze, in termini di numero di classi, tra i risultati delle diverse metodologie.

Tabella 7 - Definizione gruppi secondo le NTC2008 e scala cromatica scelta per il confronto

NTC	$F.sic=100 \times PGA_c / PGA_d$
G1	$F.sic \geq 80\%$
G2	$80\% > F.sic \geq 60\%$
G3	$60\% > F.sic \geq 40\%$
G4	$40\% > F.sic \geq 20\%$
G5	$20\% > F.sic$

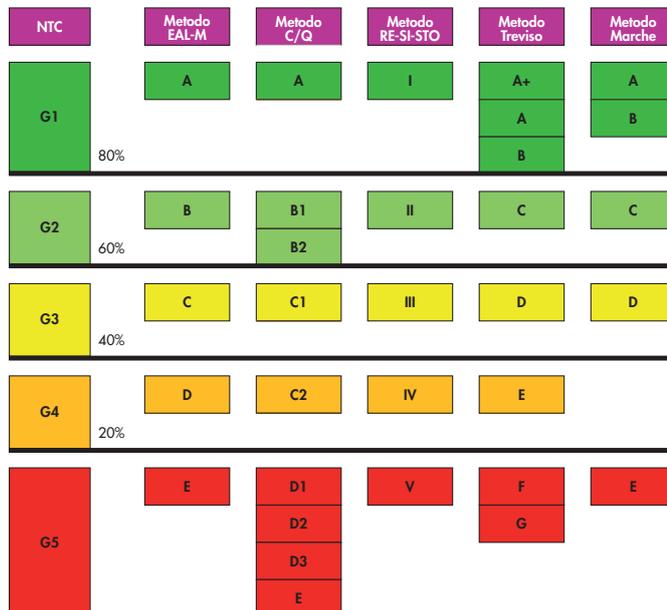
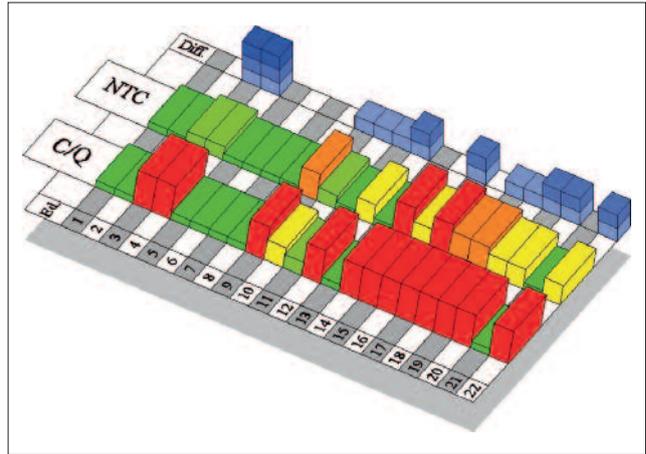
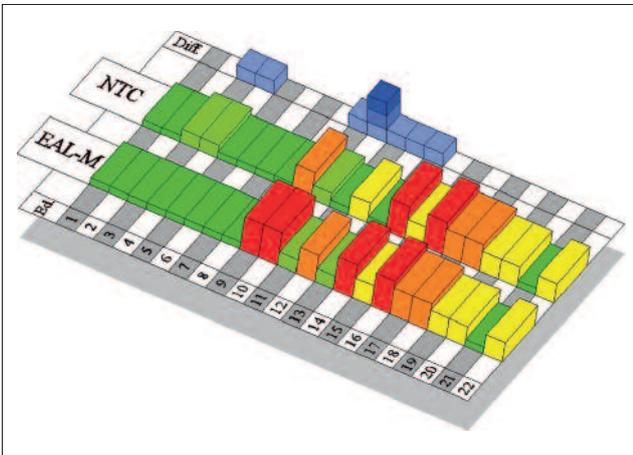


Figura 11
Suddivisione in cinque classi dei vari metodi a confronto.

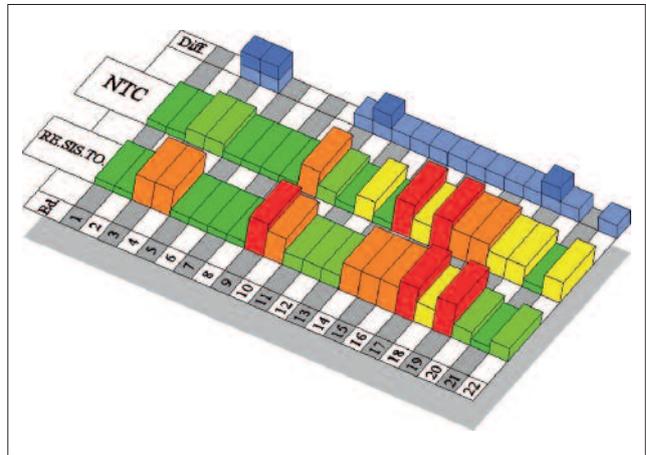
Figura 12
Confronto, edificio per edificio, tra i risultati dei vari metodi rispetto a quanto ottenuto con le NTC2008: il colore e l'altezza sono funzione della classe sismica di ciascun edificio. La riga Diff mostra, edificio per edificio, il numero di differenze di classe fra la valutazione con il metodo considerato e quella ottenuta con le NTC2008.



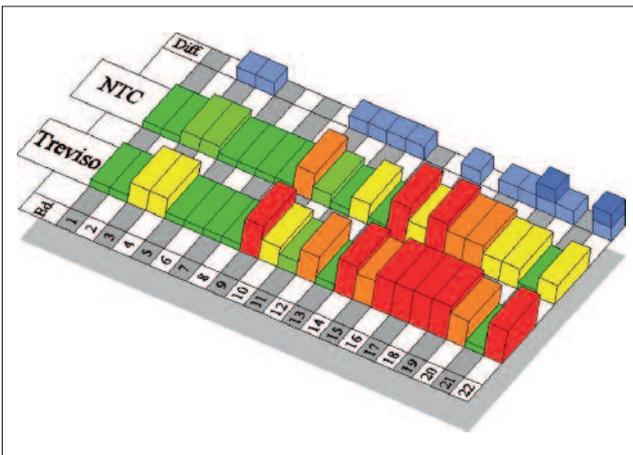
a) Confronto fra metodo C/Q e NTC.



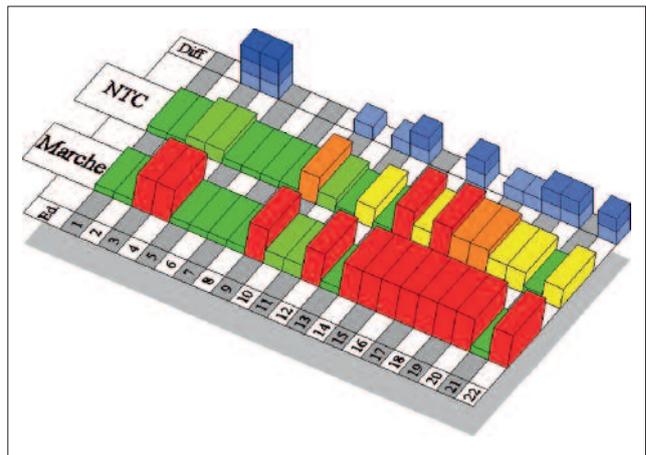
b) Confronto fra metodo EAL-M e NTC.



c) Confronto fra metodo RE.SIS.TO. e NTC.



d) Confronto fra metodo Treviso e NTC.



e) Confronto fra metodo Marche e NTC.

Per avere una valutazione numerica della maggiore o minore vicinanza tra quanto si può ottenere con i diversi metodi di classificazione sismica rispetto a quanto valutabile con le NTC2008, si possono sommare le differenze di valutazione di classe, considerando tutti i 22 edifici (Tabella 8).

Si può notare anzitutto che i risultati del metodo EAL-M si avvicinano molto, certo più degli altri, a quanto ottenibile con le NTC2008. Si nota poi come il metodo C/Q ed il metodo Marche diano risultati praticamente coincidenti, vicini peraltro anche a quelli del metodo Treviso. Ovviamente i risultati ottenuti dipendono dalle

Tabella 8 - Differenze di ciascun metodo rispetto alle NTC2008

Metodo	Numero totale di classi di differenza	Numero di edifici con valutazione discordante
EAL-M	9	7
C/Q	21	12
RE.SIS.TO.	19	15
Treviso	14	12
Marche	20	11

soglie numeriche assunte (80%, 60%, 40%, 20%) per i cinque gruppi di riferimento secondo le NTC2008. Tuttavia, ripetendo il confronto variando tali valori si è osservata una costante concordanza tra i metodi C/Q e Marche e una costante maggiore vicinanza delle classificazioni ottenute dal metodo EAL-M con quelle delle NTC2008.

Peraltro, anche se il metodo EAL si basa su considerazioni strettamente economiche, alla base del calcolo dei danni ci sono analisi legate ai meccanismi locali e a quello globale come per le NTC2008.

Le differenze tra il metodo C/Q e le NTC2008 sono attribuibili principalmente alla presenza nella procedura C/Q di una ricognizione dei principali elementi di vulnerabilità, non presente nelle verifiche secondo le NTC2008. Tale aspetto è però considerato centrale nella metodologia C/Q, in virtù dello sviluppo di una procedura speditiva caratterizzata necessariamente da un livello di approssimazione inferiore, ma anche in virtù del peculiare comportamento degli edifici in muratura sotto azione sismica governato da elementi come l'efficacia dei collegamenti e la qualità muraria.

Le differenze tra il metodo RE.SIS.TO. e le NTC2008 dipendono sia dalla valutazione speditiva dei principali elementi di vulnerabilità (mediante coefficiente C_{rid}) come nel metodo C/Q, sia dall'assenza di verifiche locali. Il criterio indicato dagli Autori di tale metodo per tener conto della vulnerabilità nei confronti dei meccanismi di primo modo in alcuni casi risulta eccessivamente penalizzante, in altri poco cautelativo. Le differenze tra il metodo Marche e le NTC2008, presenti nonostante siano richieste le stesse analisi numeriche, sono legate principalmente all'at-

tribuzione della classe sismica E a tutti gli edifici realizzati/adeguati prima del 1983.

Le differenze tra il metodo Treviso e le NTC2008 sono invece imputabili alle diverse classificazioni definite, rispettivamente, in termini di tempo di ritorno o in termini del rapporto tra PGA. Sono state riscontrate inoltre differenze per quegli edifici di classe d'uso III, per il fatto che la classe sismica, secondo il metodo Treviso, è attribuita indipendentemente da tale parametro.

Si vuole infine osservare che se la suddivisione in classi fosse più sintetica e volesse distinguere in modo schematico tra edifici "sicuri" (classi G1 e G2) e edifici non sicuri (classi G3, G4 e G5) le differenze riscontrate si ridurrebbero in modo drastico. I risultati dei metodi C/Q, Treviso e Marche sarebbero, in pratica, coincidenti tra loro e gli edifici per i quali permarrebbero discordanze con i risultati delle NTC2008 sarebbero: 3 per il metodo C/Q, 1 per il metodo EAL-M, 6 per il metodo RE.SI.STO., 3 per il metodo Treviso e 2 per il metodo Marche.

5. Onerosità delle procedure di classificazione sismica

L'utilizzo di uno dei metodi proposti rispetto agli altri comporta una diversità anche nei costi, legati al differente impegno temporale, alle dimensioni dell'edificio ed ai diversi strumenti che richiedono i vari metodi.

A titolo di esempio, in Tabella 9 si riporta una stima dei costi per un edificio campione, di tre piani di 100 m² ciascuno, per una volumetria complessiva di 900 m³.

Per quanto riguarda il metodo C/Q occorre sottolineare che nel caso si volesse fare la certificazione sismica dell'edificio si tratterebbe di effet-

Tabella 9 - Confronto tra i costi per i diversi metodi per un edificio campione di 900 m³

Metodo	Costo Stimato
Metodo C/Q (Qualificazione)	1500 €
Metodo RE.SIS.TO.	1500 €
Metodo EAL-M	2000 €
Metodi Treviso, Marche e Metodo C/Q (Certificazione)	3000 €

tuare una valutazione di sicurezza ai sensi delle NTC2008 similmente a quanto si fa per il metodo Treviso, pertanto nella Tabella 9 è stato distinto il caso della qualificazione dal caso della certificazione secondo il metodo C/Q.

Si è inoltre osservato che al crescere delle dimensioni dell'edificio aumenta il divario tra i costi richiesti dai metodi Treviso e Marche e quelli delle procedure speditive, a causa di un notevole incremento delle ore lavorative richieste dalla fase di modellazione dell'edificio.

6. Alcune considerazioni conclusive

I risultati ottenuti suggeriscono alcuni confronti e qualche considerazione finale.

6.1 Metodi EAL-M e C/Q

I due metodi, come detto, si distinguono per le diverse finalità. Il metodo C/Q considera in modo rilevante, al di là delle NTC2008 stesse, le vulnerabilità potenziali di una costruzione e quindi la classificazione sismica si propone come strumento speditivo per una prevenzione rivolta alla salvaguardia della vita.

Il metodo EAL-M, introdotto con il presente articolo, propone un approccio sostanzialmente diverso, in quanto fornisce una classificazione basata su un criterio di tipo economico.

Ciononostante, i risultati ottenuti attraverso EAL-M, almeno per il campione esaminato, sembrano avvicinarsi più di ogni altro metodo a quelli ottenibili con una verifica "rigorosa" (per quanto possa esserlo quella delle NTC2008). Una possibile spiegazione di questa concordanza sta nel fatto che in EAL-M alla base della valutazione dei danni economici ci sono comunque, come per le NTC2008, le analisi dei meccanismi di collasso (locali e globale) dell'edificio.

È evidente però che ci sono dei casi nei quali i risultati possono divergere sostanzialmente. Infatti, mentre per tutti i metodi basati sulla valutazione della sicurezza basta il ribaltamento di una sola parete, anche di ridotte dimensioni, a produrre un livello di sicurezza basso e quindi ad assegnare una classe sismica penalizzante, nel metodo EAL-M si valuta solo quanto il crollo di questa parete incide sui costi attesi e quindi la classificazione può risultare ben più elevata.

È comunque evidente la diversa finalità del metodo EAL-M, che può fornire, meglio degli altri metodi, indicazioni economiche rivolte a stabilire premi assicurativi e/o criteri per definire priorità di intervento, tenendo conto peraltro del rischio cui è soggetta la costruzione anche per i terremoti più frequenti (SLD) e non solo per l'evento raro corrispondente allo SLV di riferimento.

In generale si è poi osservata una tendenza del metodo a premiare (cioè classificare meglio) edifici bassi, di uno o due piani, piuttosto che edifici con un numero elevato di piani, e dal punto di vista intuitivo, ciò appare giustificabile in virtù della maggior propensione di tali edifici a subire dei danni. Inoltre, si è osservata una forte influenza dei meccanismi locali sul valore totale di EAL, in quanto $EAL_{globale}$ raramente assume valori superiori a 2.5%. Valori superiori di EAL sono prodotti dall'attivazione di meccanismi locali e si verificano per quegli edifici dove vi è un numero elevato di pareti vulnerabili a tali meccanismi. Tale aspetto sembra essere coerente con le evidenze osservate in occasione di terremoti del passato, nei quali i fenomeni localizzati hanno influito fortemente sul livello di danno degli edifici esistenti in muratura.

6.2 Metodi C/Q e RE.SIS.TO.

Entrambi i metodi propongono una valutazione speditiva della classe sismica dell'edificio.

Il metodo RE.SIS.TO. non richiede alcuna valutazione relativa ai meccanismi locali, mentre il metodo C/Q considera anche le verifiche locali. Probabilmente ciò induce gli scostamenti osservati fra quanto previsto dal metodo RE.SIS.TO. e quanto previsto dalle NTC2008.

La verifica globale nel metodo RE.SIS.TO. si sviluppa seguendo un approccio simile a quello del metodo C/Q, che consiste nel confrontare l'azione sismica di riferimento con la resistenza a taglio massima di piano disponibile. Tuttavia, è necessario evidenziare alcune differenze esistenti, in particolari relative all'individuazione del piano di verifica.

Il metodo RE.SIS.TO. individua il piano più debole dell'edificio (su cui svolgere la verifica) sulla base della valutazione del rapporto capacità/domanda, mentre il metodo C/Q individua il piano più debole valutando solo il taglio resistente di ciascun piano.

Quanto detto può comportare delle differenze di valutazione del piano di verifica, in quanto il metodo RE.SIS.TO. tende ad individuare tale piano tra i piani più bassi, il metodo C/Q ai piani più alti e tale differenza tende ad acuirsi nel caso di edifici di molti piani.

In particolare, per la maggior parte degli edifici in cui si manifestano tali discrepanze, il metodo C/Q risulta più penalizzante in quanto, al netto di altri aspetti, eseguire la verifica su un piano più alto risulta più gravoso essendo minore la tensione media normale e quindi la resistenza a taglio. Peraltro, nel metodo C/Q è possibile ricorrere ad altre approssimazioni in favore di sicurezza come, ad esempio, considerare una percentuale di massa partecipante del 100% mediante un valore unitario del coefficiente e^* .

Infine, si sottolinea un'ulteriore differenza legata alla valutazione degli elementi di vulnerabilità dell'edificio: nel metodo C/Q un solo elemento ad altissima vulnerabilità influisce notevolmente ed in maniera negativa sulla classe sismica attribuita all'edificio. Invece, nel metodo RE.SIS.TO. un singolo elemento ad altissima vulnerabilità è computato insieme agli altri elementi nel coefficiente riduttivo C_{rid} e pertanto potrebbe influire poco sul risultato finale.

6.3 Metodi TREVISO e MARCHE

Il metodo Treviso richiede l'esecuzione di analisi numeriche secondo le NTC2008, pertanto è caratterizzato da un livello di approfondimento maggiore rispetto ai metodi speditivi.

Anche il metodo Marche prevede l'esecuzione delle stesse analisi numeriche, ma si differenzia dal metodo Treviso per il fatto che per edifici realizzati/adequati prima del 1983 (anno di entrata in vigore della legge sismica nella maggior parte dei comuni delle Marche) non sono richieste analisi numeriche, in quanto ad essi si attribuisce direttamente la classe sismica peggiore. È evidente tuttavia che la realizzazione di edifici in assenza di normativa antisismica vigente non è necessariamente sinonimo di elevata vulnerabilità degli stessi.

Inoltre, va ricordato anche come l'attribuzione della classe sismica nel metodo Treviso avviene secondo il periodo di ritorno associato alla capacità dell'edificio, pertanto quello che si ottiene è una classificazione che non tiene conto della classe d'uso, mentre nel metodo Marche si assegna la classe in funzione del coefficiente di sicurezza e quindi anche in base alla classe d'uso prevista per l'edificio.

Le precedenti due osservazioni spiegano perché il metodo Marche ed il metodo Treviso conducano a risultati differenti tra loro per numerosi edifici del campione testato.

6.4 Applicabilità dei diversi metodi alle varie tipologie strutturali

Nel caso in cui si debbano analizzare e considerare in un unico insieme edifici di diversa tipologia costruttiva, una caratteristica importante dei metodi di valutazione è quella di poter essere applicati in modo coerente e omogeneo – cioè seguendo gli stessi principi e le stesse regole di base, indipendentemente dalla tipologia - consentendo così poi un confronto tra i risultati ottenuti.

In questi casi ci sono, tra i diversi metodi, alcune differenze di fondo, che vale la pena osservare, fermo restando che tutti hanno in ogni caso carattere di convenzionalità, nel senso che nessuno di essi pretende di cogliere in modo rigoroso le realtà strutturali dei diversi manufatti.

Ciascuno di essi propone infatti:

- a. Un percorso di analisi specifico, più o meno semplificato;
 - b. Una divisione in classi, basata su parametri e intervalli scelti in modo soggettivo dagli Autori.
- Per EAL-M il percorso di analisi (punto a) può essere differenziato inserendo nel modulo di calcolo delle perdite economiche attese il modello specifico per quella determinata tipologia costruttiva. È questo comunque un punto delicato, nel quale è necessario scegliere in modo appropriato (e diverso da tipologia a tipologia) parametri come gli spostamenti corrispondenti agli stati limite considerati, vista la loro influenza sui risultati.

Per il punto b invece non ci sono problemi, perché i valori di EAL ottenuti per i diversi edifici sono espressi in termini monetari e quindi del tutto omogenei e confrontabili tra loro ("pecunia non olet") lasciando piena libertà nella definizione delle classi sismiche e dei loro intervalli.

È questa la strada che appare la più idonea per operare nel settore delle polizze assicurative, ad esempio per definire premi assicurativi, essendo il centro focale dell'analisi costituito dalle perdite economiche dirette attese.

Per gli altri metodi l'attenzione è invece tutta centrata sulle verifiche allo SLV, e quindi essi si propongono essenzialmente nell'ambito di politiche di prevenzione (diffusa) e riduzione del rischio sismico.

Per il metodo Treviso e il metodo Marche la coerenza relativamente al punto a precedente è garantita dall'utilizzare, al variare della tipologia costruttiva, lo stesso strumento di analisi, cioè le NTC2008.

Ipotizzando che le metodologie e i parametri indicati dalla norma vigente comportino livelli di sicurezza omogenei per le diverse tipologie (cioè, ad esempio che un fattore di sicurezza 80% rispetto allo SLV abbia effettivamente lo stesso significato sia per un edificio in c.a. che per uno in muratura o in acciaio) anche per questi due metodi è garantita coerenza e omogeneità dei risultati rispetto alla variabilità delle tipologie strutturali.

C/Q e RE.SI.STO si pongono su un piano diverso, nel senso che hanno come obiettivo principale quello di una stima speditiva del rischio, utile per le politiche di prevenzione e di valutazioni su larga scala.

Per il metodo RE.SIS.TO., indirizzato agli edifici in muratura, è stata proposta dagli Autori una versione per gli edifici in c.a., basata sulla valutazione del taglio resistente di piano in funzione del momento resistente di un pilastro tipo e dell'assunzione di schema statico di incastro-incastro scorrevole.

Per C/Q attualmente sono considerati solo gli

edifici in muratura ma è in programma una versione per edifici in c.a.

In entrambi i casi, la coerenza metodologica necessaria per poter confrontare tra loro edifici di diverse tipologie può essere garantita solo da una attenta definizione delle classi (e dei loro intervalli) che assicuri l'equivalenza tra una determinata classe valevole per gli edifici in c.a. e la sua analoga per gli edifici in muratura.

7. Conclusioni

Nel presente articolo è stato esposto un metodo, denominato EAL-M, che si propone in alternativa al metodo C/Q (proposto dagli stessi Autori) laddove ci si voglia indirizzare a valutazioni di tipo economico.

Il confronto con gli altri metodi, almeno per il campione esaminato, se da una parte conforta, dall'altra suggerisce l'opportunità di ulteriori approfondimenti e un esame di un più ampio numero di casi reali.

L'obiettivo comune resta quello di individuare gli strumenti più idonei e corretti per la valutazione della classe sismica di ciascun edificio, tenendo presente le possibili diverse finalità di questi metodi.

Questi strumenti rappresentano comunque la via

maestra per una sostanziale ed efficace prevenzione sismica, riuscendo anche a promuovere, attraverso una adeguata conoscenza dei rischi connessi, un ruolo attivo dei proprietari e degli utilizzatori di queste costruzioni, con la speranza che ciò possa costituire, almeno nei casi di maggiore vulnerabilità, uno stimolo significativo e concreto a operare gli interventi minimi necessari.

Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare per il loro contributo agli studi sul metodo C/Q: la Regione dell'Umbria, il Comune di Perugia, l'Ordine degli Ingegneri di Perugia, l'Ordine degli Ingegneri di Terni, l'Ordine degli Architetti di Perugia, l'Ordine degli Architetti di Terni, l'Ing. Marco Balducci, l'Ing. Francesco Bartocci, l'Ing. Monia Benincasa, l'Ing. Alberto Boria, l'Arch. Cosimo Cavallone, l'Ing. Valeria Ciaboco, l'Ing. Cesare Corneli, l'Ing. Sandro Costantini, l'Ing. Andrea Galli, il Geom. Luigi Gaudenzi, l'Ing. Andrea Giannantoni, l'Ing. Luca Leonardi, il Dott. Federico Marani, l'Ing. Fabrizio Menghini, l'Ing. Franco Merlini, l'Ing. Mario Passeri, l'Ing. Andrea Pellegrini, l'Ing. Riccardo Savelli, l'Ing. Matteo Vinti.

Bibliografia

- Borri A., De Maria A. (2011) - Un Protocollo Metodologico per la Certificazione Sismica degli edifici. Atti del XIV Convegno Nazionale L'ingegneria Sismica in Italia, 2011, Bari.
- Borri A., De Maria A. (2013) - La Certificazione Sismica degli edifici: possibili applicazioni per la stima della vulnerabilità urbana degli insediamenti storici. Atti del XV Convegno Nazionale L'ingegneria Sismica in Italia, Padova
- Calvi G.M. (2013) - Un unico parametro per la valutazione delle prestazioni termiche e sismiche di un edificio. *Progettazione sismica* - N. 2.
- Chinni C., Mazzotti C., Perri G., Savoia M. (2012) - RE.SIS.TO®: una metodologia speditiva per la valutazione di vulnerabilità sismica di edifici in muratura e calcestruzzo armato. *Ingenio* - N. 16.
- Federazione Ordini degli Ingegneri delle Marche (2012) - Proposta di legge regionale in materia di classificazione sismica. *Attestati di classificazione sismica*.
- Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (1994) - Schede di 1° e 2° livello di vulnerabilità e di rile-

vamento del danno (edifici in c.a. e muratura).

- Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo (2011) - Linee Guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale - allineamento alle nuove Norme tecniche per le costruzioni. In G. Uff. del 26 febbraio.
- Ordine degli Ingegneri di Treviso (2012) - Bozza di proposta di attestato di certificazione sismica degli edifici (ACS). Documento introduttivo.
- Primo Rapporto ANCE/CRESME (2012) - Lo stato del territorio italiano 2012. *Insediamiento e rischio sismico e idrogeologico*.
- Turnsek V., Cacovic F. (1970) - Some Experimental Results on the Strength of Brick Masonry Walls. 2nd International Brick Masonry Conference, Stoke on Trent, UK.
- Welch D.P., Sullivan T.J., Calvi G.M. (2014) - Developing Direct Displacement-Based Procedures for Simplified Loss Assessment in Performance-Based Earthquake Engineering. *Journal of Earthquake Engineering*, 18:2, 290-322. DOI: 10.1080/13632469.2013.851046.

Gli Autori

Prof. Ing. Antonio Borri

È Ordinario di Scienza delle Costruzioni, in servizio presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia.

Ricopre anche le cariche di:

Presidente del Centro Studi "Sisto Mastrodicasa" per il consolidamento ed il restauro.

Direttore del Master Universitario di II livello in "Miglioramento sismico, restauro e consolidamento del costruito

storico e monumentale”.

Vice Presidente del Consiglio direttivo dell'Associazione Italiana Compositi (AICO) di Venezia.

Socio fondatore e Membro del Consiglio Direttivo dell'Associazione italiana di Ingegneria Forense (AIF) di Napoli.

Responsabile del Laboratorio di prove su strutture e materiali nel Polo Scientifico Didattico di Terni.

È inoltre Membro del Consiglio Direttivo dell'Associazione per il Recupero e Consolidamento delle Costruzioni (ASS.I.R.C.CO.) e del Comitato scientifico dell'Associazione per il Recupero del Costruito (ARCo), entrambe con sede in Roma, del Comitato scientifico della Fondazione “Guglielmo Giordano”. È socio “ad honorem” dell'Associazione Tecnologi dell'Edilizia (ATE) di Milano.

Ha ricoperto varie cariche all'interno dell'Ateneo perugino: membro del Senato Accademico (1997-2000) e del Consiglio di Amministrazione dell'Università di Perugia (2000-2002).

Coordinatore del Dottorato di ricerca in Ingegneria Civile nel periodo 2000-2008 e Presidente del Corso di laurea in Ingegneria Civile dal 2002 al 2008.

Ha svolto numerosissime convenzioni di ricerca con Enti pubblici e privati su argomenti di ingegneria strutturale, con particolare riferimento al consolidamento e restauro strutturale di edifici monumentali e all'analisi di vulnerabilità e monitoraggio del costruito storico (monumenti, centri storici, musei).

Ha fatto parte di gruppi di lavoro ministeriali e del CNR per la scrittura di normative tecniche.

Dal 2003/2004 dirige il Master di II livello in “Miglioramento sismico, restauro e consolidamento del costruito storico e monumentale” (sede in Foligno e, nelle ultime edizioni, anche a L'Aquila).

Ha organizzato e continua ad organizzare, con il Centro Studi Mastrodicasa, numerosissimi corsi di aggiornamento professionale rivolti agli Ordini degli Ingegneri di varie regioni italiane.

Ha fatto parte del gruppo di specialisti che ha condotto per la Galleria della Accademia di Firenze le indagini strutturali diagnostiche sulla statua del David di Michelangelo (2003-2006).

È stato responsabile scientifico per la diagnosi struttu-

rale del Portico della Gloria nella Cattedrale di Santiago di Compostela (Spagna) e coordinatore delle indagini strutturali su tale monumento (2009-2010).

Si interessa principalmente di comportamento meccanico delle costruzioni storiche e di tecniche innovative per il loro consolidamento.

È autore di più di 300 pubblicazioni su volumi e riviste scientifiche, sia italiane che straniere.

Alessandro De Maria

Ingegnere civile strutturista, nel 1999 ha lavorato presso lo Studio Tecnico di Ingegneria Umbrioprogetti di Umbertide. Dal 2000 lavora al Servizio Controllo Costruzioni e Protezione Civile della Provincia di Perugia, svolgendo attività di controllo e vigilanza su progetti e cantieri, consulenze strutturali e redazione di piani di protezione civile. Con i colleghi della Provincia di Perugia ha collaborato a numerosi lavori di ricerca, alcuni presentati ai convegni Anidis fra il 2004 ed il 2013. Per la Provincia di Perugia ha partecipato al censimento danni del sisma abruzzese del 2009, del sisma di Marsciano del 2009 e del sisma in Emilia del 2012. Dal 1999 collabora con la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia su tematiche riguardanti il comportamento delle costruzioni in muratura e la loro vulnerabilità sismica. È coautore di libri, articoli e pubblicazioni su tali argomenti, ma anche correlatore di alcune tesi di laurea e docente del Centro Studi Mastrodicasa.

Simone Casaglia

È un Ingegnere civile strutturista laureatosi con lode nel 2014 presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia. Nel 2013 ha ricevuto l'attestato di premiazione “Riconoscere e valorizzare il merito: percorsi d'eccellenza - Miglior Studente” rilasciato dall'Università degli Studi di Perugia. Dal 2011 collabora con uno studio tecnico di ingegneria di Gualdo Tadino in attività di progettazione strutturale. Dal 2014 collabora con la Facoltà di Ingegneria dell'Università degli Studi di Perugia su temi riguardanti la vulnerabilità sismica delle costruzioni in muratura.