



## Un modello per la stima dell'agibilità sismica degli edifici in muratura

Maria Zucconi<sup>a</sup>, Rachele Ferlito<sup>b</sup>, Luigi Sorrentino<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento d'Ingegneria, Università Niccolò Cusano, Via Don Carlo Gnocchi 3, 00166 Roma, Italia.

<sup>b</sup> Servizio Rischio Sismico e Vulcanico, Dipartimento di Protezione Civile, via Vitorchiano 4, 00189 Roma, Italia

<sup>c</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Sapienza Università di Roma, Via Antonio Gramsci 53, 00197 Roma, Italy

*Keywords: indice d'agibilità; matrici di probabilità d'agibilità; moto del terreno; PGA; PGV; Sa/T; scenari sismici.*

### ABSTRACT

Negli ultimi decenni la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici a scala territoriale ha assunto un ruolo sempre più centrale per gli organi amministrativi coinvolti nelle attività di riduzione del rischio. In particolare, la vulnerabilità degli edifici è stata finora indagata facendo prevalente riferimento al danno strutturale atteso. Tuttavia la prestazione di una costruzione può essere valutata anche in termini di agibilità, intesa come la sua fruibilità con un livello di rischio per la vita umana paragonabile a quello prima dell'evento. L'esito di agibilità post sisma influenza il numero di senza tetto da assistere nella fase di emergenza e l'allocazione delle risorse economiche da distribuire nel processo di ricostruzione, come avvenuto talvolta in passato.

In questo lavoro si presenta un modello per la stima dell'agibilità per edifici in muratura, calibrato sui dati osservati dopo il terremoto de L'Aquila del 2009. Il modello si basa sul calcolo di un indice di agibilità, funzione dell'intensità macrosismica, ottenuto dalla somma pesata di sette parametri, che influenzano il comportamento degli edifici sotto sisma: posizione dell'edificio all'interno dell'aggregato, numero di piani fuori terra, periodo di costruzione, classe strutturale, presenza di interventi di rinforzo, tipo di copertura e danno pre-esistente agli elementi strutturali. Per ognuno di questi parametri sono state definite delle categorie caratterizzate da una crescente perdita di agibilità stimata sulla base di analisi di regressioni monoparametriche, e successivamente è stata valutata la loro importanza relativa sull'esito di agibilità della struttura mediante l'analisi in componenti principali. Sono state poi definite le Matrici di Probabilità di Agibilità in funzione dell'intensità macrosismica  $I_{MCS}$  e dell'indice di agibilità, considerando tre possibili esiti: edificio agibile, edificio parzialmente inagibile ed edificio inagibile. Un esempio svolto illustra come applicare la procedura proposta. Tre misure quantitative d'intensità quali: picco di accelerazione al suolo, picco di velocità al suolo e accelerazione spettrale corrispondente ad un periodo proprio di vibrazione  $T$  pari a 0.3 s, sono state associate ad ogni edificio del database, al fine di definire in futuro un nuovo modello per la previsione dell'agibilità degli edifici.

### 1 INTRODUZIONE

Negli ultimi decenni, la valutazione della vulnerabilità degli edifici ad uso civile è diventata di grande interesse a causa delle grandi perdite economiche e del notevole numero di vittime registrate a seguito di terremoti (Calvi et al., 2006; Romano et al., 2019a, 2018), pur se spesso di intensità moderata. In particolare modo, gli edifici in muratura, che risultano particolarmente vulnerabili (Coccia et al., 2017, 2016), sono largamente diffusi nel territorio italiano costituendo oltre il 57% delle abitazioni totali. A tal proposito, la riduzione della vulnerabilità su larga scala è diventata un tema centrale delle politiche governative, anche grazie all'impulso

dato dal Dipartimento nazionale della protezione civile.

Nella letteratura internazionale sono stati sviluppati molti modelli di vulnerabilità per la stima delle perdite (Colonna et al., 2017; Ferlito et al., 2013; Rota et al., 2008), conseguenti al verificarsi di futuri terremoti possibili sul territorio nazionale. I modelli più ricorrenti per la valutazione della vulnerabilità su larga scala possono essere classificati come: empirici, meccanici e ibridi (D'Ayala et al., 2015). Tutti questi modelli portano alla calibrazione di matrici di probabilità di danno (Drago et al., 2016; Sun Yang et al., 1989; Whitman, 1973) o curve di fragilità (Romano et al., 2019b; Rota et al., 2008). I modelli empirici (Braga et al., 1982; Rosti et al., 2018) sono basati sui dati relativi ai danni post

terremoto osservati nell'immediato post sisma. I metodi analitici e meccanici (Borzi et al., 2008; D'Ayala and Speranza, 2003) si basano su una selezione di prototipi di edifici rappresentativi, per i quali devono essere definite la geometria, le proprietà meccaniche e i dettagli costruttivi. Tali metodi si sono molto diffusi negli ultimi anni grazie alle grandi capacità computazionali disponibili (D'Ayala, 2013; Erberik, 2008; Mouyiannou et al., 2014).

La maggior parte dei lavori presenti in letteratura sono funzione del potenziale danno strutturale che l'edificio può subire a seguito di un sisma (Drago et al., 2016). Tuttavia, negli ultimi anni, la comunità scientifica sta ponendo molta attenzione alla definizione dell'agibilità strutturale (Stannard et al., 2014), ossia la capacità di un edificio di essere riutilizzabile a valle di un evento sismico. In particolare, in Italia, nella fase iniziale del processo di ricostruzione, a seguito del terremoto de L'Aquila del 2009, un criterio per l'allocazione delle risorse era basato sul giudizio di agibilità (Di Ludovico et al., 2017a, 2017b; Rossetto et al., 2014). Di recente Rosti et al. (2018), a partire dai dati inerenti il terremoto de L'Aquila, hanno correlato il danno strutturale, definito attraverso degli indici di danno, all'esito di agibilità; Sisti et al. (2018), utilizzando i dati provenienti dal terremoto del Centro Italia del 2016, hanno evidenziato una forte correlazione tra l'esito di agibilità e alcune caratteristiche strutturali.

Zucconi et al. (2018; 2018; 2017) hanno proposto un modello empirico per la previsione probabilistica dell'agibilità degli edifici post-terremoto, basato sul calcolo di un indice d'agibilità strutturale funzione di diversi parametri, che influenzano il comportamento sismico di costruzioni murarie. Il modello definisce delle matrici di probabilità d'agibilità in funzione dell'indice stesso e dell'intensità macrosismica Mercalli-Cancani-Sieberg  $I_{MCS}$ .

## 2 MODELLO PER LA VALUTAZIONE DELL'AGIBILITÀ DEGLI EDIFICI

### 2.1 Indice di agibilità

Il modello Zuconi et al. (2018; 2018; 2017) è stato calibrato considerando circa 60 000 edifici ispezionati dopo il terremoto de L'Aquila del 2009 e appartenenti a 90 comuni suddivisi in 248 insediamenti. Il database è disponibile nella piattaforma di danno osservato Da.D.O (Dolce et al., 2017), promossa dal Dipartimento di Protezione Civile nazionale, con lo scopo di

raccogliere e catalogare i dati post-sisma relativi ai terremoti avvenuti in Italia negli ultimi cinquanta anni. I dati analizzati sono stati raccolti compilando la scheda AeDES "Scheda di I livello di rilevamento del danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica" (Baggio et al., 2000), escludendo quindi strutture di grandi luci ed edifici monumenti.

Il modello si basa su sette parametri descrittivi degli edifici:

1. posizione dell'edificio all'interno dell'aggregato strutturale,
2. numero di piani fuori terra;
3. epoca di costruzione;
4. classe strutturale;
5. presenza di interventi di rafforzamento;
6. tipo di copertura;
7. danni preesistenti agli elementi strutturali.

Il parametro classe strutturale è stato definito a partire dalle tipologie strutturali della scheda AeDES, dove sono considerate 30 diverse tipologie, definite in funzione delle strutture verticali e orizzontali. Sulla base di analogie nel comportamento sismico tali tipologie sono state assemblate in quattro categorie (Figura 1), la cui vulnerabilità aumenta con l'identificativo. In modo simile sono state individuate le categorie rilevanti de gli altri parametri.

Dalla combinazione pesata dei valori calcolati per tali parametri è stato definito un indice di agibilità,  $U$ , in funzione della misura d'intensità macrosismica,  $I_{MCS}$ , nel seguente modo:

$$U|I_{MCS} = \sum_{i=1}^p (u_i|I_{MCS}) \bar{w}_i \quad (1)$$

dove:

- $u_i|I_{MCS}$  è il valore assegnato all' $i$ -esimo dei sette parametri sopra elencati in funzione della categoria di appartenenza e dell'intensità macrosismica  $I_{MCS}$ ;
- $p = 7$  è il numero di parametri;
- $\bar{w}_i$  è il peso normalizzato del parametro  $i$ -esimo, determinato attraverso l'analisi in componenti principali (Jolliffe, 2002), i cui valori sono mostrati in Tabella 1 (Zucconi et al., 2017).

Tabella 1 Pesì normalizzati  $\bar{w}_i$  dei parametri strutturali

Parametri							
	1	2	3	4	5	6	7
$\bar{w}_i$	0.123	0.041	0.284	0.332	0.020	0.148	0.053

1 posizione all'interno dell'aggregato strutturale, 2 numero di piani fuori terra; 3 epoca di costruzione; 4 classe strutturale; 5 presenza di interventi di rafforzamento; 6 tipo di copertura; 7 danni preesistenti agli elementi strutturali.

Strutture verticali	Non identificata o muratura a tessitura irregolare e di cattiva qualità (pietrame non squadrato, ciottoli,...)	Muratura a tessitura regolare e di buona qualità (blocchi; mattoni; pietra squadrata,...)
Strutture orizzontali		
Non identificate, volte o travi con soletta deformabile (travi in legno con semplice tavolato, travi e voltine,...)	Classe strutturale 4	Classe strutturale 2
Travi con soletta semi-rigida e rigida (travi in legno con doppio tavolato, travi e tavelloni, solai di c.a., travi ben collegate a solette di c.a.,...)	Classe strutturale 3	Classe strutturale 1

Figura 1. Categorie classi strutturali.

Il valore assegnato all'*i*-esimo parametro esprime la perdita del livello di agibilità dell'edificio espressa in funzione dell'elemento corrispondente, in un intervallo compreso tra 0 e 1, dove 0 è l'edificio completamente agibile e 1 è l'edificio completamente inagibile. Le categorie di ogni parametro e i valori dei coefficienti  $u_i$  di Equazione 1 sono mostrati nelle Tabelle 2-8 (Zucconi et al., 2017).

Allo stesso modo,  $U$  esprime, mediante una analoga suddivisione in categorie, la perdita globale di agibilità dell'edificio, sulla base della perdita di funzionalità dei diversi parametri strutturali

I parametri considerati sono di tipo categorico, ossia risultano di tipo qualitativo e definiscono delle caratteristiche dell'edificio, come ad esempio il parametro classe strutturale, o il periodo di costruzione dell'edificio, o la presenza o meno di rinforzi strutturali. Pertanto i coefficienti  $u_i$  sono stati calibrati per ogni parametro definendo dapprima delle categorie significative e quindi procedendo per ognuna di esse al seguente calcolo (M. Zucconi et al., 2018):

$$u_i | I_{MCS} = \frac{N_{UB,i} | I_{MCS}}{N_{TB,i} | I_{MCS}} \quad (2)$$

Dove:  $N_{UB}$  è il numero equivalente di edifici inagibili, e  $N_{TB}$  è il numero totale di edifici, i quali sono stati valutati per ogni categoria dei parametri considerati. Il numero equivalente di edifici inagibili tiene conto anche degli edifici classificati come parzialmente inagibili (esito D della scheda AeDES), assimilati agli edifici inagibili (esito E) e degli edifici temporaneamente inagibili (esito B), che sono pesati per un fattore 0.3, stimando che il costo di riparazione di un edificio così classificato vale mediamente il 30% del costo di riparazione di

un edificio classificato come inagibile (esito E) (Dolce and Manfredi, 2015). Per la definizione completa del giudizio d'agibilità della scheda AeDES si rimanda al relativo manuale (Baggio et al., 2000).

Tabella 2. Coefficiente d'agibilità  $u_i$  (Equazione 1) per il parametro posizione dell'edificio all'interno dell'aggregato strutturale al variare dell'intensità macrosismica.

$I_{MCS}$	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Isolato	0.030	0.168	0.289	0.393	0.480	0.549	0.600
Interno	0.057	0.281	0.486	0.672	0.839	0.987	1.000
Estremità	0.060	0.248	0.424	0.589	0.742	0.884	1.000
Angolo	0.057	0.313	0.541	0.739	0.909	1.000	1.000

Tabella 3. Coefficiente d'agibilità  $u_i$  (Equazione 1) per il parametro numero di piani fuori terra al variare dell'intensità macrosismica.

$I_{MCS}$	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
1	0.057	0.165	0.273	0.382	0.490	0.599	0.707
2	0.078	0.244	0.410	0.577	0.743	0.909	1.000
>2	0.053	0.242	0.432	0.622	0.811	1.000	1.000

Tabella 4. Coefficiente d'agibilità  $u_i$  (Equazione 1) per il parametro epoca di costruzione al variare dell'intensità macrosismica.

$I_{MCS}$	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
< 1919	0.116	0.316	0.516	0.716	0.916	1.000	1.000
1919-1945	0.071	0.249	0.428	0.606	0.784	0.962	1.000
1946-1961	0.021	0.166	0.312	0.457	0.602	0.747	0.892
>1961	0.000	0.081	0.161	0.242	0.323	0.403	0.484

Tabella 5. Coefficiente d'agibilità  $u_i$  (Equazione 1) per il parametro classe strutturale al variare dell'intensità macrosismica.

$I_{MCS}$ \ Categoria	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
1	0.019	0.089	0.159	0.230	0.300	0.370	0.440
2	0.058	0.174	0.290	0.407	0.523	0.639	0.755
3	0.074	0.262	0.449	0.636	0.824	1.000	1.000
4	0.176	0.375	0.574	0.772	0.971	1.000	1.000

Tabella 6. Coefficiente d'agibilità  $u_i$  (Equazione 1) per il parametro presenza di interventi di rafforzamento al variare dell'intensità macrosismica.

$I_{MCS}$ \ Categoria	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Assenti	0.075	0.236	0.397	0.558	0.719	0.880	1.000
Presenti	0.000	0.143	0.286	0.429	0.572	0.716	0.859

Tabella 7. Coefficiente d'agibilità  $u_i$  (Equazione 1) per il parametro tipo di copertura al variare dell'intensità macrosismica.

$I_{MCS}$ \ Categoria	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
Spingente pesante	0.070	0.220	0.371	0.521	0.672	0.822	0.973
Non spingente pesante	0.020	0.117	0.214	0.311	0.408	0.504	0.601
Spingente leggero	0.138	0.328	0.519	0.710	0.901	1.000	1.000
Non spingente leggero	0.083	0.255	0.427	0.599	0.772	0.944	1.000

Tabella 8. Coefficiente d'agibilità  $u_i$  (Equazione 1) per il parametro danni preesistenti agli elementi strutturali al variare dell'intensità macrosismica.

$I_{MCS}$ \ Categoria	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
0	0.027	0.198	0.369	0.540	0.711	0.881	1.000
1	0.119	0.301	0.482	0.664	0.846	1.000	1.000
2	0.350	0.509	0.667	0.826	0.984	1.000	1.000
3	0.426	0.580	0.735	0.890	1.000	1.000	1.000
4	0.501	0.652	0.803	0.954	1.000	1.000	1.000
5	0.558	0.765	0.971	1.000	1.000	1.000	1.000

Vale la pena sottolineare che per la stima del numero totale di edifici è necessario valutare la completezza del database utilizzato al fine di definire il grado di copertura dei rilievi effettuati. Infatti, le ispezioni venivano eseguite sistematicamente esclusivamente nelle aree epicentrali, mentre allontanandosi erano eseguite unicamente su richiesta dei proprietari. Ne discende che i dati presenti nelle schede AeDES soffrono di una distorsione sistematica, che

compromette la completezza del database. Al fine di superare tale limite è stata definita una procedura per la stima del numero totale di edifici presenti sul territorio (M. Zucconi et al., 2018). Tale procedura si basa sull'utilizzo dei dati del censimento nazionale (ISTAT, 2011), che risulta essere il database più esteso a livello nazionale. Va osservato, tuttavia, che il rilievo ISTAT ha uno scopo diverso da quello del rilievo del danno e dell'agibilità post-sisma, pertanto il criterio di selezione dell'edificio non coincide con l'identificazione della singola unità strutturale come invece avviene con la scheda AeDES, ne consegue che il numero totale di edifici nei due database non coincide neanche nelle aree epicentrali.

Per ogni località di tutti i municipi analizzati è stato valutato il numero di edifici presenti nel database AeDES,  $N_{AeDES}$ , e il numero di edifici presente nel database ISTAT,  $N_{ISTAT}$ . Dopo aver raggruppato le località in funzione dell'intensità macrosismica  $I_{MCS}$  è stato valutato il rapporto  $r$  definito come:

$$r|I_{MCS} = \frac{N_{AeDES}|I_{MCS}}{N_{ISTAT}|I_{MCS}} \quad (3)$$

Tale rapporto assume un valore  $r < 1$  nelle località con  $I_{MCS} = V$ , mentre  $r > 1$  per  $VI \leq I_{MCS} < X$  (vedi Figura 2), dove si ha un valore medio di  $r$  pari a 1.7. Tale valore è ottenuto dalla media pesata sul numero totale di edifici aventi la stessa intensità macrosismica. Il numero totale di edifici  $N_{TB}$  è stato quindi stimato nel seguente modo:

$$N_{TB} = \begin{cases} N_{ISTAT} r_{mean} & \forall I_{MCS} < VII \\ N_{AeDES} & \forall I_{MCS} \geq VII \end{cases} \quad (4)$$

ottenendo un numero totale di edifici nell'area esaminata pari a 110 000, contro i 60 000 edifici rilevati; pertanto gli edifici mancati sono stati simulati mediante il metodo Monte Carlo. La distribuzione  $D_{i,j}$  del parametro  $i$ -esimo considerato nel calcolo dell'indice d'agibilità è stata corretta ottenendo  $D_{i,j,corr}$  al fine di limitare la sovra-rappresentazione degli elementi più vulnerabili della distribuzione:

$$D_{i,j,corr} = \frac{N_{AeDES} D_{i,j} + \Delta N D_{i,mean}}{N_{bldgs}} \quad (5)$$

dove:  $\Delta N = N_{TB} - N_{AeDES}$ , e  $D_{i,mean}$  è la distribuzione media del parametro considerato nel sottoinsieme di edifici che hanno  $I_{MCS} \geq VI$  e  $r > 1$ .

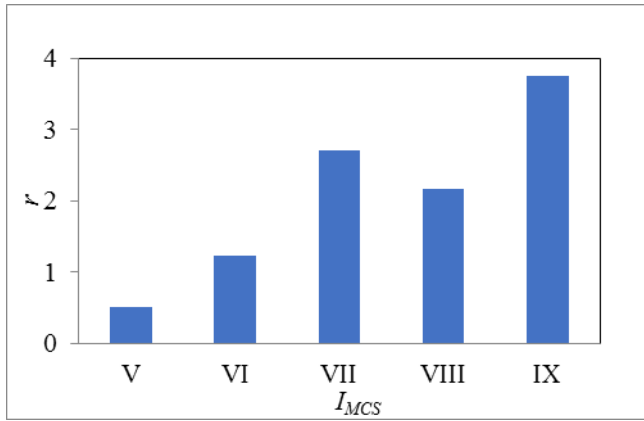


Figura 2. Rapporto  $r$  tra il numero di edifici della scheda AeDES,  $N_{AeDES}$ , e il numero di edifici del censimento ISTAT,  $N_{ISTAT}$ , al variare dell'intensità macrosismica ( $M$ ). (Zucconi et al., 2018).

Infine, una volta calcolati i coefficienti  $u_i|I_{MCS}$ , secondo l'Equazione 2, per ognuno dei sette parametri considerati, sono state definite delle regressioni monoparametriche lineari o quadratiche, calcolate rispetto all'intensità macrosismica al fine di smussare eventuali andamenti non monotonici e definire i valori dei coefficienti  $u_i|I_{MCS}$  da utilizzare in Equazione 1 (Zucconi et al., 2017).

## 2.2 Matrici di probabilità d'agibilità

Una volta definiti i coefficienti,  $u_i|I_{MCS}$  ed i pesi normalizzati,  $\bar{w}_i$ , è stato possibile calcolare l'indice di agibilità  $U$  di Equazione 1 per ogni edificio del database e sono state definite le matrici di probabilità di agibilità per ogni intensità macrosismica. Le matrici forniscono la probabilità condizionata di agibilità in funzione del valore dell'indice  $U$ , considerando tre possibilità: edificio completamente agibile (A), edificio parzialmente inagibile (B) ed edificio inagibile (E). Per ogni matrice sono stati definiti cinque sotto-intervalli per l'indice  $U$ , approssimativamente equispaziati tra i valori minimo e massimo. Tali intervalli individuano 5 categorie di  $U$  caratterizzate da un'inagibilità crescente. Le Tabelle 9-15 mostrano le matrici ricavate per tutte le intensità macrosismiche (da V a XI).

Tabella 9 Matrice di probabilità d'agibilità in funzione dell'indice  $U$  per l'intensità macrosismica  $I_{MCS}=V$ .

Categorie $U$	A	B	E
0.01-<0.06	97.0	3.0	0.0
0.06-<0.11	95.2	4.6	0.2
0.11-<0.16	85.1	9.5	5.4
0.16-<0.21	69.9	11.9	18.2
0.21-<0.26	50.3	15.7	34.0

Tabella 10 Matrice di probabilità d'agibilità in funzione dell'indice  $U$  per l'intensità macrosismica  $I_{MCS} = VI$ .

Categorie $U$	A	B	E
0.11-<0.18	88.6	7.1	4.3
0.18-<0.25	84.1	7.9	8.0
0.25-<0.32	69.9	11.3	18.8
0.32-<0.39	53.8	11.5	34.7
0.39-<0.46	37.5	12.8	49.8

Tabella 11 Matrice di probabilità d'agibilità in funzione dell'indice  $U$  per l'intensità macrosismica  $I_{MCS} = VII$ .

Categorie $U$	A	B	E
0.20-<0.29	80.1	11.5	8.4
0.29-<0.38	72.9	11.0	16.1
0.38-<0.47	54.7	13.1	32.3
0.47-<0.56	38.9	9.8	51.2
0.56-<0.66	24.6	9.8	65.6

Tabella 12 Matrice di probabilità d'agibilità in funzione dell'indice  $U$  per l'intensità macrosismica  $I_{MCS} = VIII$ .

Categorie $U$	A	B	E
0.29-<0.39	71.7	15.8	12.5
0.39-<0.50	61.7	14.1	24.1
0.50-<0.61	39.4	14.8	45.7
0.61-<0.72	23.5	8.8	67.7
0.72-<0.84	11.8	6.9	81.3

Tabella 13 Matrice di probabilità d'agibilità in funzione dell'indice  $U$  per l'intensità macrosismica  $I_{MCS} = IX$ .

Categorie $U$	A	B	E
0.37-<0.50	63.3	20.1	16.6
0.50-<0.62	50.6	17.2	32.2
0.62-<0.74	24.2	16.6	59.2
0.74-<0.86	8.0	7.8	84.2
0.86-<0.99	0.0	2.9	97.1

Tabella 14 Matrice di probabilità d'agibilità in funzione dell'indice  $U$  per l'intensità macrosismica  $I_{MCS} = X$ .

Categorie $U$	A	B	E
0.46-<0.56	54.8	24.5	20.7
0.56-<0.67	39.4	20.3	40.2
0.67-<0.78	9.0	18.3	72.6
0.78-<0.89	0.0	0.0	100.0
0.89-<1.00	0.0	0.0	100.0

Tabella 15 Matrice di probabilità d'agibilità in funzione dell'indice  $U$  per l'intensità macrosismica  $I_{MCS} = XI$ .

Categorie $U$	A	B	E
0.54-<0.64	46.4	28.8	24.8
0.64-<0.73	28.3	23.4	48.3
0.73-<0.82	0.0	13.9	86.1
0.82-<0.91	0.0	0.0	100.0
0.91-<1.00	0.0	0.0	100.0

### 3 UN ESEMPIO APPLICATIVO

Le matrici di probabilità di agibilità rappresentano uno strumento molto importante per l'analisi di scenario sismico e per simulare le misure preventive atte alla riduzione del rischio sismico delle aree urbane. In particolar modo il modello permette di simulare interventi di miglioramento sismico che comportano una riduzione della vulnerabilità e quindi delle agibilità delle costruzioni, come nel caso di interventi strutturali che implicano un cambiamento della classe strutturale dell'edificio, oppure la rimozione del danno preesistente o la modifica del tipo di copertura. Va osservato inoltre che un modello per la stima dell'agibilità può essere facilmente collegato al numero di persone senza tetto e alla stima delle perdite economiche a seguito di sisma.

Per comprendere meglio l'applicabilità del modello, viene presentata di seguito la procedura per il calcolo dell'indice  $U$  per un edificio del database localizzato in un'area con  $I_{MCS} = VIII$ . I coefficienti d'agibilità  $u_i$  sono definiti in funzione dei parametri presi in considerazione in Equazione 1 e di seguito riportate:

1. Posizione dell'edificio di estremità: 0.589;
2. Tre piani fuori terra: 0.622;
3. Periodo di costruzione dell'edificio 1946-1961: 0.457;
4. Classe strutturale 4: muratura irregolare e di cattiva qualità con solai lignei a semplice orditura: 0.772;
5. Assenza di interventi di rinforzo: 0.558;
6. Copertura non spingente leggera: 0.599;
7. Danno pre-esistente di livello 1: 0.664;

Moltiplicando i valori dei coefficienti per i pesi di Tabella 1 si ottiene:  $U = 0.620$ . Tale valore ricade nel quarto intervallo  $U = 0.61 - < 0.72$ , per il quale si ha il 23.5% di probabilità che l'edificio sia agibile, l'8.8% di probabilità che sia

parzialmente inagibile e il 67.7% di probabilità che l'edificio sia inagibile.

Il metodo può essere applicato per la realizzazione di uno scenario sismico. Un esempio può essere trovato in Zucconi et al. (2017), relativo alla insediamento di Casamaina, nel comune di Lucoli (AQ), considerando le situazioni pre- e post-intervento.

### 4 ESTENSIONE DEL MODELLO A MISURE D'INTENSITÀ QUANTITATIVE

Le carenze della misura di intensità macrosismica, l'uso di diverse scale macrosismiche adottate nei paesi del mondo e la mancanza di studi di pericolosità in termini di intensità macrosismica suggeriscono l'uso di misure d'intensità sismica quantitative da considerare per la definizione di un nuovo modello di agibilità.

La rete accelerometrica italiana risulta oggi largamente diffusa su tutto il territorio nazionale, sebbene la densità strumentale sia lunga dall'assicurare almeno un dispositivo per ogni insediamento urbano. Tuttavia tale rete ha permesso di ricavare *shakemaps* relative agli eventi sismici verificatesi negli ultimi anni. Tali mappe sono state rese disponibili dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) e posso essere scaricate gratuitamente del loro sito web (<http://shakemap.rm.ingv.it/shake>).

Naturalmente, è importante sottolineare che le *shakemaps* possono fornire solo valori approssimativi della misura d'intensità, poiché per definire i valori nelle aree non coperte da strumentazione vengono utilizzate equazioni di predizione del movimento del terreno e le leggi di attenuazione, trascurando di conseguenza le variazioni che si possono avere sulle brevi distanze. Ne consegue che la misura d'intensità attesa rappresenta solo una stima della stessa, in quanto può essere affetta da errori a causa di diversi fattori che possono oltretutto essere influenzati dalla variabilità inter-evento (Dolce and Di Bucci, 2014). Ciononostante, i valori forniti, seppur approssimazioni, possono ancora essere considerati accettabili per delle stime a grande scala, specie in raffronto alle incertezze legate all'intensità macrosismica.

I dati grezzi delle *shakemaps* relative al terremoto de L'Aquila del 2009 (Faenza et al., 2011) sono disponibili alla pagina <http://shakemap.rm.ingv.it/shake/1895389/products.html>, e sono riferiti alle seguenti grandezze:

1. picco di accelerazione del terreno (PGA);
2. picco di velocità del terreno (PGV);
3. accelerazione spettrale corrispondente ad un periodo proprio di vibrazione  $T$  pari a 0.3 s ( $S_a | T = 0.3$  s);
4. accelerazione spettrale corrispondente ad un periodo proprio di vibrazione  $T$  pari a 1.0 s ( $S_a | T = 1.0$  s);
5. accelerazione spettrale corrispondente ad un periodo proprio di vibrazione  $T$  pari a 3.0 s ( $S_a | T = 3.0$  s).

Per la successiva estensione del modello verranno prese in considerazione solo le prime tre misure di intensità tra quelle sopra elencate. Infatti la PGA è la misura di intensità più comunemente utilizzata nell'ambito dei modelli empirici finalizzati alla definizione delle curve di fragilità (ad esempio Rota et al. (2008)); la PGV è considerata da molti ricercatori il parametro di input sismico che meglio interpreta la risposta sismica degli edifici in muratura (Mouyiannou et al., 2014). Infine, verrà considerata l'accelerazione spettrale associata al più piccolo periodo di vibrazione dei tre considerati all'interno delle *shakemaps* poiché è quello che risulta più significativo per gli edifici in muratura presenti all'interno del database analizzato. Infatti, nel 14% dei casi gli edifici presentano un solo piano fuori terra, nel 46% due piani fuori terra, nel 33% tre piani fuori terra, mentre meno dell'8% hanno più di tre piani (M. Zucconi et al., 2018). Se stimiamo il periodo di vibrazione delle strutture secondo la formula empirica presente nell'Eurocodice 8 – parte 1 (EC8-1, 2004):

$$T = 0.05H^{0.75} \quad (6)$$

dove  $H$  è l'altezza totale dell'edificio in metri e consideriamo un'altezza d'interpiano pari a 3 m si ottiene che  $T$  è uguale a:

1. 0.19 s per un edificio a due piani;
2. 0.26 s per un edificio a tre piani.

Pertanto, il valore il valore dell'accelerazione spettrale per  $T = 0.3$  s è il più vicino tra i tre disponibili nelle *shakemaps*.

I valori della PGA presenti nella *shakemap* variano nell'intervallo 0.02-0.48 g, con passo pari a 0.04 g; la PGV varia invece tra 2 e 58 cm/s con passo di 2 cm/s, mentre la  $S_a | T = 0.3$  s varia nell'intervallo 0.04-0.88 g, con un passo di 0.04 g. Le tre misure d'intensità sismica sono state quindi associate ad ogni edificio del database mediante l'utilizzo di software GIS, sulla base dell'insediamento di appartenenza. Successivamente i valori delle tre misure d'intensità sono stati aggregati definendo

opportuni intervalli, aventi un passo di 0.10 g per la PGA, un passo di 10 cm/s per la PGV e un passo di 0.20 g per la  $S_a | T = 0.3$  s. Il valore centrale di ciascun di ogni intervallo è assunto come valore categoriale rappresentativo dell'intervallo stesso, ad eccezione dell'ultimo valore che è scelto in modo da essere vicino alla media dei dati disponibili. Nelle Tabelle 16, 17 e 18 sono indicati gli intervalli per ogni misura d'intensità e il relativo numero di edifici ricadenti al loro interno.

A partire dalle tre misure d'intensità, che sono state associate ad ogni edificio, sarà possibile definire un nuovo modello per la predizione della stima dell'agibilità degli edifici in caso di sisma, definendo delle nuove matrici di probabilità d'agibilità funzione di una misura d'intensità di tipo quantitativo e di un nuovo indice d'agibilità. Il confronto tra le inagibilità previste e quelle osservate permetterà di selezionare la misura di intensità più efficace.

Tabella 16. Intervalli di PGA [g] e relativo numero di edifici.

Intervalli	No. di edifici
< 0.05	49 567
0.05 - < 0.15	28 306
0.15 - < 0.25	6 596
0.25 - < 0.35	9 555
≥ 0.35	17 248

Tabella 17. Intervalli di PGV [cm/s] e relativo numero di edifici.

Intervalli	No. di edifici
≤ 5	56 209
5 - < 15	26 222
15 - < 25	13 649
25 - < 35	6 433
≥ 35	8 759

Tabella 18. Intervalli di  $S_a / T = 0.3$  s [g] e relativo numero di edifici.

Intervalli	No. di edifici
< 0.10	42 050
0.10 - < 0.30	39 550
0.30 - < 0.50	5 187
0.50 - < 0.70	10 583
≥ 0.70	13 902



## 5 CONCLUSIONI

Gli edifici esistenti in muratura sono largamente diffusi in Italia e in altri paesi del mondo e generalmente sono caratterizzati da prestazioni sismiche piuttosto basse. Le analisi di scenario sismico su larga scala e i programmi di mitigazione del rischio necessitano di modelli semplificati che agevolino le fasi di indagine sugli edifici e il successivo calcolo. Diversi modelli sono stati proposti in passato, principalmente basati sulla stima della vulnerabilità delle strutture, ovvero la propensione che esse hanno a subire danno, piuttosto che sulla prestazione sismica espressa in termini d'agibilità, cioè la condizione di un edificio ad essere utilizzabile dopo un evento sismico. Inoltre, va evidenziato, che molte delle formulazioni definiscono i diversi pesi sulla base di un giudizio esperto piuttosto che di un'analisi rigorosa di database esistenti. Pertanto, un modello empirico per prevedere l'agibilità di edifici in muratura è stato recentemente calibrato a partire dai dati del terremoto de L'Aquila del 2009, considerando analisi di regressioni statistiche e analisi in componenti principali per la definizione del modello. Il database iniziale di circa 60 000 edifici è stato esteso implementando una procedura per la stima del grado di copertura dei rilievi effettuati, che generalmente risulta completo soltanto nelle località situate nella zona epicentrale, con una conseguente sottostima del numero totale di edifici presenti nel territorio e una sovrastima delle perdite. Gli edifici mancanti sono stati simulati mediante il metodo Monte Carlo, definendo un database finale di circa 110 000 edifici utilizzato per le analisi. Questo modello utilizza l'intensità macrosismica Mercalli-Cancani-Sieberg come misura d'intensità, l'unica misura di intensità disponibile al momento in cui il modello è stato sviluppato.

Data la larga disponibilità di studi di pericolosità sismica basati su misure d'intensità quantitative verrà sviluppato un nuovo modello per la previsione d'agibilità delle costruzioni in muratura. Tali misure d'intensità sono state rese disponibili dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, che ha pubblicato di recente i dati grezzi delle *shakemaps* relative al terremoto de L'Aquila del 2009. Nonostante la loro approssimazione intrinseca, le informazioni contenute in una *shakemap* possono essere considerate almeno tanto robuste quanto le intensità macrosismiche. Sono stati quindi considerati tre parametri di movimento del terreno:

picco di accelerazione del terreno, picco di velocità del terreno e accelerazione spettrale corrispondente ad un periodo proprio di vibrazione pari a 0.3 s, il più rilevante per le costruzioni in esame. Ad ogni edificio del database sono state quindi associate le tre misure d'intensità, le quali sono state successivamente aggregate per definire degli intervalli significativi.

Verrà quindi definito un nuovo modello per la previsione dell'agibilità degli edifici in funzione della misura d'intensità che risulterà essere la più efficace in termini di confronto tra le inagibilità predette e le inagibilità osservate.

Il modello si presta alla realizzazione di scenari sismici e risulta particolarmente utile alla stima degli edifici inutilizzabili, alla quantificazione del numero di sfollati e alla stima delle perdite economiche.

## 6 RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare il Dipartimento della Protezione Civile per l'accesso al database di danno e di agibilità relativo al terremoto de L'Aquila del 2009. Questo lavoro è stato in parte sviluppato all'interno del programma "Dipartimento della Protezione Civile – Consorzio RELUIS". Le opinioni espresse in questa pubblicazione appartengono esclusivamente agli autori e non sono necessariamente condivise dal Dipartimento di Protezione Civile.

## BIBLIOGRAFIA

- Baggio, C., Bernardini, A., Colozza, R., Corazza, L., Della Bella, M., Di Pasquale, G., Dolce, M., Goretti, A., Martinelli, A., Orsini, G., Papa, F., Zuccaro, G., 2000. Manuale per la compilazione della scheda di primo livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AEDES). Servizio Sismico Nazionale – Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma.
- Borzi, B., Pinho, R., Crowley, H., 2008. Simplified pushover-based vulnerability analysis for large-scale assessment of RC buildings. *Eng. Struct.* 30, 804–820. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.05.021>
- Braga, F., Dolce, M., Liberatore, D., 1982. A Statistical Study on Damaged Buildings and an Ensuing Review of the MSK-76 Scale, in: Seventh European Conference on Earthquake Engineering. pp. 431–450.
- Calvi, G.M., Pinho, R., Magenes, G., Bommer, J.J., Restrepo-Vélez, L.F., Crowley, H., 2006. Development of seismic vulnerability assessment methodologies over the past 30 years. *ISSET J. Earthq. Technol.* 43, 75–104.
- Coccia, S., Di Carlo, F., Imperatore, S., 2017. Force



- reduction factor for out-of-plane simple mechanisms of masonry structures. *Bull. Earthq. Eng.* 15, 1241–1259. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9976-6>
- Coccia, S., Di Carlo, F., Imperatore, S., 2016. Strength reduction factor for out-of-plane failure mechanisms of masonry walls. *IBMAC* 978–1.
- Colonna, S., Imperatore, S., Zucconi, M., Ferracuti, B., 2017. Post-seismic damage assessment of a historical masonry building: The case study of a school in Teramo, in: *International Conference on Mechanics of Masonry Structures Strengthened with Composites Materials, MuRiCo5, Bologna, Italy, 28-30 June*. Key Engineering Materials, Bologna, pp. 620–627. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.747.620>
- D’Ayala, D., 2013. Assessing the seismic vulnerability of masonry buildings, in: *Handbook of Seismic Risk Analysis and Management of Civil Infrastructure Systems*. pp. 334–365. <https://doi.org/10.1533/9780857098986.3.334>
- D’Ayala, D., Meslem, A., Vamvatsikos, D., Porter, K., Rossetto, T., Crowley, H., Silva, V., 2015. Guidelines for Analytical Vulnerability Assessment - Low/Mid-Rise, GEM Technical Report. <https://doi.org/10.13117/GEM.VULN-MOD.TR2014.12>
- D’Ayala, D., Speranza, E., 2003. Definition of Collapse Mechanisms and Seismic Vulnerability of Historic Masonry Buildings. *Earthq. Spectra* 19, 479–509. <https://doi.org/10.1193/1.1599896>
- Di Ludovico, M., Prota, A., Moroni, C., Manfredi, G., Dolce, M., 2017a. Reconstruction process of damaged residential buildings outside historical centres after the L’Aquila earthquake: part II—“heavy damage” reconstruction. *Bull. Earthq. Eng.* 15, 693–729. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9979-3>
- Di Ludovico, M., Prota, A., Moroni, C., Manfredi, G., Dolce, M., 2017b. Reconstruction process of damaged residential buildings outside historical centres after the L’Aquila earthquake: part I—“light damage” reconstruction. *Bull. Earthq. Eng.* 15, 667–692. <https://doi.org/10.1007/s10518-016-9877-8>
- Dolce, M., Di Bucci, D., 2014. National Civil Protection Organization and technical activities in the 2012 Emilia earthquakes ( Italy ). *Bull. Earthq. Eng.* 12, 2231–2253. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9597-x>
- Dolce, M., Manfredi, G., 2015. *Libro Bianco Sulla Ricostruzione Privata Fuori Dai Centri Storici Nei Comuni Colpiti Dal Sisma Dell’Abruzzo Del 6 Aprile 2009*. Doppiavoce, Napoli.
- Dolce, M., Speranza, E., Giordano, F., Borzi, B., Bocchi, F., Conte, C., Meo, D., Faravelli, M., Pascale, V., 2017. *Da . D . O - Uno strumento per la consultazione e la comparazione del danno osservato relativo ai più significativi eventi sismici in Italia dal 1976 .*, in: *XXVII Convegno ANIDIS-L’Ingegneria Sismica in Italia*. Pistoia, pp. 348–357.
- Drago, C., Ferlito, R., Zucconi, M., 2016. Equivalent damage validation by variable cluster analysis, in: *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.4952053>
- EC8-1, 2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Brussels.
- Erberik, M.A., 2008. Generation of fragility curves for Turkish masonry buildings considering in-plane failure modes. *Earthq. Eng. Struct. Dyn. Eng.* 37, 387–405. <https://doi.org/10.1002/eqe.760>
- Faenza, L., Lauciani, V., Michelini, A., 2011. Rapid determination of the shakemaps for the L’Aquila main shock: a critical analysis. *Boll. di Geofis. Teor. ed Appl.* 52, 407–425. <https://doi.org/10.4430/bgta0020>
- Ferlito, R., Guarascio, M., Zucconi, M., 2013. Assessment of a vulnerability model against post-earthquake damage data: The case study of the historic city centre of L’Aquila in Italy, in: *9th World Conference on Earthquake Resistant Engineering Structures, A Coruna, Spain, 8-10 July*. WIT Transactions on the Built Environment, pp. 393–404. <https://doi.org/10.2495/ERES130321>
- ISTAT, 2011. Istituto Nazionale di Statistica. 15° Censimento generale della popolazione e delle abitazioni [WWW Document].
- Jolliffe, I.T., 2002. *Principal Component Analysis, Second Edition*, 2nd ed. New York.
- Mouyiannou, A., Penna, A., Rota, M., Graziotti, F., Magenes, G., 2014. Implications of cumulated seismic damage on the seismic performance of unreinforced masonry buildings. *Bull. New Zeal. Soc. Earthq. Eng.* 47, 157–170.
- Romano, F., Alam, M.S., Faggella, M., Zucconi, M., Barbosa, A.R., Ferracuti, B., 2019a. Seismic loss analysis of a modern RC building accounting for uncertainty of infill strut modeling parameters, in: *Papadrakakis, M., Fragiadakis, M. (Eds.), COMPDYN 2019 -7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. pp. 24–26.
- Romano, F., Faggella, M., Gigliotti, R., Zucconi, M., Ferracuti, B., 2018. Comparative seismic loss analysis of an existing infilled RC building based on element fragility functions proposals. *Eng. Struct.* 177, 707–723. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.08.005>
- Romano, F., Zucconi, M., Ferracuti, B., 2019b. Seismic fragility curves for RC buildings at territorial scale, in: *Papadrakakis, M., Fragiadakis, M. (Eds.), COMPDYN 2019 -7th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. Crete, Greece, pp. 24–26.
- Rossetto, T., D’Ayala, D., Gori, F., Persio, R., Han, J., Novelli, V., Wilkinson, S.M., Alexander, D., Hill, M., Stephens, S., Kontoe, S., Elia, G., Verrucci, E., Vicini, A., Shelley, W., Foulser-Piggott, R., 2014. The value of multiple earthquake missions: The EEFIT L’Aquila earthquake experience. *Bull. Earthq. Eng.* 12, 277–305. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9588-y>
- Rosti, A., Rota, M., Penna, A., 2018. Damage classification and derivation of damage probability matrices from L’Aquila (2009) post-earthquake survey data. *Bull. Earthq. Eng.* 16, 3687–3720.

- <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0352-6>
- Rota, M., Penna, A., Strobba, C.L., 2008. Processing Italian damage data to derive typological fragility curves. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 28, 933–947. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2007.10.010>
- Sisti, R., Di Ludovico, M., Borri, A., Prota, A., 2018. Damage assessment and the effectiveness of prevention: the response of ordinary unreinforced masonry buildings in Norcia during the Central Italy 2016–2017 seismic sequence. *Bull. Earthq. Eng.* 1–21. <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0448-z>
- Stannard, M., Galloway, B., Brunson, D., Wood, P., Beattie, G., McCarthy, S., Toner, R., Clark, A., Nolan, J., Stoecklein, A., 2014. *Field Guide: Rapid Post Disaster Building Usability Assessment - Earthquakes*. Ministry of Business, Innovation and Employment, Wellington, New Zealand.
- Sun Yang, W., Slejko, D., Viezzoli, D., Gasparo, F., 1989. Seismic risk in Friuli-Venezia giulia: an approach. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 8, 96–105. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(89\)80016-8](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(89)80016-8)
- Whitman, R. V., 1973. Damage probability matrices for prototype buildings. Report 8, R73-57, Structures Publication 380.
- Zucconi, M., Ferlito, R., Sorrentino, L., 2018. Simplified survey form of unreinforced masonry buildings calibrated on data from the 2009 L’Aquila earthquake. *Bull. Earthq. Eng.* 16, 2877–2911. <https://doi.org/10.1007/s10518-017-0283-7>
- Zucconi, M., Ferlito, R., Sorrentino, L., 2018. Verification of a usability model for unreinforced masonry buildings with data from the 2002 Molise, Earthquake, in: *Proceedings of the International Masonry Society Conferences (Ed.)*, 10th International Masonry Conference, IMC, Milan, Italy, 9-11 July. Milano, pp. 680–688.
- Zucconi, M., Sorrentino, L., Ferlito, R., 2017. Principal component analysis for a seismic usability model of unreinforced masonry buildings. *Soil Dyn. Earthq. Eng.* 96, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2017.02.014>