

Valutazione del rischio sismico per la città di Messina, un approccio ad albero logico

M.S. Teramo¹, H. Crowley², G. Cultrera³, A. Cirella⁴, R. Pinho⁵ ■

Sommario

In questo lavoro vengono presentati i risultati di uno studio di rischio sismico condotto per la città di Messina, con lo scopo di valutare l'impatto di un forte terremoto sulla città e di definire possibili scenari di danno in grado di fornire la distribuzione di differenti livelli di danneggiamento all'interno del suo contesto urbano. In considerazione della considerevole quantità di incertezze epistemiche legate alla valutazione del rischio sismico, sono state applicate differenti metodologie per il calcolo della domanda sismica e della vulnerabilità, in modo da produrre una varietà di

risultati che sono stati successivamente combinati statisticamente secondo un approccio ad albero logico. In particolare, per la caratterizzazione della domanda sismica sono state applicate sia leggi di attenuazione che sismogrammi sintetici, mentre la vulnerabilità del costruito, definita in termini di probabilità di superare un determinato stato limite, è stata calcolata applicando metodi di valutazione su larga scala empirici ed analitici. Lo studio ha evidenziato l'alto rischio sismico che caratterizza la città di Messina, causato sia dall'elevato livello di pericolosità sismica che dalla vulnerabilità delle sue costruzioni.

1. Introduzione

La valutazione del rischio sismico di un sito è la sintesi dello studio di diversi elementi: la pericolosità del sito, ovvero la probabilità di eccedere determinati livelli di scuotimento del suolo; l'esposizione, espressa generalmente in termini di edifici, ovvero la quantità, la distribuzione e le caratteristiche degli edifici su di esso costruiti; la vulnerabilità, definita come la propensione degli edifici stessi a subire diversi livelli di danneggiamento in corrispondenza di un dato evento sismico e le perdite, in termini economici e sociali, che il verificarsi di un terremoto comporta. L'insieme di questi parametri consente di definire, per l'area in esame, possibili scenari di danno che risultano molto utili per la stima del rischio sismico di zone popolate da migliaia di edifici, in quanto consentono di individuare le aree edificate maggiormente vulnerabili per le quali l'intervento di adeguamento sismico è da ritenere prioritario rispetto ad altre, e per le quali è quindi necessario procedere a verifiche sismiche ad un livello più dettagliato. Gli scenari di danno rappresentano, inoltre, uno strumento di supporto nella pianificazione urbana del territorio e per la preparazione di piani di gestione d'emergenza post-terremoto, e possono essere utilizzati nella definizione di politiche di assicurazione e di mitigazione della

vulnerabilità del costruito (Calvi, 2006; Pinho *et al.*, 2006).

In questo articolo, viene presentata la valutazione di scenari di danno per la città di Messina che, come è noto, nel 1908 fu colpita da uno dei terremoti più devastanti nella storia d'Europa che provocò il crollo della maggioranza degli edifici della città, causando circa 90000 vittime, tra le città di Messina e Reggio Calabria. Recenti eventi sismici (ad es. il terremoto de L'Aquila) hanno dimostrato come il notevole progresso delle conoscenze scientifiche in questo campo spesso non si accompagni ad un'idonea pratica costruttiva. Bisogna inoltre tener conto del fatto che proprio le conoscenze di oggi hanno portato alla definizione di criteri di progettazione molto più restrittivi rispetto a quelli in vigore trenta/quaranta anni fa, per tale ragione anche edifici più vecchi che risultano comunque progettati secondo criteri antisismici, potrebbero non verificare le prestazioni richieste oggi alle strutture. Sulla base di queste considerazioni, si è quindi ritenuto opportuno valutare, a distanza di più di cento anni da quel disastroso terremoto, quali potrebbero essere le conseguenze per la città di Messina se un evento sismico, con le stesse caratteristiche di quello del 1908, dovesse verificarsi oggi.

¹ Osservatorio Sismologico, Università di Messina - ✉ msteramo@unime.it

² Fondazione GEM - Global Earthquake Model, Pavia - ✉ helen.crowley@globalquakemodel.org

³ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Department of Seismology and Tectonophysics (INGV) Roma - ✉ giovanna.cultrera@ingv.it

⁴ Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Department of Seismology and Tectonophysics (INGV) Roma - ✉ antonella.cirella@ingv.it

⁵ Fondazione GEM - Global Earthquake Model, Pavia - ✉ rui.pinho@globalquakemodel.org

La definizione di tutti i parametri che contribuiscono al calcolo di uno scenario di danno è affetta da numerose incertezze che inevitabilmente si trasferiscono anche nel risultato finale (ad es. individuazione delle caratteristiche degli edifici, della geologia dei siti, degli approcci più adeguati per la valutazione delle vulnerabilità, ecc). È quindi di estrema importanza individuare ed includere nel modello di valutazione di rischio queste incertezze, che possono essere aleatorie o epistemiche. Le prime, di natura casuale, non possono essere ridotte, mentre le seconde, derivando da una conoscenza incompleta o da una carenza di dati, possono essere significativamente diminuite. Si comprende facilmente come un modello che mira a indagare la vulnerabilità di migliaia di edifici in un'area ad alto rischio sismico, sia fortemente influenzato da incertezze epistemiche. Per tale ragione in questo studio è stato applicato un approccio ad albero logico con lo scopo di identificare tali incertezze e di studiare la variabilità dei risultati in relazione al metodo applicato. Lo schema ad albero logico prevede l'impiego di diverse metodologie, alla scelta di ogni metodologia viene attribuito un peso e il risultato finale è rappre-

sentato dalla mediana di tutti i rami dell'albero unitamente ai valori al 16° e 84° percentile. Recenti studi (Molina e Lindholm, 2007) hanno affrontato la valutazione di scenari di danno tramite un approccio ad albero logico, in questi studi, però, non vengono considerati più metodi ma solo relazioni di attenuazione per il calcolo della domanda e il metodo HAZUS per la vulnerabilità, e la variabilità dei risultati viene studiata in relazione alla qualità degli edifici, alla caratteristiche del suolo, e alla legge di attenuazione adottata. Nella procedura proposta sono stati considerati differenti input sismici (sismogrammi sintetici, leggi di attenuazione) e vari metodi noti in letteratura per studi di vulnerabilità sismica su larga scala: metodi empirici quali le matrici di probabilità di danno (DPM) e le Curve di Fragilità (FC) e tra i metodi analitici: DBELA (Crowley *et al.*, 2004), SP-BELA (Borzi *et al.*, 2008), HAZUS (FEMA, 1999: 2003). Nei paragrafi successivi verranno descritte in dettaglio tutte le metodologie applicate. Si precisa, inoltre, che i calcoli e i risultati ottenuti sono riferiti alla città di Messina suddivisa nelle sue sezioni censuarie, come indicato nel Censimento ISTAT della Popolazione e delle Abitazioni del 1991.

2. Pericolosità: Calcolo della domanda sismica

Il calcolo del rischio sismico di un'area urbana e quindi degli edifici che la popolano prevede il confronto tra la capacità degli edifici di resistere ad un terremoto, generalmente espressa in termini di spostamento/deformazione, e la domanda sismica, rappresentata da un livello di intensità dello scuotimento, ed espressa in termini di accelerazione massima al suolo, PGA, accelerazione spettrale ecc.

Lo scuotimento del suolo provocato nel 1908 dal terremoto di Messina è stato rappresentato inizialmente tramite sismogrammi sintetici. Vi sono infatti metodi numerici che, sulla base della conoscenza delle caratteristiche del mezzo di propagazione e della sorgente del terremoto (quali la geometria della faglia, il punto di inizio della rottura e della sua velocità di propagazione), permettono di simulare il movimento del suolo provocato da un evento sismico e quindi di calcolare sismogrammi sintetici per un determinato sito. In questo studio sono stati quindi utilizzati sismogrammi sintetici, generati in diversi punti della città di Messina (Fig. 1), che rappresentano lo scuotimento del suolo provocato da un terremoto di magnitudo $M_w = 7.1$, generato da una faglia, ubicata nello stretto di Messina, la cui geometria (faglia normale lunga 40 km e larga 20 km), posizione (in direzione di strike 30° nord e

con inclinazione di 29° verso sud-est), processo di rottura e modello crostale sono state ricavate dagli studi presenti in letteratura riguardanti il terremoto di Messina del 1908 (quali Pino *et al.*, 2000; Barberi *et al.*, 2004). Tali sismogrammi sono stati derivati nell'ambito del progetto FIRB, 2004: inizialmente sono state simulate onde sismiche a bassa frequenza (lungo periodo) tramite una tecnica di calcolo di sismogrammi sintetici generati dalla rottura della faglia prescelta inglobata in un modello di Terra assegnato (Spudich e Xu, 2003; Cirella *et al.*, 2009). Successivamente, i sismogrammi a bassa frequenza sono stati combinati nel dominio delle frequenze con i contributi ad alta frequenza (Mai *et al.*, 2010). È importante sottolineare che i sismogrammi utilizzati non rappresentano l'unico scenario sismico che si potrebbe verificare in corrispondenza di un terremoto di magnitudo $M_w = 7.1$, ma solo uno scenario tra tante possibili simulazioni (Teramo *et al.*, 2008).

Noti i sismogrammi sintetici in alcuni punti della città, corrispondenti a un terremoto con caratteristiche simili a quello del 1908, sono stati successivamente calcolati gli spettri di risposta in spostamento in corrispondenza del centro di ogni sezione di censimento della città di Messina, per un totale di 898 spettri. I sismogrammi sintetici si riferiscono al bedrock, quindi, per

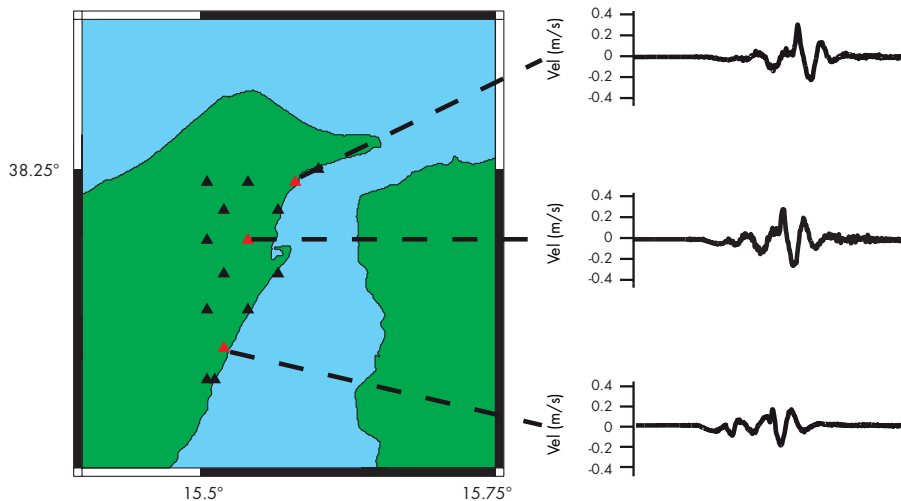


Fig. 1
Sismogrammi sintetici in velocità in tre siti nell'area di Messina, triangoli rossi. (Teramo *et al.*, 2008).

tener conto delle caratteristiche dei terreni superficiali, gli spettri di risposta ottenuti (da qui in poi nominati SynthS) sono stati moltiplicati per dei fattori di amplificazione, $F(T, V_{S30})$ (INGV-DPC Project S5, 2007), funzioni del periodo, T , e della velocità media delle onde di taglio, V_{S30} ; assumendo per la città di Messina un valor medio di $V_{S30} = 240$ m/s, caratteristico dei suoli di categoria C (EC8: CEN, 2004).

La domanda sismica è stata ulteriormente calcolata tramite leggi di attenuazione che restituiscono in un determinato punto lo spettro di risposta in termini di spostamento. In particolare, sono state considerate due leggi: quella di Cauzzi e Faccioli (2008), da qui in poi nominata GMPE1, e quella di Boore e Atkinson (2008), da qui in poi nominata GMPE2. Anche in questo caso gli spettri di risposta in spostamento sono stati determinati in corrispondenza del centro di ogni sezione di censimento, utilizzando la stessa magnitudo e lo stesso ipocentro considerato per la generazione degli accelerogrammi dei sismogrammi sintetici. Viene precisato che, in entrambi i casi, non viene considerata un'incertezza nel valore della magnitudo.

Nella figura 2, che mostra la media degli spettri in

spostamento di tutte le sezioni di censimento calcolati secondo i tre approcci, si può rilevare una differenza tra le ordinate spettrali ad elevati periodi degli spettri in spostamento derivati dalle leggi di attenuazione e quelle dello spettro ricavato dai sismogrammi sintetici, aspetto che potrà influire sul risultato finale, come verrà discusso in seguito.

L'utilizzo di sismogrammi sintetici consente di simulare numericamente tutti i processi fisici che si innescano al verificarsi di una rottura sulla faglia e le proprietà del mezzo entro cui le onde si propagano dalla faglia alla superficie. In questo studio l'esercizio è di ripetere un terremoto con caratteristiche note per valutare, a distanza di un secolo, l'idoneità della città ad eventi di tale portata. Data la complessità dei processi fisici che si cerca di riprodurre unitamente all'impossibilità di prevedere dove e come avverrà un prossimo terremoto, lo studio della pericolosità sismica deterministica ad un determinato sito richiederebbe certamente un approccio di tipo statistico (Cultrera *et al.* 2010). Le leggi di attenuazione, invece, sulla base delle caratteristiche di terremoti noti, cercano di predire lo spostamento spettrale medio atteso in un determinato sito in funzione della magni-

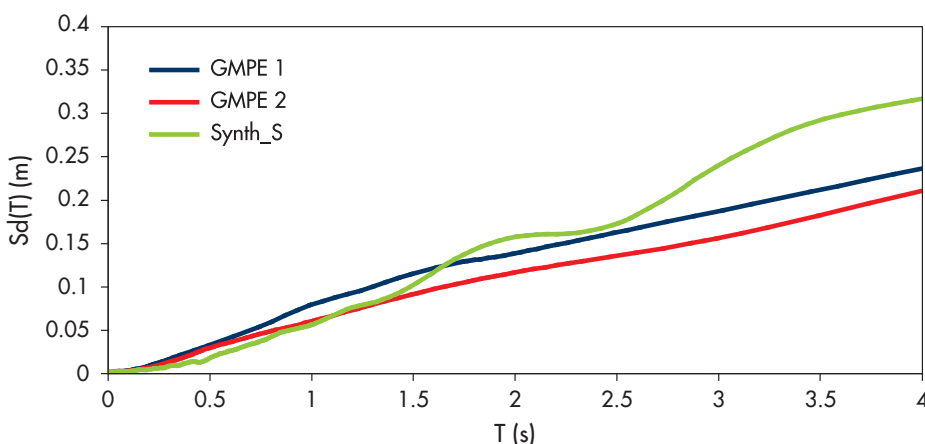


Fig. 2
Confronto tra la media di tutti gli spettri di risposta in spostamento derivati tramite le leggi di attenuazione di Cauzzi e Faccioli (in blu) e di Boore e Atkinson (in rosso) e tramite i sismogrammi sintetici (in verde).

tudo, della distanza epicentrale e di parametri specifici del luogo quali il meccanismo di faglia e la geologia del sito, basandosi però, generalmente, su dati accelerometrici relativi a terremoti registrati in zone diverse rispetto a quelle indagate. Quindi se da un lato, l'utilizzo di sismogrammi sintetici permette di ottenere proprio nel sito di interesse una riproduzione il più possibile

realistica dei processi fisici originati da un evento sismico, dall'altro la loro generazione risulta particolarmente onerosa, soprattutto nel caso in cui si debba adottare una trattazione statistica; mentre, le leggi di attenuazione non modellano la realtà fisica alla base dell'evento ma permettono un calcolo probabilistico più immediato della domanda sismica nell'area di studio.

3. Esposizione: caratterizzazione del costruito della città di Messina

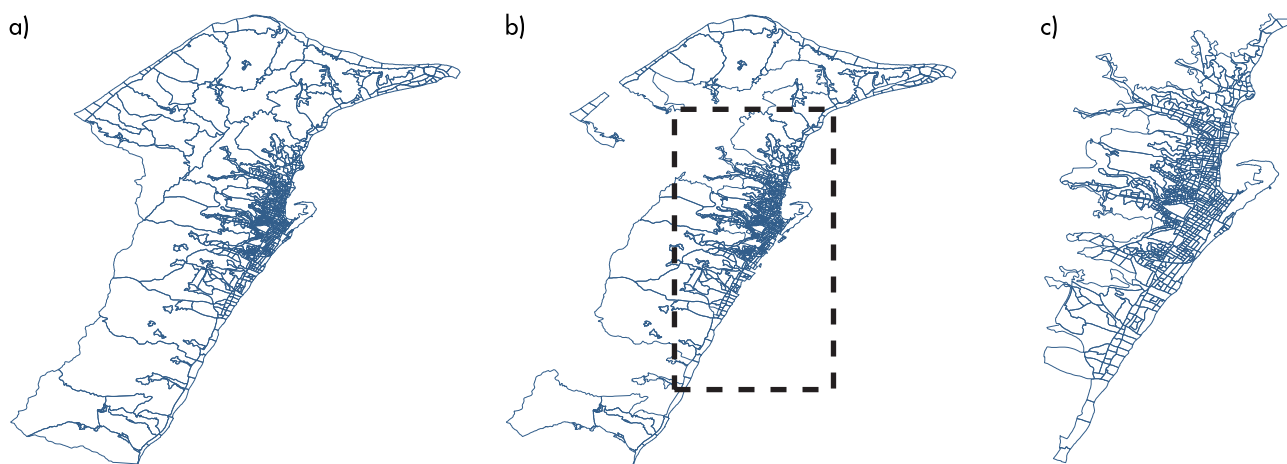
Nota la domanda sismica, le caratteristiche degli edifici della città di Messina, nella sua configurazione più recente, sono state desunte dai dati del censimento ISTAT del 1991. Il censimento fornisce informazioni sugli edifici per ogni sezione censuaria della città, le cui dimensioni variano in relazione alla densità edificatoria, in figura 3a viene riportata la città di Messina suddivisa nelle sue 994 sezioni di censimento. I dati ISTAT riguardano essenzialmente la configurazione in elevazione degli edifici, numero di piani e distribuzione delle tamponature lungo l'altezza (regolare o irregolare), l'anno di costruzione e la struttura portante (muratura o cemento armato). In questo studio non sono stati utilizzati i dati del censimento 2001, certamente più aggiornati, ma non disaggregati ovvero non disponibili per ogni

sezione censuaria ma indistintamente per l'intero comune di Messina.

Viene precisato, inoltre, che i dati ISTAT includono 898 (Fig. 3b) delle 994 sezioni di figura 3a, i risultati si riferiscono quindi a queste sezioni. Le sezioni mancanti sono comunque caratterizzate da una bassa densità edificatoria, quindi non modificherebbero in modo significativo il risultato finale. Le mappe di danno, che verranno presentate al Paragrafo 5, per comodità, mostrano solo l'area centrale della città (Fig. 3c).

La caratterizzazione del costruito di un'area urbana deve partire da un'analisi storica che individui l'evoluzione negli anni delle norme di costruzione. Nell'Aprile del 1909 (RDL, 1909), proprio a seguito del disastroso terremoto di Messina, venne introdotta in Italia la prima classificazione sismica del territorio nazionale e la città di Messina fu sin dall'inizio classificata come zona sismica 1, corrispondente al livello di

Fig. 3
Sezioni censuarie della città
di Messina (Censimento
ISTAT 1991).



pericolosità più alto e per la quale si prevedeva l'obbligo di progettare gli edifici tenendo conto dell'azione sismica rappresentata da forze orizzontali pari a circa il 10% dei carichi verticali. Si è quindi ritenuto che la maggior parte degli edifici in cemento armato della Messina di oggi possano essere considerati progettati simicamente (ovvero caratterizzati dalla presenza di telai in entrambe le direzioni, ma sprovvisti delle specifiche risorse di duttilità richieste dalle più

recenti normative sismiche, si veda il Paragrafo 4.2.1), mentre gli edifici in muratura sono caratterizzati da mattoni pieni o forati tipici della ricostruzione post-terremoto. In relazione alle loro caratteristiche gli edifici sono stati suddivisi in diciotto gruppi: i gruppi da uno a sei includono gli edifici in cemento armato da uno a sei piani tamponati regolarmente, quelli tamponati irregolarmente sono invece rappresentati dai gruppi da sette a dodici, gli ultimi sei gruppi

Tabella 1 - Classi di edifici

Tipologia Costruttiva	Numero di piani	Classe di vulnerabilità
Cemento armato		
Progettato sismicamente	1-6	1-6
Non progettato sismicamente	1-6	7-12
Muratura		
Mattoni tipici della ricostruzione post-terremoto	1-6	13-18

comprendono gli edifici in muratura da uno a sei piani (Tab. 1).

I dati censuari sono sicuramente affetti da errori di trascrizione e computerizzazione e nella maggior parte dei casi il personale addetto alla compilazione delle schede non è costituito da esperti nel campo dell'ingegneria strutturale; quelli del 1991, inoltre, non includono naturalmente tutti gli edifici costruiti successivamente a questa data. Esistono anche alcune incertezze sulla correttezza del numero di edifici riportato per ogni sezione di censimento; recenti studi hanno dimostrato come nella città di Catania i dati censuari del 1991 sovrastimino il reale numeri di edifici per sezione di circa il 10-20% (Frassine e Giovinazzi, 2004). A fronte di queste limitazioni, però, il censimento ISTAT presenta il vantaggio di fornire numerose informazioni che riguardano, tra le altre, anche il volume e lo stato di conservazione degli edifici, insieme al numero di abitanti, e le fornisce ad un livello di aggregazione che è quello della sezione censuaria; non sono infatti disponibili altre banche dati che raccolgano informazioni su migliaia di edifici a questo livello di dettaglio. E quest'ultimo aspetto appare rilevante quando si effettuano studi di vulnerabilità sismica su larga scala per i quali i dati censuari rappresentano un'ade-

guata, se pur approssimata, fonte di informazioni.

È comunque da sottolineare che una conoscenza approfondita di tutti gli edifici della città, che porti alla realizzazione di un database dettagliato ed affidabile con informazioni puntuali sulle singole costruzioni, rappresenta un elemento fondamentale nella valutazione del rischio sismico di un'area e la determinazione di possibili scenari di danno. Tale banca dati può essere gestita in un sistema GIS (Fig. 4), costantemente aggiornabile, che permette di individuare in modo semplice ed immediato le proprietà strutturali di ogni edificio. Un tale progetto, naturalmente, necessita di opportune risorse economiche da destinare a tecnici esperti (architetti, ingegneri ecc.) responsabili della raccolta dati e di indagini da effettuare in situ ed è quindi realizzabile con il supporto delle amministrazioni comunali e regionali.

Nel presente lavoro è stato mosso un primo passo in tale direzione conducendo uno studio dettagliato, basato su disegni e carpenterie originali, di circa trenta edifici della città costruiti in periodi differenti, per i quali sono stati determinati il valor medio e la deviazione standard di importanti parametri strutturali quali le sezioni

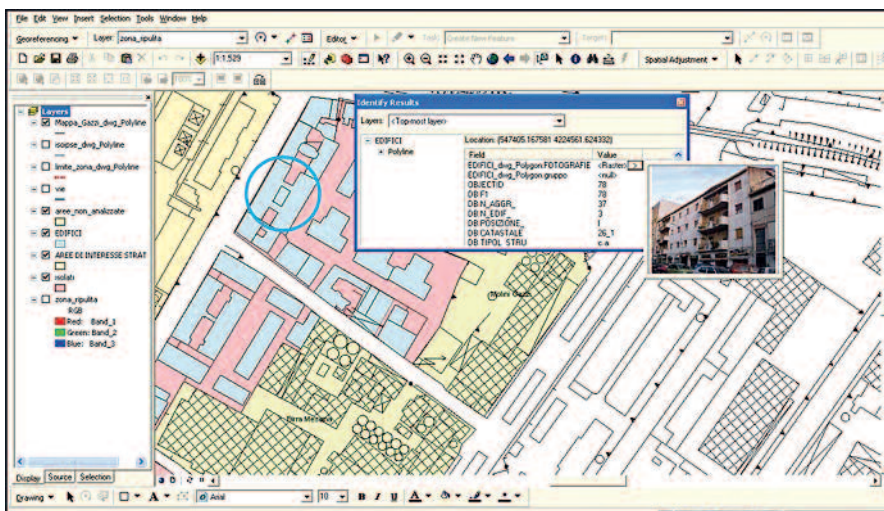


Fig. 4
Mappa della città di Messina con indicazione delle caratteristiche degli edifici implementata su un sistema GIS.

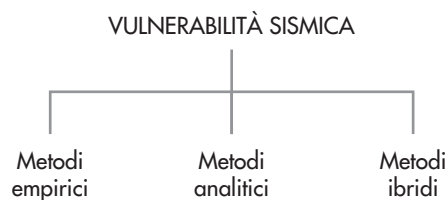
di travi e pilastri, le altezze di interpiano e le dimensioni delle campate. I risultati di questo studio costituiscono i dati di input per il calcolo

della vulnerabilità sismica tramite il metodo analitico basato sugli spostamenti, DBELA, come verrà descritto in dettaglio al paragrafo 4.2.2.

4. Vulnerabilità

Per il calcolo della vulnerabilità sismica degli edifici di Messina, in corrispondenza di un terremoto con caratteristiche simili a quello del 1908, sono stati applicati sette differenti metodi, di cui due empirici (matrici di probabilità di danno e curve di fragilità), tre di tipo analitico (basato sugli spostamenti – SP-BELA e DBELA - e basato sullo spettro di capacità – HAZUS) e due metodi ibridi, in cui i risultati ottenuti per la muratura, tramite le matrici di probabilità di danno, sono stati combinati con quelli ottenuti per il cemento armato, applicando SP-BELA ed HAZUS.

Fig. 5
Metodi per il calcolo della vulnerabilità degli edifici di Messina.



Come già evidenziato in precedenza, la scelta di applicare vari metodi per la determinazione della vulnerabilità deriva dalle numerose incertezze relative al calcolo e dalla considerazione che un solo approccio non possa predire con buona probabilità quello che accadrà al verificarsi di un evento sismico; ne scaturisce quindi la necessità di considerare una pluralità di risultati, studiandone la variabilità in relazione alle metodologie impiegate. Nell'albero logico (paragrafo 5.1) viene rappresentata la procedura applicata per ogni tipo di domanda sismica, unitamente ai pesi attribuiti ai vari rami. I risultati per ogni scenario di danno vengono rappresentati in termini della percentuale di edifici che eccedono tre diversi livelli di danneggiamento definiti come: LS1, stato limite di danno lieve, riferito alla condizione in cui a seguito di un terremoto è possibile usufruire dell'edificio senza necessità di ricondizionamenti o rinforzi; LS2, stato limite di danno severo, che identifica una situazione per la quale l'edificio non può essere utilizzato senza un opportuno intervento di adeguamento; LS3, stato limite di collasso, in corrispondenza del quale l'edificio non è più in grado di sopportare ulteriori carichi verticali o forze laterali, diventando inoltre pericoloso per gli stessi occupanti.

4.1 Metodi Empirici

4.1.1 Matrici di probabilità di danno

Il metodo delle matrici di probabilità di danno (DPM), basato sull'ipotesi che edifici con tipologia costruttiva paragonabile abbiano la stessa probabilità di ricadere in un data fascia di danneggiamento, restituisce, in forma discreta, la probabilità che una determinata classe di edifici riporti un danno di livello j in corrispondenza di un'intensità sismica i , $P[D = j | i]$.

Esistono alcuni svantaggi legati all'applicazione di questo metodo, che riguardano tutti i metodi di tipo empirico, dovuti al fatto che la valutazione della vulnerabilità si basa su danni osservati causati da terremoti precedenti e per la loro determinazione sono quindi necessari molti dati, spesso relativi a terremoti diversi che coprano un ampio intervallo di magnitudo. Inoltre, i danni provocati da terremoti di elevata magnitudo, meno frequenti in aree densamente popolate, tendono a non essere adeguatamente rappresentati dalle matrici. Un altro problema è rappresentato dal parametro intensità macrosismica; le più recenti mappe di pericolosità sismica, infatti, sono definite in termini di PGA e di ordinate spettrali, questo necessita il passaggio da PGA a intensità tramite relazioni empiriche note in letteratura la cui legittimità fisica è spesso oggetto di discussione. Non viene tenuta in considerazione, inoltre, la correlazione tra il contenuto in frequenza del terremoto e il periodo proprio degli edifici.

In questo studio le matrici di probabilità di danno derivate da Dolce *et al.* (2003) sono state applicate per il calcolo dello scenario di danno in corrispondenza di un evento con caratteristiche simili al terremoto del 1908. Tali matrici si basano sui danni osservati negli edifici della città di Potenza a seguito del terremoto del 1990 e forniscono, per quattro classi rappresentative del costruito della città, la probabilità di subire diversi livelli di danneggiamento, in corrispondenza di una data intensità sismica, I_{MSK} . Un vantaggio nell'utilizzo di queste matrici consiste proprio nel loro essere calibrate su dati di edifici costruiti in epoca relativamente recente in una regione italiana che possono ragionevolmente essere considerati rappresentativi di una pratica costruttiva valida anche per la città di Messina. Con riferimento alle classi di vulnerabilità definite nella tabella 2, per la città di Messina si è fatta l'ipotesi che tutti gli edifici in cemento armato siano

Tabella 2 - Definizione della classi di vulnerabilità (Dolce et al., 2003)

Strutture orizzontali	Strutture verticali			
	Muratura di qualità scadente	Muratura di qualità media	Muratura di buona qualità	C.A.
Volte / solai misti a volte	A	A	A	
Travi di legno con/senza travetti	A	A	B	
Solai in acciaio con /senza travetti	B	B	C	
Solai e solette in c.a.	B	C	C	C
Edifici sismoresistenti	D	D	D	D

progettati sismicamente e vengono quindi rappresentati dalla classe D; gli edifici in muratura, invece, ricadono nella classe C. Noto lo spettro di risposta, ovvero la domanda sismica, in ogni sezione di censimento è stata calcolata l'intensità del terremoto in funzione della PGA (Eq. 1), essendo stata assunta la PGA pari allo spettro di risposta in accelerazione per un valore del periodo prossimo a zero. L'equazione (1) di Margottini *et al.* (1992) si riferisce ad un'intensità definita generale, ovvero valutata nella località

più vicina allo strumento di registrazione, che differisce dall'intensità locale, intesa, invece, come l'intensità valutata sulla base di danni alle costruzioni entro un limitato raggio di poche centinaia di metri dallo strumento.

$$I_{MSK} = \frac{1}{0.179} \text{Log} \left(\frac{PGA}{4.864} \right) \quad (1)$$

Noto quindi il valore di I_{MSK} per tutte le sezioni di censimento, in relazione alle caratteristiche degli

Tabella 3 - Matrici di probabilità di danno per le classi di vulnerabilità D e C (Dolce et al., 2003)

Classe di vulnerabilità D						
Intensità	Livello di danno					
	0	1	2	3	4	5
VI	0.900	0.090	0.010	0.000	0.000	0.000
VII	0.715	0.248	0.035	0.002	0.000	0.000
VIII	0.401	0.402	0.161	0.032	0.003	0.000
IX	0.131	0.329	0.330	0.165	0.041	0.004
X	0.050	0.261	0.337	0.276	0.113	0.018

Classe di vulnerabilità C						
Intensità	Livello di danno					
	0	1	2	3	4	5
VI	0.715	0.248	0.035	0.002	0.000	0.000
VII	0.401	0.401	0.161	0.032	0.003	0.000
VIII	0.131	0.329	0.330	0.165	0.041	0.004
IX	0.050	0.206	0.337	0.276	0.113	0.018
X	0.005	0.049	0.181	0.336	0.312	0.116

edifici che le popolano, è stata determinata la probabilità di raggiungere diverse condizioni di danneggiamento. Nella tabella 3 vengono riportate le matrici utilizzate per le classi di vulnerabilità D e C, indicanti, per ogni valore di intensità, la probabilità di avere livelli di danno crescente da zero a cinque. Nelle Tabelle che seguono vengono riportati i risultati ottenuti, in particolare nella tabella 4a viene indicato per alcune sezioni censuarie il numero di edifici che ricadono nelle sei fasce di

danno, mentre la tabella 4b indica la percentuale di edifici che superano i tre stati limite. Per determinare il numero di edifici che superano i tre diversi stati limite: n_{LS1} , n_{LS2} ed n_{LS3} , sono stati combinati i risultati per le fasce di danno, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5 , secondo le seguenti espressioni:

$$\begin{aligned} n_{LS1} &= n_{d2} + n_{d3} + n_{d4} + n_{d5} \\ n_{LS2} &= n_{d3} + n_{d4} + n_{d5} \\ n_{LS3} &= n_{d4} + n_{d5} \end{aligned} \quad (2)$$

Tabella 4 - Risultati del metodo delle matrici di probabilità di danno per la città di Messina e per un terremoto simile all'evento del 1908: a) numero di edifici che ricadono nelle sei fasce di danno per ogni sezione di censimento; b) percentuale di edifici che superano i tre stati limite per ogni sezione di censimento

Numero di edifici con differenti livelli di danno						
Sezione	Livelli di danno					
	0	1	2	3	4	5
Censuaria						
550	8	19	9	10	2	0
562	2	5	3	1	0	0
551	8	19	9	10	2	0
561	3	8	4	1	0	0
552	1	4	2	0	0	0
553	3	9	4	4	0	0
558	2	5	2	0	0	0
554	1	2	1	0	0	0

a)

Percentuali totali (%)			
Sezione	Stati limite		
	LS1	LS2	LS3
Censuaria			
550	38	22	5
562	20	4	0
551	39	22	5
561	20	4	0
552	39	14	3
553	51	25	3
558	33	10	2
554	20	4	0

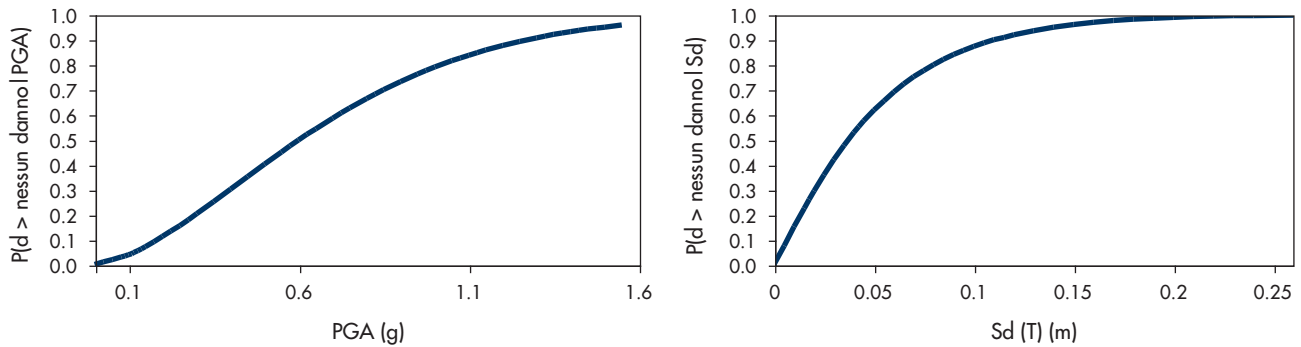
b)

4.1.2 Curve di fragilità

Basate sempre su dati relativi a indagini post-terremoto negli edifici, le curve di fragilità (FC), diversamente dalle matrici di probabilità di danno, forniscono la probabilità che, per un determinato scuotimento del suolo, si verifichi un certo livello di danneggiamento in forma continua, piuttosto che discreta. In questo studio sono state utilizzate le curve di fragilità ottenute da Rossetto e Elnashai (2003) per la valutazione della vulnerabilità degli edifici in cemento armato. Queste curve sono state ricavate sulla base dei danni, osservati a seguito di diversi terremoti, su edifici in cemento armato, la maggior parte dei quali costruiti in Europa. La probabilità che si verifichi un certo livello di danno, $P(d \geq D_{HRC} | GM)$, è legata al parametro che rappresenta lo scuotimento del suolo, GM, tramite la relazione che segue:

$$P(d \geq D_{HRC} | GM) = 1 - \exp(-\alpha GM^\beta) \quad (3)$$

D_{HRC} rappresenta un indice di danno nella scala di danno HRC (Homogenised Reinforced Concrete scale), una scala per edifici in cemento armato omogeneizzata, ovvero capace di descrivere diversi livelli di danneggiamento per varie tipologie strutturali e basata su risultati di test dinamici condotti su edifici in cemento armato. Tale scala descrive il danneggiamento attraverso sei livelli di danno, le stime sono state quindi combinate, similmente a quanto esposto per le matrici di probabilità di danno, in modo da ottenere i risultati per i tre stati limite LS1, LS2, LS3. La variabile GM può essere rappresentata alternativamente dalla PGA oppure dal valore dello spettro di risposta in spostamento, valutato in corrispondenza del periodo proprio di vibrazione della tipologia di edificio in esame, $S_d(T)$. In un metodo empirico la possibilità di poter rappresentare l'azione sismica tramite lo spostamento spettrale rappresenta un notevole vantaggio, proprio perché permette di correlare il contenuto in frequenza del terremoto con il periodo proprio delle strutture.



Noto il valore della PGA e dello spostamento spettrale in corrispondenza del periodo fondamentale di vibrazione (medio) di ogni classe di edifici (Tab. 1), in ogni sezione di censimento, corrispondente alla domanda sismica per un terremoto simile a quello del 1908, dalle curve di fragilità è stata ricavata, in entrambi i casi, la probabilità di superare sei diversi livelli di danno (dal lieve al collasso). I risultati ottenuti per il cemento armato sono stati successivamente combinati con quelli ricavati tramite le matrici di probabilità di danno per le strutture in muratura (paragrafo 4.1.1).

4.2 Metodi analitici

I metodi analitici si basano su algoritmi che consentono di implementare direttamente le caratteristiche degli edifici e della pericolosità del sito in esame, fornendo quindi una valutazione della vulnerabilità chiara e dettagliata e superando la maggior parte dei limiti dei metodi empirici. La domanda sismica è rappresentata da spettri di risposta, facilmente correlabili con le frequenze degli edifici, inoltre è possibile studiare molte classi diverse di costruzioni senza dover disporre di dati su danni osservati e definendo opportunamente le caratteristiche strutturali, e ciò rende i metodi analitici applicabili per studi di vulnerabilità in molte parti del mondo.

È da rilevare, comunque, che i vantaggi connessi all'utilizzo di metodi avanzati spesso si scontrano con l'aumento della quantità di informazioni necessarie per la realizzazione del modello. Per il sito d'interesse, infatti, sono necessari dati riguardanti le tipologie costruttive tipiche, insieme ai materiali (muratura, cemento armato ecc.) e alle caratteristiche strutturali degli edifici, informazioni sulla geologia e sull'attività sismica del luogo. Bisogna inoltre considerare che, basandosi su una modellazione semplificata degli edifici reali, i metodi analitici spesso non tengono conto di aspetti quali l'interazione tra terreno e struttura, gli effetti torsionali, elementi non strutturali o irregolarità strutturali. Tut-

tavia la precisione e la trasparenza di questi metodi ne permette anche una valutazione critica dei risultati e di quanto questi siano influenzati dai dati a disposizione, dal livello di incertezza e dalle ipotesi alla base del metodo. In questo studio si è scelto di applicare due metodi analitici basati sugli spostamenti, SP-BELA e DBELA, ed uno basato sul metodo dello spettro di capacità, HAZUS.

4.2.1 Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment (SP-BELA)

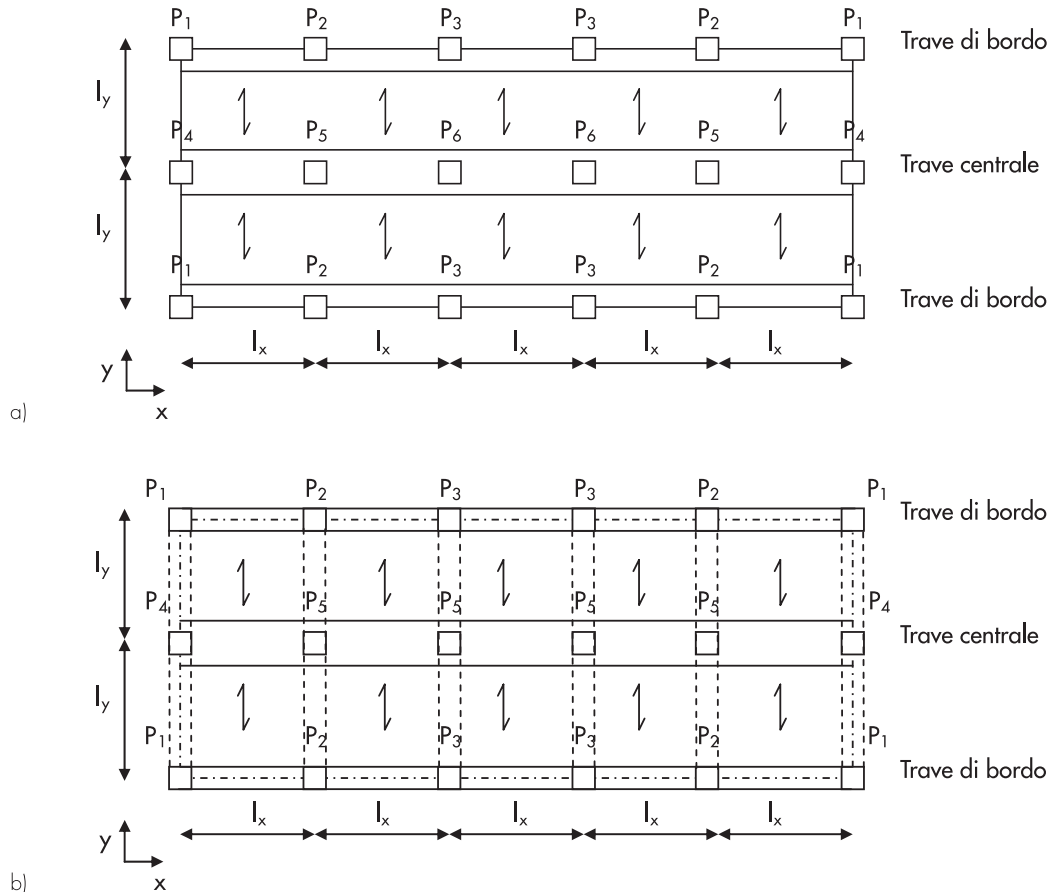
Questo metodo rientra nella classe dei metodi analitici che si fondano sui principi della progettazione basata sugli spostamenti piuttosto che sulle forze (Priestley, 2003) e che nascono dalla considerazione che gli spostamenti subiti rappresentano il principale rilevatore di danno di una struttura. Secondo questa metodologia di valutazione, una struttura a più gradi di libertà, appartenente ad una classe con determinate proprietà geometriche e dei materiali, viene modellata come un sistema a un singolo grado di libertà per il quale, per un dato stato limite, vengono considerati diversi profili di spostamento, in relazione al meccanismo di collasso (Calvi, 1999).

In particolare il metodo SP-BELA, Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment (Borzi *et al.*, 2008), si basa su una procedura che prevede il calcolo del moltiplicatore di collasso della struttura tramite un'analisi pushover semplificata; noto il moltiplicatore e lo spostamento allo snervamento, vengono quindi determinati la rigidità e il periodo della struttura. Il calcolo della capacità in spostamento post snervamento si affida, invece, ad espressioni derivate nell'ambito della progettazione basata sugli spostamenti e che sono funzione del meccanismo di collasso, della geometria degli elementi strutturali, dei materiali e dell'altezza dell'edificio stesso.

La vulnerabilità sismica dell'edificio viene quindi ricavata, per i tre stati limite, dal confronto tra la sua capacità in spostamento e la domanda, rappresentata da spettri di risposta in spostamento.

Fig. 6
Curve di Fragilità di danno lieve in funzione della PGA e dello spostamento spettrale (Rossetto e Elnashai, 2003).

Fig. 7
Pianta di edifici prototipo in cemento armato
a) non progettato sismicamente e b) progettato sismicamente, ritenuti rappresentativi di una tipologia strutturale tipica dei paesi Mediterranei.



Questo procedimento viene ripetuto per una popolazione di edifici, basati su un edificio prototipo rappresentativo della pratica costruttiva locale. Una simulazione Monte Carlo è impiegata per la generazione casuale della popolazione e per ogni edificio viene effettuato un progetto simulato (alle tensioni ammissibili in questo caso) che ne definisce la geometria di travi e pilastri insieme ai dettagli dell'armatura. Gli edifici non progettati sismicamente presentano telai in una sola direzione (Fig. 7a); telai in entrambe le direzioni, x e y, caratterizzano invece gli edifici progettati sismicamente per i quali viene anche considerata una forza orizzontale pari ad una percentuale, c , del peso della struttura (nel caso degli edifici di Messina questa percentuale è pari al 10%), figura 7b. Per quanto riguarda gli edifici in muratura la progettazione simulata consente di modellare strutture in pietra naturale, in mattoni con alta o bassa percentuale di fori, basandosi su valori medi di parametri caratteristici di queste tipologie strutturali quali l'altezza d'interpiano, la massa dei solai, la percentuale di muratura sulla facciata dell'edificio ecc. (Borzi *et al.*, 2008a).

Viene quindi fornita dalla metodologia la percentuale di edifici della popolazione che superano i diversi stati limite, definita come il rap-

porto tra il numero di edifici con capacità minore della domanda diviso per il numero totale di edifici del campione (Fig. 8). È da sottolineare, infine, che alcune caratteristiche degli edifici della popolazione, quali le proprietà dei materiali, la lunghezza delle campate, l'altezza di interpiano e i carichi, sono descritte da variabili casuali con una distribuzione probabilistica appropriata. Una variabilità è associata anche allo spettro di domanda sismica, essa tiene conto dei valori di variabilità generalmente associati alle leggi di attenuazione e delle incertezze connesse alla limitata conoscenza delle caratteristiche dei suoli della città di Messina. Per ognuna delle classi di edifici definite al Paragrafo 3 (dodici classi per il cemento armato e sei per la muratura), che riassumono le caratteristiche del costruito della Messina di oggi, è stata quindi generata una popolazione casuale di edifici. Ogni sezione di censimento include strutture che possono appartenere a classi diverse; il confronto tra la capacità di ogni classe, calcolata dalla metodologia SP-BELA, e gli spettri di risposta in spostamento, rappresentativi di un terremoto paragonabile a quello del 1908, permette di determinare, per ogni sezione di censimento, il numero di edifici che superano tre diversi stati limite (LS1, LS2 ed LS3).

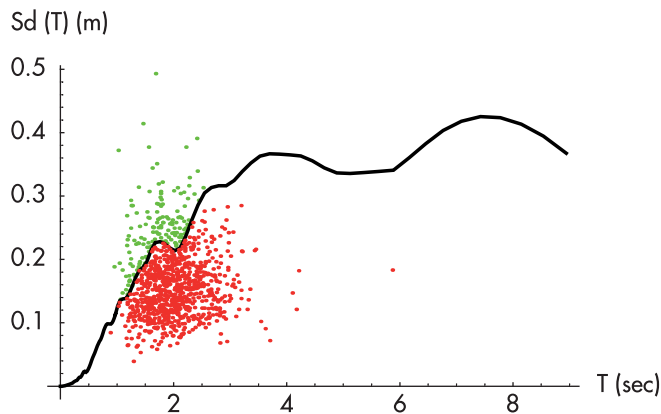


Fig. 8
Confronto tra lo spettro di risposta in spostamento ricavato da sismogrammi sintetici (in nero) e la capacità di una popolazione di mille edifici in cemento armato progettati sismicamente tamponati regolarmente a due piani. I punti verdi indicano una capacità superiore alla domanda, mentre i rossi una capacità inferiore.

4.2.2 Displacement-Based Earthquake Loss Assessment, (DBELA)

Basata sempre sugli spostamenti anche la metodologia DBELA, Displacement-Based Earthquake Loss Assessment (Crowley *et al.*, 2004), sfrutta la generazione casuale di una popolazione di edifici per modellare la variabilità delle caratteristiche strutturali all'interno di una classe. Creato il campione di edifici, il periodo e la capacità in spostamento ai tre stati limite vengono calcolati tramite relazioni empiriche funzioni dell'altezza dell'edificio e delle proprietà dei materiali, diversamente da SP-BELA in cui ogni edificio del campione viene progettato e la capacità in spostamento viene ricavata da un'analisi pushover semplificata. Non essendo quindi possibile, in DBELA, conoscere il reale meccanismo di collasso della struttura in esame, il metodo formula delle ipotesi sui possibili meccanismi di collasso, in particolare per edifici in cemento armato progettati sismicamente è previsto un meccanismo di collasso a trave debole. Un piano debole al primo piano generato da un meccanismo a pilastro debole, invece, è l'ipotesi fatta per gli edifici non progettati sismicamente. Espressioni che legano l'altezza dell'edificio al periodo permettono di esprimere la capacità in spostamento della struttura in funzione proprio del periodo e quindi, anche in questo caso, è possibile un confronto diretto tra capacità e domanda, rappresentata sempre da spettri di risposta in spostamento.

La procedura include una trattazione probabilistica che permette di tener conto delle incertezze legate alla valutazione della domanda sismica unitamente a quelle riguardanti l'effettiva capacità in spostamento, incertezze che inevitabilmente si presentano quando viene studiato un vasto numero di edifici, che possono avere differenti proprietà geometriche e dei materiali. La metodologia consente di modellare edifici in cemento armato ed edifici in muratura non armati con meccanismi di collasso fuori o dentro il proprio piano (Crowley e Pinho,

2006). In particolare, con riferimento alla capacità, parametri quali la lunghezza e l'altezza delle travi, l'altezza di interpiano e la geometria dei pilastri vengono descritti da un'opportuna distribuzione probabilistica (generalmente normale o lognormale) caratterizzata da una propria media e deviazione standard.

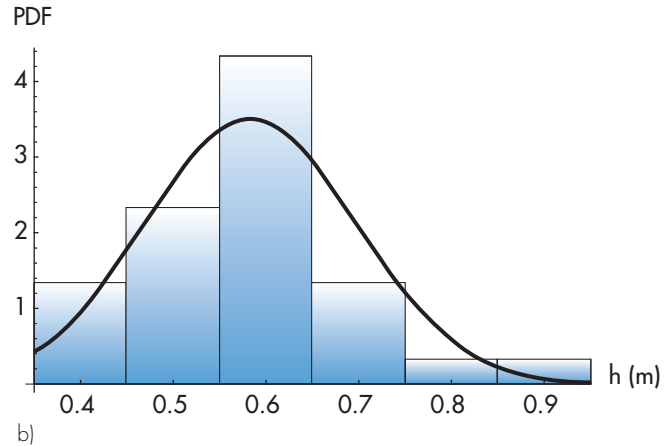
Come già menzionato, per la città di Messina è stato condotto uno studio approfondito di circa trenta edifici distribuiti sul territorio e realizzati in epoche differenti. Per questi edifici è stata determinata la media e la deviazione standard di alcuni parametri strutturali, i cui valori vengono riportati nella figura 9a, ed è stata definita, per ognuno di questi, la distribuzione probabilistica che descrivesse in modo opportuno il campione considerato.

I valori riportati nella figura 9a rappresentano i dati di input per la metodologia DBELA, la figura 9b invece mostra le proporzioni dell'altezza delle travi nel campione di edifici di Messina e la distribuzione probabilistica scelta per rappresentarla. Per quanto riguarda le proprietà dei materiali del campione di edifici generato, sia in DBELA che in SP-BELA, queste vengono attribuite casualmente scegliendo tra valori della tensione di snervamento dell'acciaio compresi tra 380 MPa e 440 MPa, e valori di resistenza cubica caratteristica del calcestruzzo di 25 MPa, 30MPa e 35 MPa (Borzi *et al.*, 2008).

Per quanto riguarda la variabilità aleatoria della domanda, allo spettro di risposta è stata associata la stessa variabilità considerata per il metodo SP-BELA. La vulnerabilità, infine, viene sempre definita come la probabilità che la domanda sia maggiore della capacità. Anche in questo caso si perviene ad un risultato che indica per ogni sezione censuaria la percentuale di edifici che eccedono i tre stati limite; LS1, LS2 ed LS3. Da quanto esposto si può notare come la metodologia DBELA richieda in fase di implementazione un numero maggiore di informazioni,

Fig. 9
 a) Valori medio e deviazione standard dei parametri strutturali di un campione di edifici di Messina;
 b) istogramma dell'altezza delle travi, h , e distribuzione normale suggerita.

Parametro	μ (m)	σ (m)
lunghezza pilastro	0.64	0.16
altezza trave	0.58	0.11
lunghezza trave	4.55	0.88
altezza interpiano	3.37	0.46
altezza 1° piano	3.37	0.46



a)

b)

rispetto al metodo SP-BELA; è infatti necessario conoscere dati statistici riguardanti le caratteristiche degli edifici dell'area urbana oggetto di studio, dovendo inoltre assumere a priori il possibile meccanismo di collasso che interesserà le diverse classi di edifici. Questo aspetto che in prima analisi potrebbe apparire come una limitazione del metodo, in realtà toglie genericità alla procedura, conferendole un carattere locale e contestualizzandola nel sito in cui si sta conducendo lo studio di vulnerabilità.

4.2.3 HAZUS

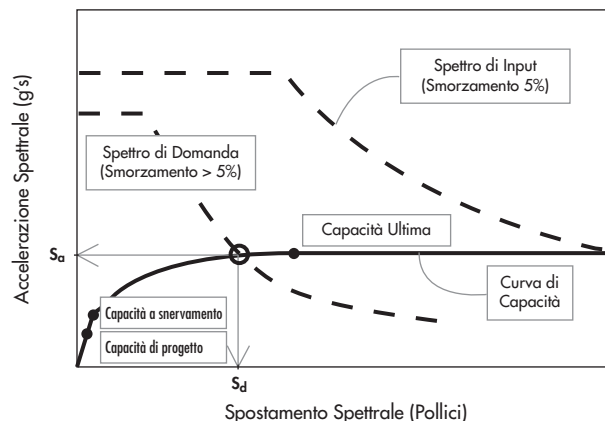
Secondo il metodo HAZUS (FEMA, 1999; 2003) l'intersezione tra uno spettro in accelerazione o spostamento, che rappresenta lo scuotimento del suolo, e uno spettro di capacità, la curva di capacità derivata da un'analisi pushover che descrive lo spostamento orizzontale della struttura per effetto di un carico laterale crescente, fornisce il "performance point" della struttura, ovvero lo spostamento ad essa richiesto in corrispondenza di un dato evento sismico (Fig. 10). Questo performance point rappresenta lo spostamento da immettere nelle curve di fragilità per determinare la probabilità di superare un certo livello di danno.

Le curve di capacità presenti nel manuale di

HAZUS si riferiscono esclusivamente a edifici progettati e costruiti negli Stati Uniti, per tale ragione in questo studio si è scelto di utilizzare la metodologia HAZUS basandosi però sulle curve di capacità precedentemente calcolate con i metodi SP-BELA e DBELA, le prime tengono conto di una pratica costruttiva tipicamente italiana, mentre le seconde si basano su dati statistici raccolti per un campione di edifici di Messina. La scelta di tale approccio ha permesso da un lato di inquadrare la metodologia HAZUS nell'area in cui si sta operando (un risultato basato su curve di capacità ricavate per edifici negli Stati Uniti sarebbe stato incoerente), dall'altro ha consentito di effettuare un confronto tra il calcolo della capacità di una classe di edifici, secondo i due metodi basati sugli spostamenti (SP-BELA e DBELA), valutando quindi in che modo questo influenzi il risultato finale (si veda Fig. 11).

Per quanto concerne le curve di fragilità, è stato seguito l'approccio di HAZUS considerando però come valori di spostamento che comportano il superamento dei tre stati limite, quelli medi derivati rispettivamente in SP-BELA e DBELA. Le curve, che seguono una distribuzione log-normale caratterizzata dalla deviazione standard indicata nel manuale di HAZUS in relazione allo

Fig. 10
 Metodo dello spettro di capacità, alla base del metodo HAZUS (FEMA, 1999:2003).



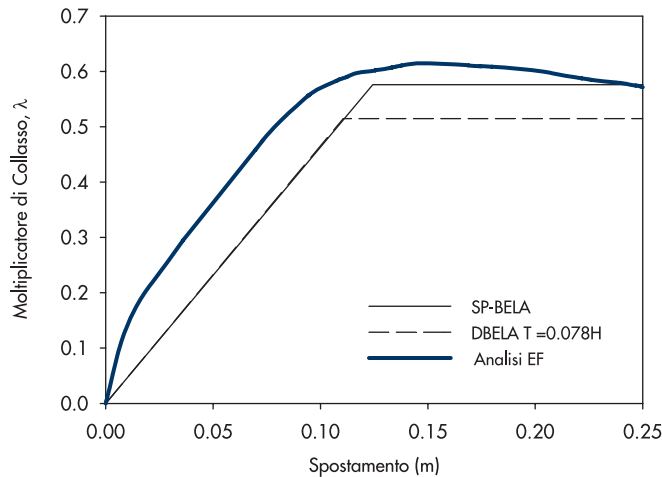


Fig. 11
Confronto tra le curve di capacità di un edificio in cemento armato progettato sismicamente calcolate secondo il metodo SP-BELA, DBELA e l'analisi ad elementi finiti (Crowley *et al.*, 2008).

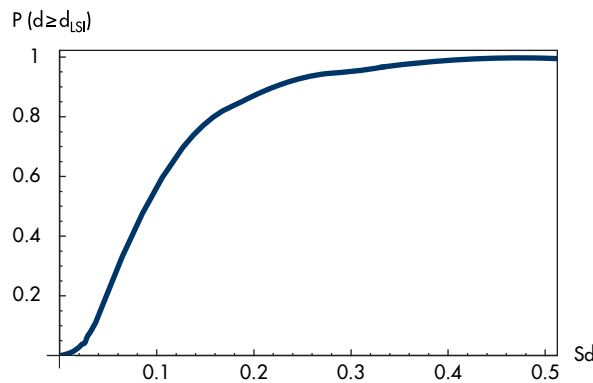


Fig. 12
Curva di fragilità, $P(d > d_{LS1})$, per un edificio a quattro piani tamponato regolarmente e progettato sismicamente.

stato limite e all'altezza dell'edificio, per un determinato valore della domanda sismica, S_d , restituiscono la probabilità che si verifichi uno spostamento maggiore di quello che provoca il superamento dei diversi stati limite (Fig. 12).

È da sottolineare che questo metodo può risultare oneroso dal punto di vista computazionale, in quanto nella fase di determinazione del performance point, che viene effettuata per via iterativa, possono presentarsi problemi di convergenza che vanno risolti caso per caso. Si comprende quindi come il calcolo possa diventare problematico per studi su larga scala, in cui si considera la capacità di diverse classi di edifici e la domanda sismica è rappresentata da centinaia di spettri risposta.

4.3 Metodi Ibridi

La combinazione tra dati riguardanti danni osser-

vati e dati relativi a danni derivati analiticamente su modelli matematici delle strutture, fa dei metodi ibridi un approccio molto vantaggioso per studi di vulnerabilità, soprattutto nel caso in cui per il sito in esame non siano disponibili molte informazioni su danni osservati per effetto di terremoti di elevata intensità o per alcune tipologie di edifici. Pur permanendo molti dei limiti legati ad entrambi i metodi empirici e analitici, l'utilizzo dei metodi ibridi riduce l'onere computazionale richiesto per la calibrazione di un modello interamente analitico. Il metodo empirico delle matrici di probabilità di danno per il calcolo della vulnerabilità della muratura abbinato al metodo analitico HAZUS (con le curve di capacità di SP-BELA, paragrafo 4.2.3) ed al metodo analitico SP-BELA sono i metodi ibridi scelti per calcolare due ulteriori scenario di danno per la città di Messina.

5. Analisi di rischio

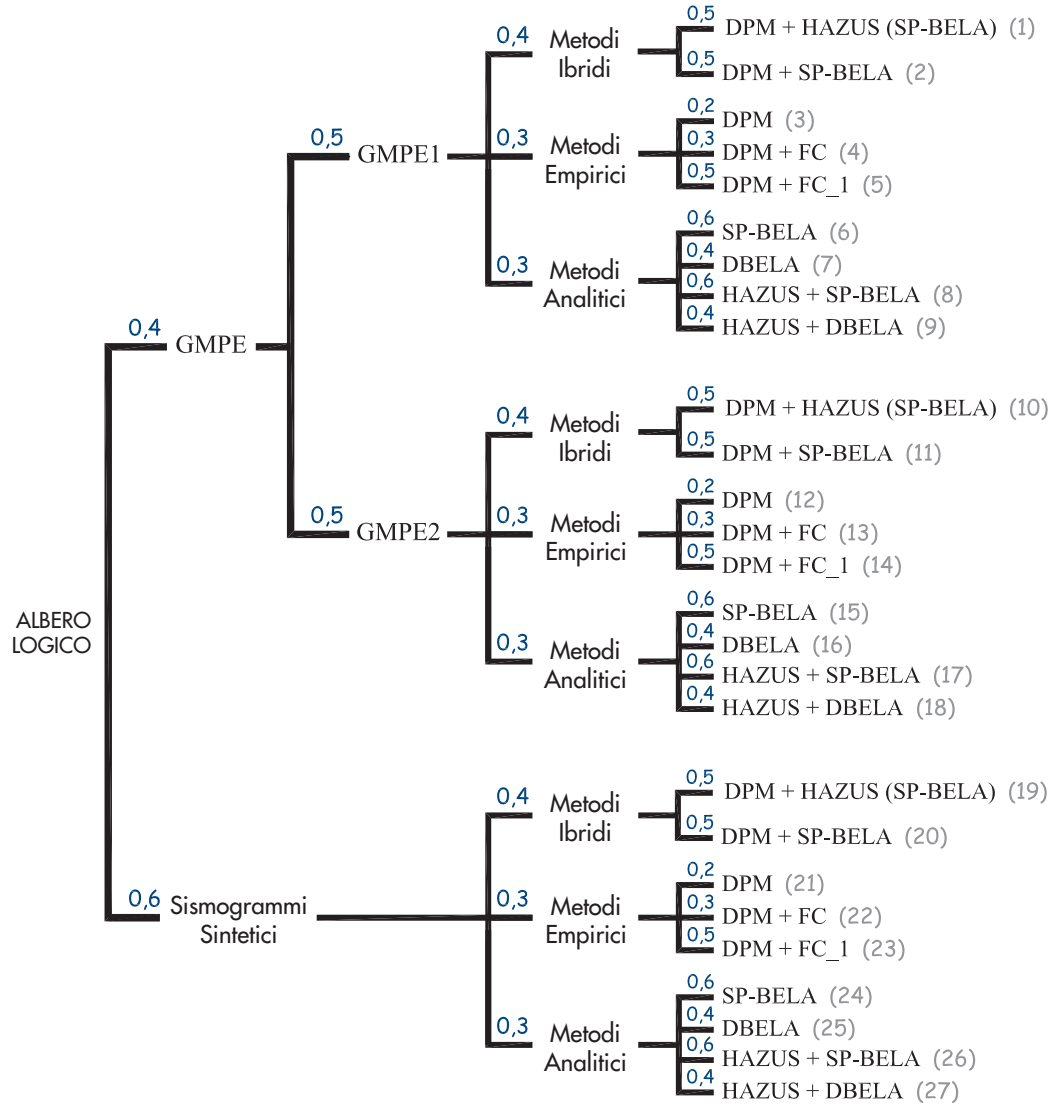
5.1 Descrizione dell'albero logico e risultati

In questo Paragrafo vengono descritti i criteri di attribuzione dei pesi ai vari rami dell'albero logico, riportato in figura 13, ed i risultati ottenuti per lo scenario di danno della città di Messina per effetto di un terremoto con caratteristi-

che simili a quello del 1908.

Partendo dalla definizione della domanda sismica, un peso sensibilmente maggiore è stato assegnato alla scelta dei sismogrammi sintetici piuttosto che le leggi di attenuazione, in quanto i sismogrammi sintetici rappresentano una riproduzione il più possibile reale dell'evento sismico,

Fig. 13
Schema di calcolo ad albero logico per la valutazione della vulnerabilità sismica e relativa legenda con indicazione dei pesi per ogni ramo (in blu) e la numerazione di ogni ramo (in grigio).



Legenda	
HAZUS	(SP-BELA) HAZUS (basato sulle curve di capacità di SP-BELA), (si veda Paragrafo 4.2.3)
HAZUS	(DBELA) HAZUS (basato sulle curve di capacità di DBELA), (si veda Paragrafo 4.2.3)
FC	Curve di fragilità basate sulla PGA, (si veda Paragrafo 4.1.2)
FC_1	Curve di Fragilità basate sullo spostamento spettrale Sd (T), (si veda Paragrafo 4.1.2)
DPM	Matrici di Probabilità di Danno, (si veda Paragrafo 4.1.1)
DPM + FC	DPM per la vulnerabilità degli edifici in muratura e FC per la vulnerabilità degli edifici in cemento armato, (si veda Paragrafo 4.1.2)
DPM + FC_1	DPM per la vulnerabilità degli edifici in muratura e FC_1 per la vulnerabilità degli edifici in cemento armato, (si veda Paragrafo 4.1.2)
DPM + SP-BELA	DPM per la vulnerabilità degli edifici in muratura e SP-BELA per la vulnerabilità degli edifici in cemento armato, (si veda Paragrafo 4.3)
DPM + HAZUS (SP-BELA)	DPM per la vulnerabilità degli edifici in muratura e HAZUS (SP-BELA) per la vulnerabilità degli edifici in cemento armato, (si veda Paragrafo 4.3)
GMPE1	Legge di attenuazione di Cauzzi e Faccioli (2008)
GMPE2	Legge di attenuazione di Boore e Atkinson (2008)

Tabella 5 - Percentuale totale di edifici della città di Messina che superano i tre stati limite, a) per ogni ramo dell'albero logico; b) espressa in termini di mediana, 16° e 84° percentile

Rami dell'albero logico	LS1 %	LS2 %	LS3 %	Rami dell'albero logico	LS1 %	LS2 %	LS3 %
1	45	23	13	15	30	20	11
2	38	26	13	16	48	23	12
3	53	26	8	17	33	14	8
4	25	14	5	18	48	21	14
5	37	17	6	19	58	35	22
6	40	32	22	20	54	38	25
7	60	35	23	21	62	29	8
8	44	23	14	22	26	15	5
9	60	32	24	23	45	20	6
10	37	16	7	24	52	44	38
11	34	17	6	25	69	51	45
12	50	22	5	26	55	33	24
13	23	11	3	27	89	75	68
14	34	14	3				

a)

Stati limite	Percentile	Percentuale di edifici
LS1	16°	34
	50°	50
	84°	57
LS2	16°	15
	50°	26
	84°	37
LS3	16°	5
	50°	13
	84°	25

b)

tenendo comunque presente che un approccio rigoroso richiederebbe la considerazione di più modelli per la sorgente e quindi una trattazione statistica.

Nella fase di scelta del metodo di valutazione della vulnerabilità il peso maggiore è stato assegnato al metodo ibrido capace di coniugare i vantaggi delle singole metodologie. Le matrici di probabilità di danno, infatti, tendono a rappresentare meglio il comportamento di strutture in muratura proprio perchè i dati su cui esse si basano riguardano maggiormente danni osservati su edifici in muratura (Colombi *et al.*, 2008). Mentre il metodo analitico HAZUS, basato sulle curve di capacità ricavate con SP-BELA ed SP-BELA stesso, appaiono le procedure più appropriate per lo studio della risposta degli edifici in cemento armato per i motivi già evidenziati ai paragrafi precedenti. I vantaggi e limiti dei metodi analitici ed empirici, già discussi precedentemente, sono tali da non poter stabilire a priori quale procedura sia più affidabile per la valutazione della vulnerabilità degli edifici, considerazione che conduce al conferimento dello stesso peso ai due metodi.

Nell'ambito dei metodi analitici basati sugli spo-

stamenti, nonostante la modellazione di DBELA si basi sulle caratteristiche strutturali medie di edifici di Messina, il metodo presenta nell'albero logico un peso minore rispetto al corrispettivo SP-BELA, perchè il periodo proprio di vibrazione della struttura viene calcolato attraverso relazioni empiriche e non tramite un'analisi pushover (come accade invece in SP-BELA) e da ciò può conseguire una sottostima della rigidità dell'edificio in esame.

Sommando, per tutte le sezioni censuarie della città di Messina, i risultati ottenuti con ogni procedura, e quindi per ogni ramo dell'albero logico, e calcolandone la mediana si perviene alla definizione di uno scenario di danno che indica la percentuale di edifici della città che supera tre diversi stati limite. In particolare, si è ottenuto che, per la città di Messina in corrispondenza di un evento simile al terremoto del 1908: il 45% di edifici superano lo stato limite di danno lieve, il 23% lo stato limite di danno severo, mentre il 12% degli edifici raggiungono il collasso (valori mediani). Nella tabella 5a vengono riportati i risultati per ogni ramo (per il numero del ramo si faccia riferimento alla Fig. 13), la tabella 5b invece mostra i valori di per-

Fig. 14
Funzione di distribuzione cumulativa, FDC, dei risultati per i tre stati limite.

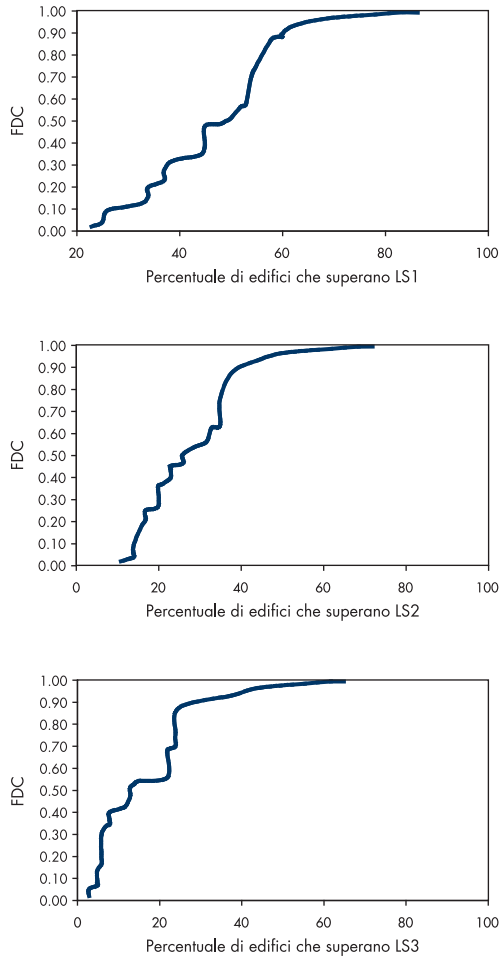


Fig. 15
Mappe di danno che indicano, per ogni sezione di censimento, la percentuale mediana di edifici che superano a) lo stato limite di danno lieve, LS1, b) lo stato limite di danno severo, LS2 e c) lo stato limite di collasso, LS3.

centuale mediani insieme alle stime al 16° e 84° percentile. Inoltre, per i tre stati limite sono state determinate le funzioni di distribuzione cumulativa, FDC (Fig. 14), che quantificano la variabilità delle stime, fornendo la probabilità di avere una specifica percentuale di edifici danneggiati

per ogni stato limite e per un terremoto con caratteristiche simili a quello del 1908.

Da un'analisi delle stime di danno riportate in tabella 5b, è possibile rilevare l'influenza delle incertezze epistemiche sui risultati, che conduce ad un variabilità delle stime particolarmente evidente per lo stato limite di collasso, per il quale il valore mediano della percentuale di edifici collassati è circa il doppio della rispettiva stima al 16° percentile ed è la metà del valore per l'84° percentile.

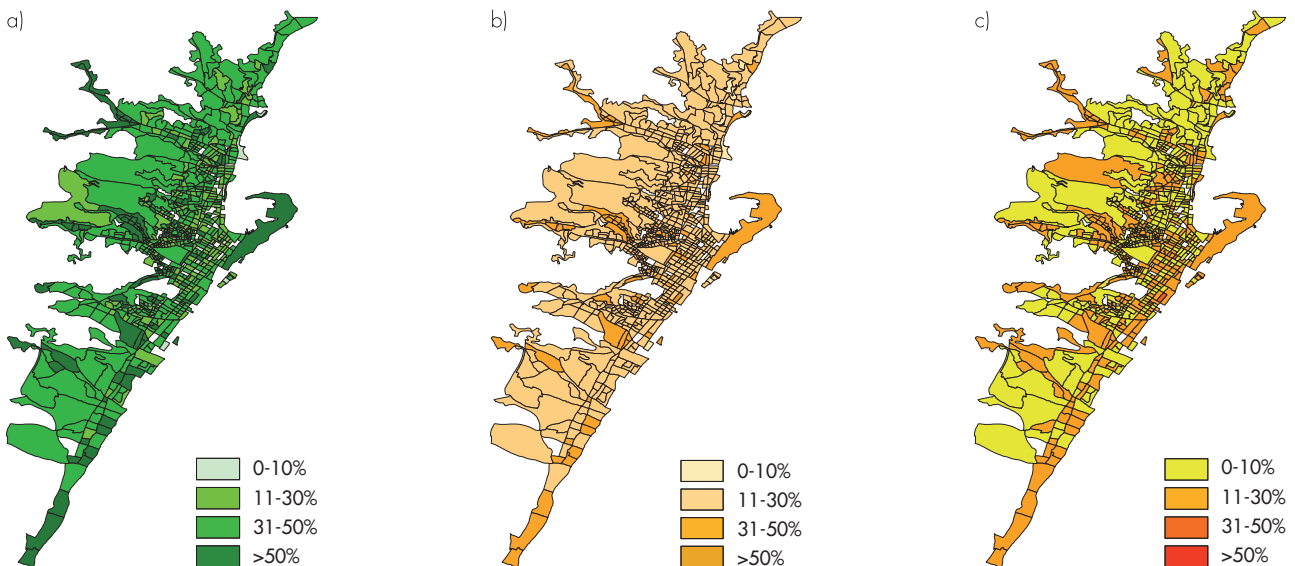
Disponendo delle percentuali di edifici che superano i tre stati limite per ogni sezione di censimento, è possibile realizzare delle mappe che consentono di valutare la distribuzione del danno all'interno del territorio cittadino e di individuare quindi le aree maggiormente vulnerabili, per le quali è necessario procedere con verifiche dei singoli edifici (Fig. 15). Le mappe sono anche uno strumento utile nella gestione della fase post-evento, quella per lo stato limite di collasso, per esempio, permette di capire quali aree possano essere interessate da crolli e quindi quali strade potrebbero essere non transibili dai mezzi di soccorso.

5.2 Sensibilità alle variabili del modello

Sulla base delle stime di danno calcolate nel paragrafo precedente, è stata eseguita un'analisi di sensibilità dei risultati alle variazioni nei parametri di input. In particolare, viene descritta la variabilità indotta dalla definizione della domanda e dal metodo impiegato per la valutazione della vulnerabilità.

5.2.1 Sensibilità alla definizione della domanda

La figura 16 mostra le variazioni indotte nei



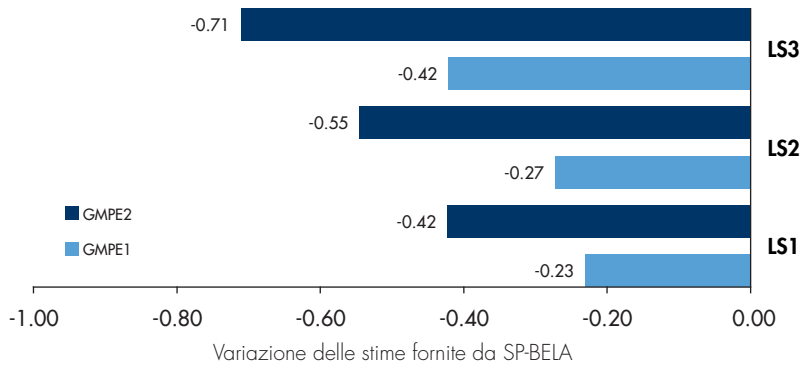


Fig. 16
Variazione percentuale della quantità di edifici che superano i tre stati limite (calcolata tramite SP-BELA), rispetto al modello base (basato sugli spettri di domanda derivati dai sismogrammi sintetici), quando vengono applicate le leggi di attenuazione per il calcolo degli spettri di domanda.

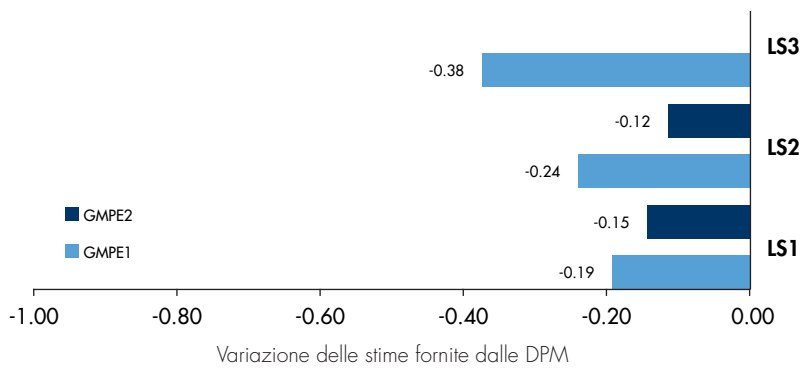


Fig. 17
Variazione percentuale della quantità di edifici che superano i tre stati limite (calcolata tramite le DPM), rispetto al modello base (basato sugli spettri di domanda derivati dai sismogrammi sintetici), quando vengono applicate le leggi di attenuazione per il calcolo degli spettri di domanda.

risultati, ottenuti tramite SP-BELA, cambiando gli spettri di domanda. Si può notare come si riscontrino una differenza significativa nei risultati ricavati utilizzando gli spettri di risposta derivati da sismogrammi sintetici e quelli calcolati tramite le leggi di attenuazione. L'utilizzo degli spettri di risposta derivati da sismogrammi sintetici (spettri sintetici, SynthS) conduce, infatti, a percentuali maggiori rispetto agli spettri di risposta ottenuti con le leggi di attenuazione (spettri GMPE2 e spettri GMPE1). Questo risultato riflette in parte la tendenza dei sismogrammi sintetici a fornire spettri di risposta, che, in molti casi (molte sezioni di censimento) risultano diversi dalle ordinate spettrali ricavate tramite le leggi di attenuazione (Fig. 2).

È interessante notare come tale differenza risulti più evidente per i metodi analitici, nei quali la forma dello spettro di risposta influenza maggiormente il risultato finale, in quanto, come spiegato nei paragrafi precedenti, la percentuale di edifici che superano gli stati limite viene calcolata sulla base di un confronto diretto tra capacità e domanda in spostamento. Invece, per i metodi empirici, ed in particolare il metodo delle Matrici di Probabilità di Danno (DPM), che utilizza un unico parametro per descrivere l'entità del terremoto, intensità macrosismica o PGA, questa differenza non appare così rilevante (Fig. 17). Quindi, in questo caso, utiliz-

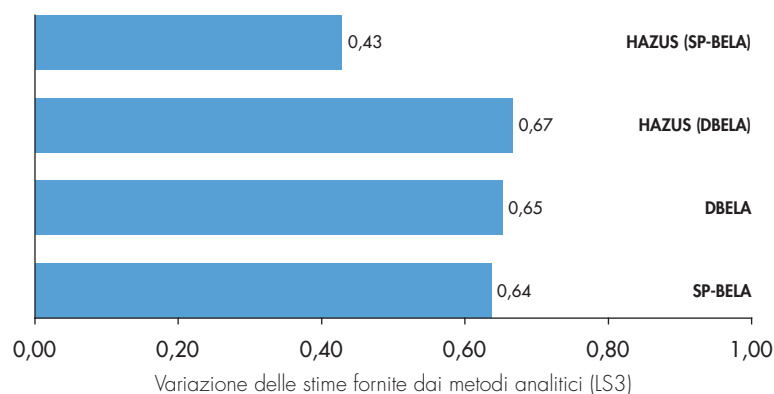
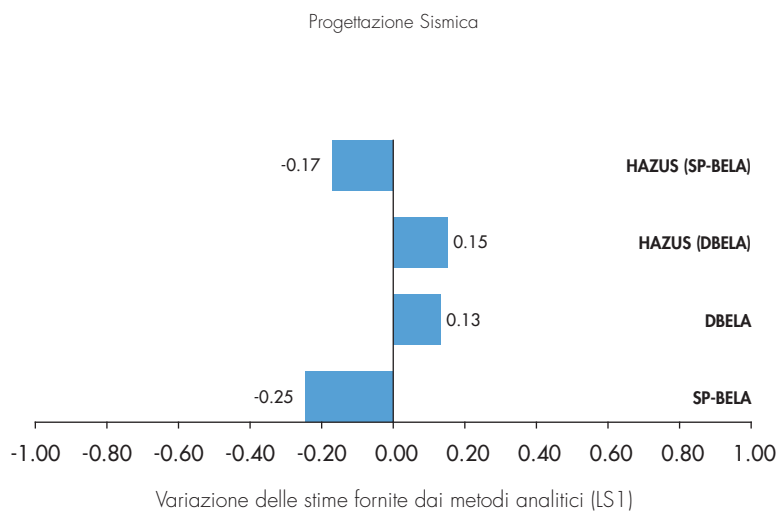
zare spettri derivati da sismogrammi sintetici o da leggi di attenuazione condurrà ad una variazione nelle stime di danno che risulta considerevolmente inferiore a quella riscontrata per i metodi analitici, dato che l'unico parametro che può modificare i risultati è il valore della PGA e, di conseguenza, la relazione adottata per calcolare l'intensità in funzione della PGA. Pertanto, se per il calcolo della vulnerabilità degli edifici viene applicato un metodo empirico, come ad esempio le matrici di probabilità di danno, definire la domanda sismica tramite spettri ricavati da sismogrammi sintetici o leggi di attenuazione non modificherà sostanzialmente il risultato finale.

5.2.2 Sensibilità alla metodologia per il calcolo della vulnerabilità

In questo paragrafo viene analizzata l'influenza sul risultato finale dell'utilizzo di differenti metodologie per il calcolo della vulnerabilità degli edifici. La figura 18 mostra le differenze dei risultati relativi ai metodi analitici rispetto a quelli determinati tramite le matrici di probabilità di danno, per lo stato limite di danno leggero e collasso.

Osservando la figura 18 si nota che allo stato limite di danno lieve, LS1, la variazione nei risultati, applicando un metodo analitico piuttosto che le DPM, è bassa se il metodo analitico

Fig. 18
 Variazione percentuale della
 quantità di edifici che supe-
 rano gli stati limite LS1 ed
 LS3 rispetto al modello base
 (basato sulle DPM), quando
 vengono applicati i metodi
 analitici per il calcolo della
 vulnerabilità degli edifici.



utilizzato è DBELA o HAZUS (con curva di capacità di DBELA), mentre cresce se si considera, come metodologia analitica, SP-BELA o HAZUS (con curva di capacità di SP-BELA); comportamento, questo, dovuto alle caratteristiche stesse della procedura DBELA, come verrà discusso in dettaglio più avanti. Le differenze tra i metodi analitici ed empirici diventano significative allo stato limite di collasso, infatti il metodo DPM fornisce valori inferiori della percentuale di edifici che raggiungono il collasso in corrispondenza di un evento sismico con caratteristiche simili a quello del 1908. Tale differenza può essere spiegata se si considera che le DPM sono ricavate sulla base di dati, la cui validità statistica per livelli alti di danneggiamento e scuotimento del suolo è limitata, in quanto terremoti di elevata magnitudo si verificano con meno frequenza in zone densamente popolate.

Soffermandosi sulle differenze tra i vari metodi di valutazione della vulnerabilità, si evince che i risultati della metodologia DBELA risultano sempre sensibilmente maggiori rispetto ad SP-BELA, soprattutto per lo stato limite di danno lieve. La spiegazione di questo risultato, come sottolineato precedentemente, risiede nel fatto che in DBELA il periodo proprio di vibrazione della struttura, e di conseguenza anche la rigidità iniziale, non

deriva da un'analisi pushover ma viene calcolato attraverso relazioni empiriche (che derivano da edifici non progettati sismicamente) e questo può comportare una sottostima di questi valori con una conseguente sottostima dell'effettiva capacità. Il metodo HAZUS combinato con le curve di capacità determinate con i metodi SP-BELA e DBELA, fornisce risultati simili alle due metodologie basate sugli spostamenti. Si può quindi concludere che nell'ambito dei metodi analitici i risultati appaiono tra loro abbastanza coerenti con differenze sensibili dovute essenzialmente alle diverse ipotesi che stanno alla base delle singole procedure.

Se, invece, viene applicato un metodo ibrido (DPM per gli edifici in muratura e SP-BELA per quelli in cemento armato), le differenze con le stime ottenute tramite i metodi analitici risultano minori, specialmente allo stato limite di collasso, per il quale le differenze nelle stime diminuiscono di un 20% rispetto al caso precedente (Fig. 19). I risultati forniti dai due metodi ibridi mostrano tra loro una buona coerenza e, per i primi due stati limite, sono nella maggior parte dei casi di poco inferiori ai corrispondenti metodi analitici; infatti è stato dimostrato (Colombi *et al.*, 2008) che le curve di vulnerabilità derivate dai metodi basati sugli spostamenti tendono a sovrastimare i danni rispetto alle curve di vulnerabilità empiriche.

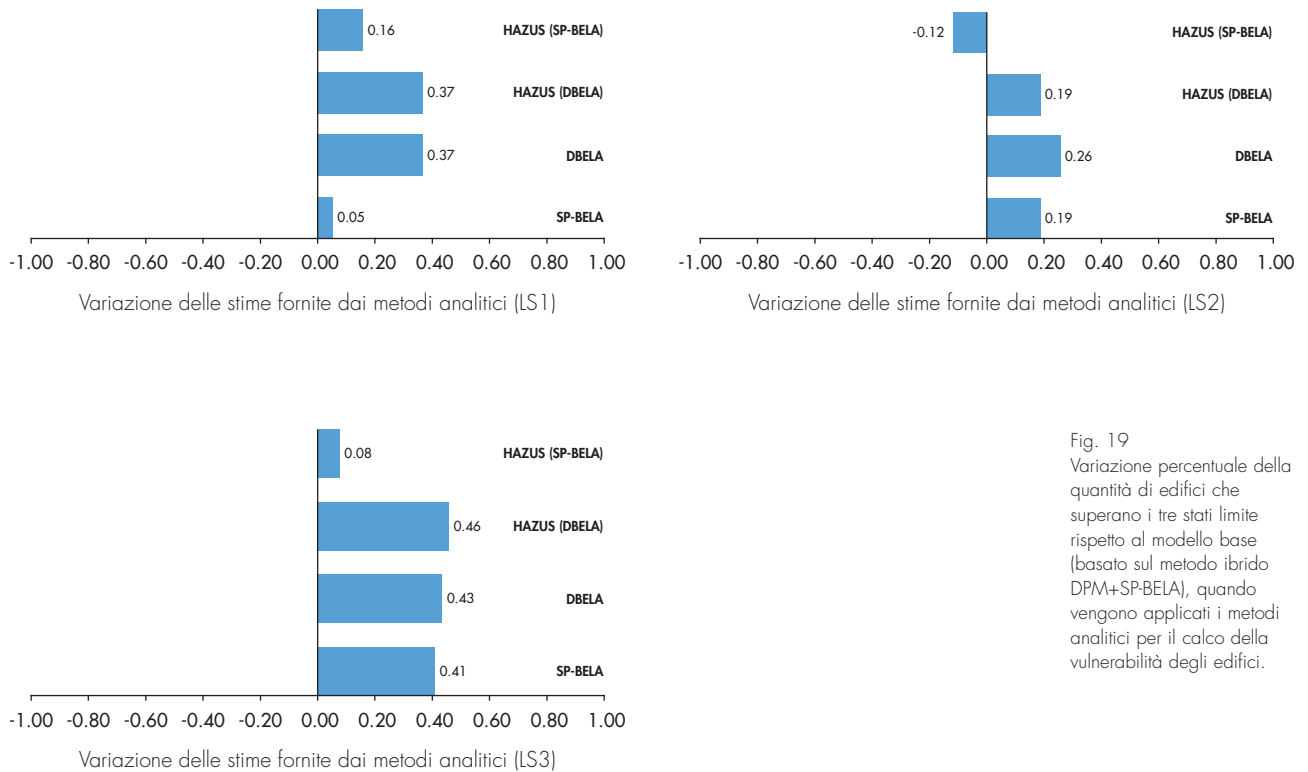


Fig. 19
Variazione percentuale della quantità di edifici che superano i tre stati limite rispetto al modello base (basato sul metodo ibrido DPM+SP-BELA), quando vengono applicati i metodi analitici per il calcolo della vulnerabilità degli edifici.

In base a quanto esposto, l'approccio statistico adottato in questo studio appare quanto mai appropriato, proprio perché libera il risultato dalle incertezze legate al singolo metodo restituendo uno scenario di danno che è la media pesata dei risultati forniti dai più accreditati metodi di valutazione della vulnerabilità sismica disponibili attual-

mente in letteratura. La procedura permette, inoltre, variando in modo opportuno i pesi di ogni ramo dell'albero, di aggiornare il risultato rendendolo più affidabile e preciso, qualora informazioni più dettagliate fossero disponibili sul profilo della pericolosità, dell'esposizione o delle caratteristiche costruttive degli edifici.

6. Conclusioni

Con lo scopo di valutare l'impatto di un terremoto simile a quello del 1908 sulla Messina di oggi, in questo lavoro è stato condotto uno studio di rischio sismico che ha portato alla determinazione di uno scenario di danno per la città. In considerazione delle incertezze epistemiche inevitabilmente associate alla valutazione del rischio sismico di un'area, sono stati applicati diversi metodi noti in letteratura che hanno fornito una pluralità di risultati, che sono stati combinati secondo un approccio ad albero logico. Lo scenario prodotto rappresenta quindi la sintesi di questi risultati ed è stato espresso in termini di media pesata dei ventisette rami dell'albero logico unitamente alle stime al 16° e 84° percentile.

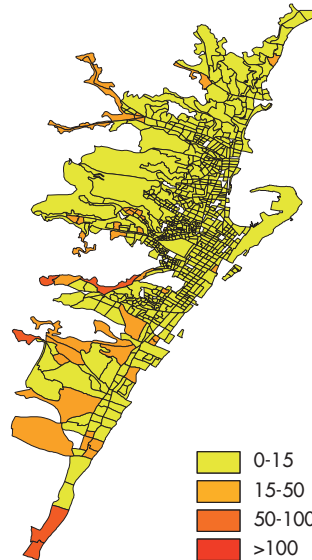
I risultati ottenuti hanno messo in evidenza come una situazione di pericolo potrebbe verificarsi se un terremoto di intensità pari a quello del 1908 dovesse accadere oggi a Messina, infatti circa 4500 edifici (valore mediano dei risultati) rischier-

rebbe il collasso (Fig. 20) con conseguente perdita di vita umane.

Facendo uso di studi (Spence, 2007) che correlano la percentuale di vittime all'interno di un edificio crollato alle caratteristiche dell'edificio stesso, si è potuto stimare un numero mediano di vittime pari a circa 6000 risultanti dallo scenario di collasso appena presentato.

Se gli edifici che subiscono danno severo e quelli che riportano solo danni lievi, rispettivamente 23% e 45% nello scenario presentato, non necessariamente provocano vittime, questi però comportano danni considerevoli in termini di perdite economiche, in quanto, oltre agli oneri di ricostruzione degli edifici crollati, si dovrà affrontare le spese di riparazione e adeguamento sismico delle strutture che abbiano riportato danneggiamenti, dovendo inoltre provvedere a sistemazioni provvisorie per gli abitanti degli edifici resi inagibili. È stata effettuata una stima preliminare delle perdite economiche dirette che ammonterebbero a più di 1,5 miliardi di Euro (valore mediano), espresse in ter-

Fig. 20
Mappa di danno che indica, per ogni sezione di censimento, il valore mediano del numero di edifici che superano lo stato limite di collasso, LS3.



mini dei soli costi di ricostruzione e valutate assumendo un costo medio di ricostruzione di 820 €/m². Si nota come questa stima sia in linea con i risultati presentati da Franco *et al.* (2008) per tutta l'area di Messina e Reggio Calabria.

Si è dimostrato come le incertezze epistemiche abbiano una significativa influenza sul risultato finale; nello scenario presentato si è potuta riscontrare un'ampia variabilità dei risultati per lo stato limite di collasso (Tab. 5b), infatti il valore mediano della percentuale di edifici collassati è il doppio della rispettiva stima al 16° percentile ed è la metà del valore per l'84° percentile. Ciò ha ulteriormente confermato l'opportunità di uno schema ad albero logico per lo studio di scenari di danno. Inoltre, le analisi di sensibilità hanno permesso di condurre una valutazione critica dei risultati evidenziando che per questo scenario: caratterizzare la domanda sismica tramite spettri di risposta, derivati da sismogrammi sintetici, conduce a stime di danno maggiori rispetto a quelle ottenute applicando le leggi di attenuazione per il calcolo degli spettri; le stime fornite dai metodi analitici risultano influenzate dalla forma dello spettro di domanda; i risultati dei metodi empirici non sono particolarmente condizionati dalla definizione della domanda sismica (sismogrammi sintetici o equazioni di attenuazione); le stime ottenute con le matrici di probabilità di danno per lo stato limite di collasso sono significativamente più basse di quelle derivate con i metodi analitici; tutti i metodi analitici hanno portato a risultati tra loro abbastanza coerenti e, infine, le stime ottenute tramite metodologie ibride sono risultate paragonabili a quelle determinate con le procedure analitiche. Nel presente lavoro i sismogrammi sintetici sono

stati calcolati per un singolo evento sismico ma sarebbe importante effettuare uno studio più approfondito anche sulla variabilità dei sismogrammi simulati al variare delle caratteristiche della faglia e del processo di rottura su di essa (Cultrera *et al.*, 2010).

Alcuni futuri sviluppi dello studio consentiranno di rendere la procedura sempre più raffinata e precisa in modo da minimizzare le incertezze epistemiche. In particolare, per quanto riguarda l'esposizione, si intende approfondire la conoscenza del costruito della città di Messina suddividendo, inizialmente, il territorio in classi omogenee di edifici, con caratteristiche strutturali paragonabili e che si ritenga possano rispondere similmente all'azione sismica, e portando a termine un programma di indagini sul campo edificio per edificio, già avviato, ad opera di tecnici competenti, che portino all'individuazione delle effettive caratteristiche strutturali. È previsto, inoltre, di aggiornare anche i dati relativi alle caratteristiche dei terreni, tenendo conto degli effetti di sito per ogni sezione censuaria. Ciò permetterà di migliorare anche l'aspetto della pericolosità, nell'ambito della quale potranno essere generati ulteriori sismogrammi sintetici derivati da una trattazione statistica.

Uno degli approfondimenti di questo lavoro prevede la generazione di "ground motion fields" per la città di Messina, ottenuti calcolando il valore mediano dello scuotimento per ogni sezione di censimento e associando a questo valore mediano una stima della variabilità interevento per l'evento ed una variabilità intraevento per ciascun sito, determinata tramite simulazione Monte Carlo. Inoltre, l'applicazione della procedura, qui presentata, ad altri contesti

urbani permetterà di adattarla a varie classi di edifici, le cui caratteristiche strutturali possono essere diverse da quelle specifiche degli edifici di Messina. Questo renderà il modello più versatile e funzionale. Sulla base di uno studio pre-

liminare già avviato, verrà valutato, con un approccio ad albero logico, il rischio sismico di tutti i comuni appartenenti alla Provincia di Messina, anch'essi caratterizzati da un livello di pericolosità sismica significativo.

Ringraziamenti

Gli autori esprimono i loro ringraziamenti a Massimo Cocco, Martin Mai, Antonio Teramo, Antonio Bottari e Domenica Termini, per i preziosi contributi nello studio del modello di pericolosità per il territorio di Messina e per il supporto nella trattazione dell'esposizione

della città e nell'individuazione delle caratteristiche del suo tessuto urbano (il contributo di esperti che conoscano profondamente il territorio e le sue trasformazioni rappresenta una componente fondamentale degli studi di rischio sismico di aree urbane).

Bibliografia

- Barberi G., Cosentino M.T., Gervasi A., Guerra I., Neri G., Orecchio B. (2004) - Crustal seismic tomography in the Calabrian Arc region, south Italy, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 147, 297-314.
- Boore D.M., Atkinson G.M. (2008) - Ground-Motion Prediction Equations for the Average Horizontal Component of PGA, PGV, and 5%-Damped PSA at Spectral Periods between 0.01 s and 10.0 s *Earthquake Spectra*, Vol. 24, No. 1: 99-138.
- Borzi B., Crowley H., Pinho R (2008) - Simplified Pushover-Based vulnerability analysis for large scale assessment of RC buildings. *Engineering Structures*, Vol. 30, No. 3: 804-820.
- Borzi B., Crowley H., Pinho R. (2008a) - Simplified Pushover-Based Earthquake Loss Assessment (SP-BELA) method for masonry buildings. *International Journal of Architectural Heritage*, Vol. 2, No. 4: 353-376.
- Calvi G.M., (1999) - A displacement-based approach for vulnerability evaluation of classes of buildings. *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 3, No. 3: 411-438.
- Calvi G.M. (2006) - Cosa fare se una struttura non risulta adeguata. *Rischio accettabile e allocazione temporale delle risorse*, L'Edilizia, Speciale Sismica, No. 145, 38-40.
- Cauzzi C., Faccioli E. (2008) - Broadband (0.05 to 20 s) prediction of displacement response spectra based on worldwide digital records. *Journal of Seismology*, Vol. 12, No. 4: 453-475.
- Cirella A., Piatanesi A., Cocco M., Tinti E., Scognamiglio L., Michelini A., Lomax A., Boschi E. (2009) - Rupture history of the 2009 L'Aquila (Italy) earthquake from non-linear joint inversion of strong motion and GPS data. *Geophysical Research Letters*, vol. 36, no. 19, Citation L19304, 2009.
- Colombi M., Borzi B., Crowley H., Onida M., Feroni F., Pinho, R. (2008) - Deriving vulnerability curves using Italian earthquake damage data, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 6: 485-504.
- Crowley H., Pinho R., Bommer J.J. (2004) - A probabilistic displacement-based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 2, No. 2: 173-219.
- Crowley H., Pinho R. (2006) - Simplified equations for estimating the period of vibration of existing buildings, *Proceedings of the 1st European Conference of Earthquake Engineering and Seismology*, Geneva, Switzerland, paper no. 1122.
- Crowley H., Borzi B., Pinho R., Colombi M., Onida, M. (2008) - Comparison of two mechanics-based methods for simplified structural analysis in vulnerability assessment, *Advances in Civil Engineering*, Volume 2008, Article ID 438379.
- Cultrera G., Cirella A., Spagnuolo E., Herrero A., Tinti E., Pacor F. (2010) - Variability of kinematic source parameters and its implication on the choice of the design scenario. *Bull. Seism. Soc. of Am.*, 100: 941-953.
- Dolce M., Masi A., Marino M., Vona M. (2003) - Earthquake Damage Scenarios for the Stock of Potenza (Southern Italy) Including Site Effects, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1: 115-140.
- FEMA (2003) - HAZUS-MH Technical Manual, Federal Emergency Management Agency, Washington, DC, USA.
- FIRB Project (2004) - Assessment and reduction of seismic risk to large infrastructural systems, (http://www.ricercaitaliana.it/firb/dettaglio_firb_en-RBIN047WCL.htm).
- Franco G., Shen-Tu B., Goretti A., Bazzurro P., Valensise G. (2008) - Impact of Uncertainty on Loss Estimates for a Repeat of the 1908 Messina-Reggio Calabria Earthquake in Southern Italy. *Proceedings of MERCEA 2008, Reggio Calabria*.
- Frassine L., Giovinazzi S. (2004) - Databases compared in the vulnerability assessment of residential buildings: an application to the city of Catania, In: *Proceedings of the XI Congresso Nazionale "L'ingegneria Sismica in Italia"*, Genova 25-29 January 2004.
- INGV-DPC S5 (2007) - Definizione dell'input sismico sulla base degli spostamenti attesi, disponibile al sito: <http://progettos5.stru.polimi.it/>.
- Mai P.M., W. Imperatori, Olsen K.B. (2010) - Hybrid broadband ground-motion simulations: combining long-period deterministic synthetics with high-frequency multiple S-to-S back-scattering, *Bull. Seis. Soc. Am.*, accepted for publication May 11 2010.
- Margottini C., Molin D., Serva L. (1992) - Intensity versus ground motion: A new approach using Italian data" *Engineering Geology*, 33, 1: 45-58.
- Molina S., Lindholm C. (2007) - A logic tree extension of the capacity spectrum method developed to estimate seismic risk in Oslo, Norway, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 9, No. 6: 877-898.

- Pinho R., Calvi G.M., Crowley H. (2006) - Scenari di rischio e di perdite attese: Politiche assicurative e bancarie, *L'Edilizia, Speciale Sismica*, No. 145.
- Pino N.A., Giardini D., Boschi E. (2000) - The December 28, 1908, Messina Straits, southern Italy, earthquake: Waveform modeling of regional seismograms, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 105, No. B11, pp. 25,473- 25,492.
- Priestley M.J.N. (2003) - Myths and fallacies in earthquake engineering - revisited, *The Mallet Milne Lecture*, IUSS Press, Pavia, Italy.
- Regio Decreto Legge, RDL, (1909) - Norme tecniche ed igieniche obbligatorie per le riparazioni ricostruzioni e nuove costruzioni degli edifici pubblici e privati nei luoghi colpiti dal terremoto del 28 dicembre 1908 e da altri precedenti elencati nel R.D. 15 aprile 1909 e ne designa i Comuni, Regio Decreto n. 913 del 1909.
- Rossetto T., Elnashai A. (2003) - A new analytical procedure for the derivation of displacement-based vulnerability curves for populations of RC structures, *Engineering Structures*, Vol. 25: 1241-1263.
- Rossetto T., Elnashai A. (2005) - Derivation of vulnerability functions for European-type RC structures based on observational data, *Engineering Structures*, Vol. 7, No 3: 397-409.
- Spence R. Ed (2007) - Earthquake disaster scenario predictions and loss modelling for urban areas, *LESSLOSS Report 7*, IUSS Press, Pavia, Italy.
- Spudich P., Xu L. (2003) - Documentation of software package Compsyn svx3.11: programs for earthquake ground motion calculation using complete 1-d green's functions, in *International Handbook of Earthquake and Engineering Seismology CD*, Int. Ass. Of Seismology and Physics of Earth's Interior, Academic Press.
- Teramo A., Bottari A., Teramo M.S., Termini D., Crowley H., Pinho R., Lopez M., Cultrera G., Cocco M., Cirella A., Herrero A., Piatanesi A., Lorito S., Romano F., Mai M., Imperatori W. (2008) - From the 1908 Messina Earthquake to Scenario Damage Assessment in 2008, IUSS Press, Pavia, Italy.