

# Analisi della domanda sismica nella sequenza emiliana e compatibilità con i modelli previsionali\*

## Seismic demand analysis in the Emilia sequence and model compatibility assessment

Iunio Iervolino<sup>1</sup>, Flavia De Luca<sup>2</sup>, Eugenio Chioccarelli<sup>3</sup> ■

### Sommario

Con riferimento ai due eventi principali della sequenza emiliana del 2012, lo studio è stato mirato a una valutazione della domanda sismica per le strutture. Si è fatto riferimento alle registrazioni della Rete Accelerometrica Nazionale entro 50 km dagli epicentri. È stata valutata la richiesta di prestazione osservata per sistemi semplici sia elastici lineari che inelastici non-lineari. Inoltre, l'analisi ha fatto riferimento a misure di risposta di picco e cicliche, nonché ai due eventi considerati singolarmente così come sequenza (per strutture verosimilmente non riparate nel periodo intercorso tra i due terremoti). Ciascuna delle misure di domanda sismica valutate è stata confrontata con quanto previsto da modelli semi-empirici calibrati su dati italiani. I risultati mostrano come non si possa concludere, almeno a seguito di queste analisi preliminari, che quanto osservato sia atipico rispetto a quanto atteso per eventi del tipo occorso nella sequenza.

### Abstract

*Referring to the two main events of the 2012 Emilia seismic sequence, the study aimed at assessing engineering seismic demand. Records within 50 km from the epicenters were considered. Structural seismic performance was evaluated for simple linear and nonlinear systems. Analyses considered both peak and cyclic engineering demand parameters from the two individual events, as well as for the sequence. Each structural response measure was compared to ground motion prediction equations based on Italian data. Results do not allow to conclude that what observed is atypical with respect to what expected for events of the type occurred.*

### 1. Introduzione

La recente sequenza sismica dell'Emilia è stata caratterizzata da sette eventi di magnitudo momento ( $M_w$ ) superiore a 5.0, cinque dei quali si sono verificati tra il venti e il ventinove maggio 2012. L'area geografica in cui si sono registrati significativi danni strutturali è particolarmente estesa su un territorio con spiccata vocazione produttiva.

I danni sono stati caratterizzati da collassi parziali o totali di capannoni prefabbricati in cemento armato ad uso industriale, edifici in muratura, e danni, prevalentemente non-strutturali, agli edifici in cemento armato (rapporti su danni sono disponibili all'indirizzo internet <http://www.reluis.it/>).

Le tipologie strutturali elencate sono sensibili a diverse misure d'intensità del moto al suolo: ad esempio, la perdita di appoggio nei capannoni industriali risente di spostamenti spettrali a

periodi relativamente alti, mentre il danno ai componenti non-strutturali, come le tamponature negli edifici in cemento armato, è tipico di una domanda medio-alta a periodi bassi, in ultimo, i danni osservati alle strutture in muratura possono essere riconducibili al potenziale di danneggiamento ciclico prodotto dalla sequenza. Riguardo quest'ultimo aspetto, risulta evidente che, trattandosi di una sequenza sismica concentrata nel tempo e nello spazio, il problema del danno cumulato possa in qualche modo aver influito sui danni di tutte le tipologie strutturali coinvolte.

Ogniquale si verifichi un terremoto dannoso, l'approccio probabilistico all'analisi di pericolosità e la mappa di pericolosità del territorio italiano (Stucchi et al., 2011), alla base della normativa sismica in vigore (C.S.LL.PP., 2008) per quanto riguarda la definizione delle azioni di riferimento per le costruzioni, sono messi in dis-

<sup>1</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II - ✉ iunio.iervolino@unina.it

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II - ✉ flavia.deluca@unina.it

<sup>3</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II - ✉ eugenio.chioccarelli@unina.it

\* Questo lavoro è basato su quanto presentato in: Iervolino I., De Luca F., Chioccarelli E. (2012). Engineering seismic demand in the 2012 Emilia sequence: preliminary analysis and model compatibility assessment, *Annals of Geophysics*, 55(4), 639-645.

cussione e, comprensibilmente, si cerca di valutarne la consistenza rispetto all'evento osservato. D'altra parte è facile mostrare come in termini di tempi di occorrenza dei parametri caratteristici dello scuotimento, la mappa di pericolosità non possa essere *validata* dalle registrazioni di un singolo evento (e.g., Iervolino, 2012). Allo stesso modo è evidente, però, come sia possibile valutare se le osservazioni siano coerenti con i modelli utilizzati in tali analisi probabilistiche di pericolosità.

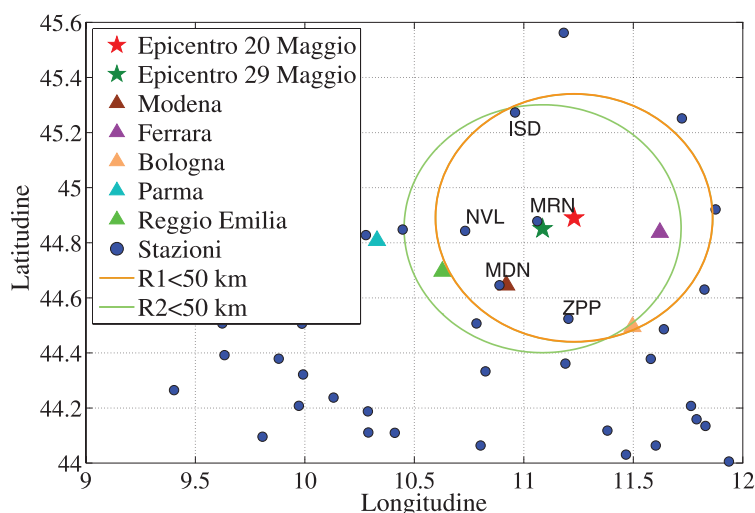
La valutazione di compatibilità rappresenta la principale motivazione dello studio presentato nel seguito. In particolare, ci si è posti l'obiettivo di investigare la domanda strutturale di picco e ciclica su semplici sistemi a un grado di libertà (1GdL) e di confrontarla con modelli semi-empirici, in modo da poter valutare se le osservazioni siano non-atipiche, e quindi contemplate, da tali strumenti alla base delle analisi di pericolosità. Nel lavoro si è fatto riferimento sia alla domanda elastica sia a quella inelastica. Infatti, dal punto di vista del danneggiamento strutturale, il confronto in termini inelastici può essere considerato più informativo rispetto a quello in termini elastici.

Le forme d'onda considerate si riferiscono al terremoto  $M_w$  6 del venti maggio 2012 e a quello  $M_w$  5.9 del ventinove maggio 2012, le cui registrazioni sono quelle della Rete Accelerometrica Nazionale (RAN) e messe a disposizione dal Dipartimento di Protezione Civile (DPC) attraverso il sito <http://www.protezione-civile.gov.it/>. Entrambi gli eventi sono stati registrati da numerose stazioni accelerometriche della RAN, anche ad elevate distanze dalla sorgente, fino a circa 650 km; tuttavia, gran parte delle elaborazioni fa riferimento a cinque stazioni, quelle che si trovano a meno di 50 km dall'epicentro di entrambi gli eventi (Figura 1).

Nello studio, i dati di tutte le stazioni della RAN che hanno registrato l'evento (entro i 650 km dall'epicentro), sono confrontati con le equazioni predittive dei parametri di picco elastici, come la massima accelerazione al suolo (*peak ground acceleration* - PGA), la massima velocità al suolo (*peak ground velocity* - PGV), e alcune ordinate spettrali in pseudo-accelerazione,  $S_a$ , valutate a periodi (T) ritenuti rappresentativi di intervalli di interesse dal punto di vista strutturale (0.3 e 1 secondo). In seguito, si è proceduto con l'analisi dei parametri di intensità di picco e ciclica per le cinque stazioni in prossimità degli epicentri. In particolare, per quanto riguarda la domanda elastica, gli spettri di pseudo-accelerazione sono confrontati sia con i risultati dell'equazione predittiva di Bindi et al. (2011) sia con gli spettri di progetto (secondo la normativa italiana) per due periodi di ritorno ( $T_r$ ), rispettivamente 475 e 2475 anni. La domanda inelastica è invece analizzata tramite spettri di misure di picco e cicliche (spostamenti inelastici e numero di cicli equivalenti), valutati per sistemi 1GdL e confrontati con quanto ottenuto da modelli recentemente sviluppati (De Luca, 2011).

Riguardo alla scelta del numero di cicli equivalenti ( $N_e$ ) come misura di intensità informativa della domanda strutturale di tipo ciclico, va enfatizzato che tale parametro consente di valutare come il potenziale di danno di una data forma d'onda sia distribuito nel segnale. Con riferimento agli spostamenti inelastici e al numero di cicli equivalenti si è anche valutata la domanda sismica cumulata per i due eventi considerati. Allo stesso modo, è stata valutata la duttilità cinematica ( $\mu$ ) per la sequenza. Infine, le registrazioni più prossime alle sorgenti sono anche state analizzate per valutare l'eventuale possibilità di effetti direttivi. Ulteriori dati a supporto delle analisi qui presentate si possono trovare in Chioccarelli et al., 2012a e 2012b.

Figura 1  
Stazioni accelerometriche della RAN a distanza epicentrale minore di circa 200 km e le cinque con distanza minore di 50 km dall'epicentro sia del primo (R1) che del secondo (R2) evento.



## 2. Ipotesi e trattamento dei dati

I dati accelerometrici sono stati processati con un filtro passabanda (0.25 Hz; 25 Hz) di tipo Butterworth del quarto ordine, a valle della correzione lineare della *baseline* già applicata dal DPC sugli stessi dati. Il trattamento finale dei dati (correzione lineare della *baseline* e successivamente filtro passabanda) non differisce in maniera significativa da quello impiegato nel database italiano ITACA (e.g., Pacor et al., 2011).

Non essendo disponibili informazioni sulla geometria della sorgente al momento dello studio, in tutti i casi in cui si è rivelato necessario fare riferimento alla minima distanza dalla faglia (ovvero la distanza di Joyner e Boore,  $R_{jb}$ ), si è impiegata una relazione empirica (Montaldo et al., 2005) per convertire la distanza epicentrale ( $R_{epi}$ ) in  $R_{jb}$ .

## 3. Misure di intensità di picco e cicliche

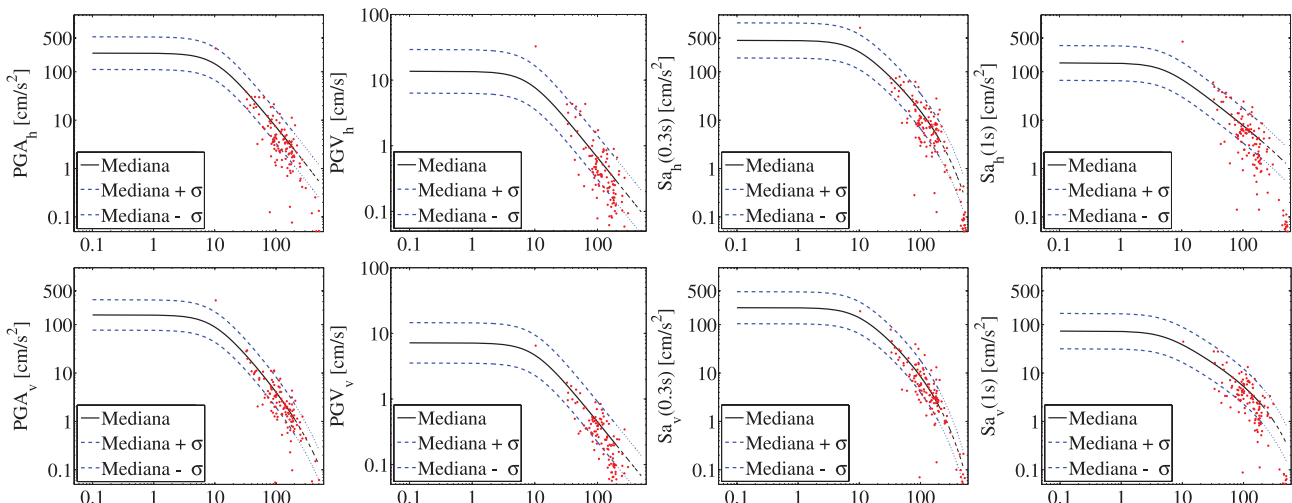
In questa sezione si riporta il confronto delle osservazioni, in termini di PGA, PGV e  $Sa(T)$  a 0.3 e 1 s, relative ai due eventi del venti e del ventinove maggio 2012 (rispettivamente Figura 2 e Figura 3), con i relativi modelli predittivi (*ground motion prediction equation – GMPE*) di Bindi et al. (2011). Le predizioni sono espresse relativamente ad un suolo di tipo A secondo la normativa italiana (CS.LL.PP., 2008), non essendo disponibili, al momento dello studio, sufficienti informazioni sulla classificazione di suolo di tutte le stazioni. Nonostante tale approssimazione, si nota un buon accordo tra i dati e le relative previsioni per entrambi gli eventi. Il confronto è riportato sia per le componenti orizzontali (in termini di media geometrica) che per la componente verticale. Per le GMPE si riportano sia i valori mediani sia le bande di ampiezza pari a una deviazione standard dei logaritmi (mediana  $\pm \sigma$ ). Ulteriori con-

fronti, anche in termini di residui, sono riportati in Chioccarelli et al., 2012a e 2012b.

Analogamente, assumendo come modello di attenuazione quello di Sabetta e Pugliese (1996), in Figura 4 si riporta il confronto per la massima intensità di Arias ( $I_A$ ) associata alle due componenti orizzontali. Il valore di intensità  $I_A$  riportato è normalizzato rispetto al coefficiente  $\pi/(2 \cdot g)$ . L'accordo mostrato per questa misura ciclica appare meno soddisfacente rispetto a quello in termini di misure di picco; va però ricordato che l'intervallo di validità della legge è limitato a distanze minori di 100 km e che molte registrazioni sono ben oltre tale limite. In Tabella 1 sono riportati i parametri di picco e ciclici per le tre componenti dei segnali registrati entro i 50 km dai due epicentri. Per entrambi gli eventi sono riportati PGA, PGV,  $I_A$  nonché l'indice di danno di Cosenza e Manfredi ( $I_D$ ), misura indicativa del potenziale danno ciclico indotto dalla registrazione (Iervolino et al., 2006), e l'intensità di Housner ( $H_{50}$ ). Le condizioni di sito riportate in tabella sono state valutate dal database ITACA (*Italian ACcelrometric Archive*, <http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/>), ad eccezione della stazione ZPP, per la quale in mancanza di informazioni, si è ipotizzato un suolo di tipo A.

In Figura 5 gli spettri di risposta in pseudo-accelerazione, smorzati al 5%, relativi alle cinque stazioni di Tabella 1 sono confrontati con gli spettri corrispondenti ottenuti dalla relazione di attenuazione di Bindi et al. (2011); si è tenuto conto non solo di magnitudo e distanza ( $R_{jb}$ ) delle stazioni ma anche della tipologia di suolo. Il confronto è riportato in termini di stime mediane ( $GMPE_M$ ) e bande di variabilità ( $GMPE_M \pm \sigma$ ). Si mostra un discreto accordo che non consente di concludere che la domanda elastica registrata durante gli eventi del venti e del ventinove maggio 2012 sia stata atipica.

Figura 2  
Evento del venti maggio, 2012. Confronto tra il modello di attenuazione ed i dati registrati dalla RAN, in termini di PGA, PGV,  $Sa(0.3\text{ s})$  ed  $Sa(1\text{ s})$ , per la media geometrica delle componenti orizzontali (pedice h) e per la componente verticale (pedice v). Asse orizzontale in termini di  $R_{jb}$  (km).



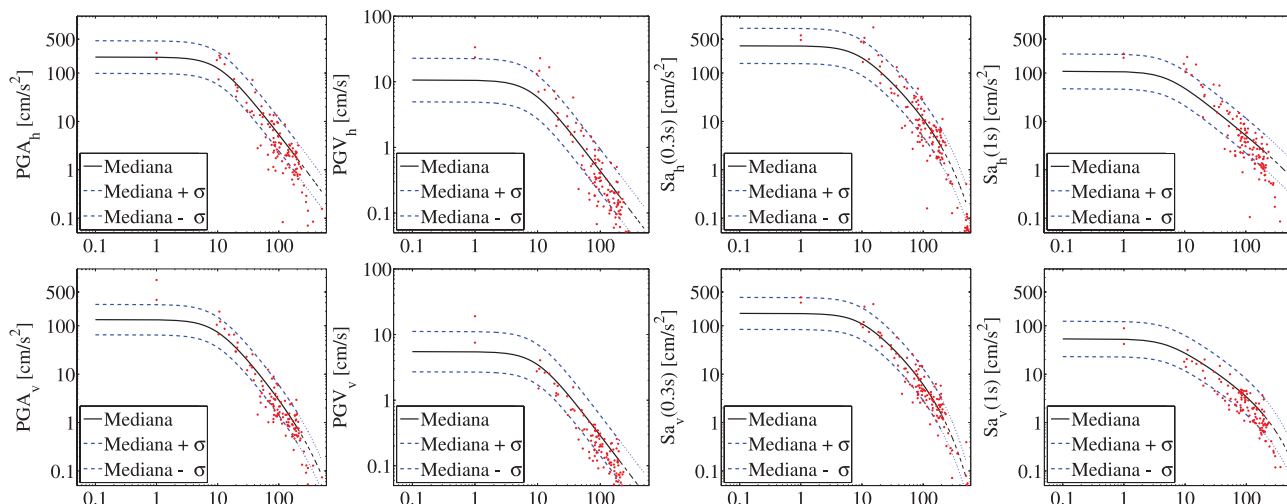


Figura 3  
Evento del ventinove maggio 2012. Confronto tra il modello di attenuazione ed i dati registrati dalla RAN, in termini di PGA, PGV, Sa(0.3 s) ed Sa(1 s), per la media geometrica delle componenti orizzontali (pedice h) e per la componente verticale (pedice v). Asse orizzontale in termini di  $R_{ib}$  (km).

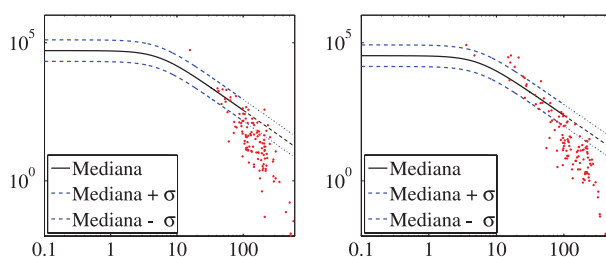


Figura 4  
Confronto in termini di  $I_A$  con il modello di attenuazione di Sabetta e Pugliese (1996) per l'evento del venti maggio (sinistra) e del ventinove maggio (destra). Asse orizzontale:  $R_{epi}$  (km). Asse verticale:  $I_A \cdot 2 \cdot g / \pi$  ( $cm^2/s^3$ ).

Tabella 1 - Misure di intensità di picco ed integrali per le cinque stazioni a meno di 50 km dagli epicentri. E-O indica la componente est-ovest; N-S la componente nord-sud (per le componenti orizzontali); V la componente verticale; 20, 29, venti e ventinove maggio rispettivamente; S tipologia di suolo.

Stazione	S	$R_{epi}$ (km)		$R_{ib}$ (km)		PGA ( $cm/s^2$ )		PGV ( $cm/s$ )		$I_A$ ( $cm/s$ )		$I_D$ (-)		$H_{50}$ (cm)	
		20	29	20	29	20	29	20	29	20	29	20	29	20	29
MRN	N-S					313	267	45	54	86.8	132.6	3.8	5.7	128.3	134.8
	C	16	4	11	1	295	256	23	21	71.4	78.9	6.4	9.3	81.5	67.7
MDN	V					317	883	6	19	43.6	289.9	13.2	10.8	16.2	25.7
	N-S					38	54	4	4	2.7	4.4	10.4	12.8	12.4	14.9
NVL	C	41	28	33	21	39	33	4	3	3.5	2.8	13.0	19.1	14.4	10.4
	V					28	35	2	2	1.3	1.8	16.4	19.1	5.4	6.5
ZPP	N-S					48	45	2	3	2.6	4.8	15.6	25.2	7.2	10.1
	C	42	28	34	21	48	55	3	3	2.8	5.0	13.1	21.6	7.7	10.5
ISD	V					29	45	1	1	0.9	2.6	20.5	29.7	1.7	2.3
	N-S					21	24	4	3	2.7	2.1	18.9	16.7	15.7	12.7
ZPP	A	43	38	34	30	15	24	2	3	1.5	1.8	27.5	16.9	9.1	9.4
	V					20	23	1	1	0.8	0.7	21.0	15.6	4.6	3.3
ISD	N-S					16	15	2	2	0.9	1.1	22.4	20.4	7.2	8.3
	B	47	48	38	39	15	12	2	1	0.9	0.5	23.5	19.0	7.6	4.8
ISD	V					9	7	1	1	0.2	0.2	17.3	21.5	2.4	2.3

#### 4. Confronto con gli spettri di norma

Nella Figura 6 si riporta il confronto tra gli spettri di pseudo-accelerazione associati alla stazione di Mirandola (MO) (MRN, la più vicina ad entrambi gli epicentri) e gli spettri di progetto della normativa sismica italiana (C.S.LL.PP., 2008) calcolati per suolo A e D e per periodi di ritorno pari a 475 e 2475 anni. Gli spettri di

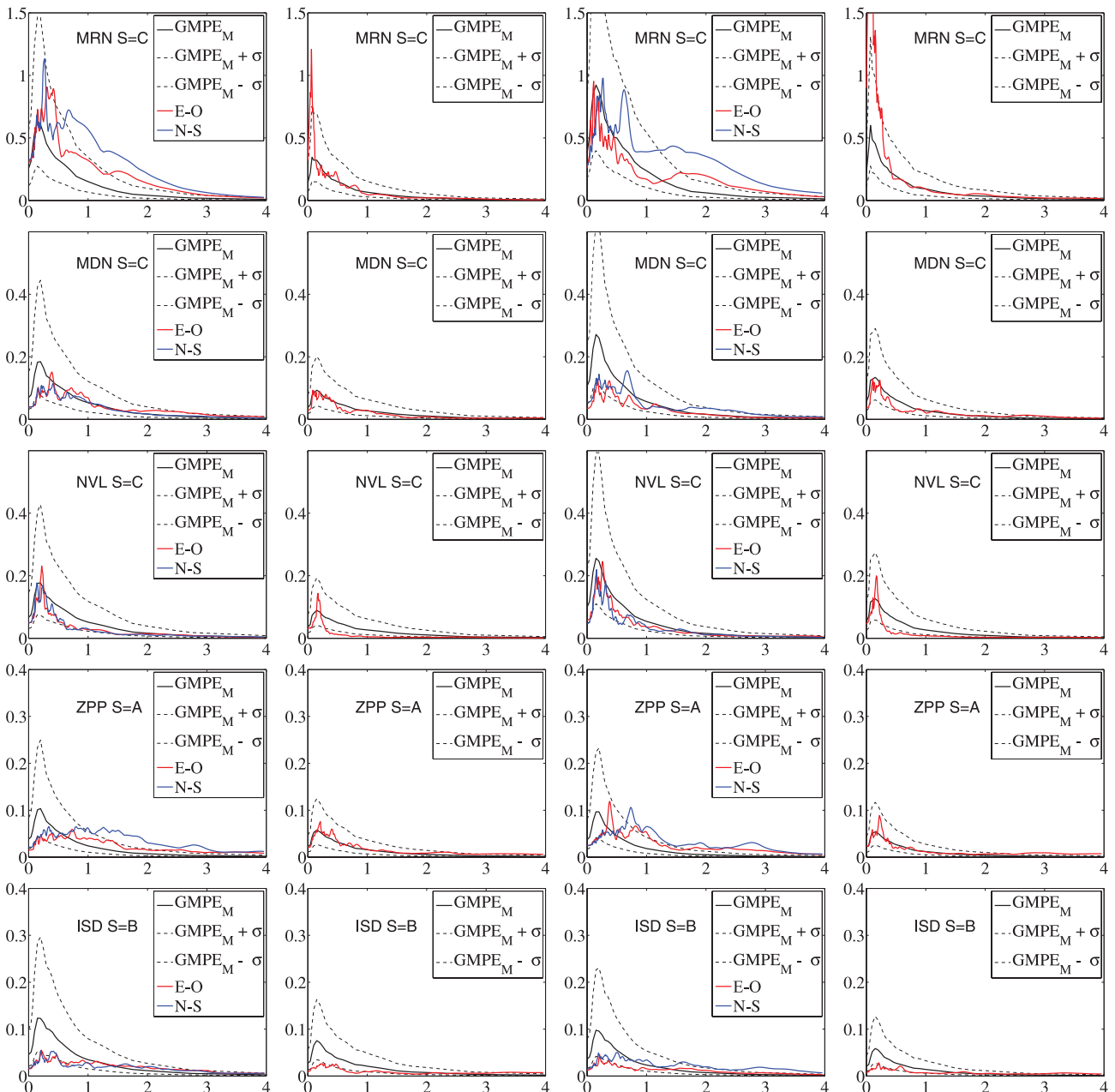
progetto su suolo A sono una buona approssimazione degli spettri a pericolosità uniforme per i periodi di ritorno cui essi fanno riferimento in ciascun sito (Stucchi et al., 2011).

Gli spettri associati alla stazione MRN sono comparabili o superiori rispetto a quelli di progetto considerati. Questo sembrerebbe evidenziare una sottostima della sismicità da parte

dalla normativa italiana. Infatti per analizzare le azioni di progetto rispetto ai segnali registrati durante un terremoto è del tutto naturale ed intuitivo far riferimento al sito dove si è registrata la massima azione (i.e., al sito più vicino alla sorgente dell'evento). Più rigorosamente, per valutare possibili sottostime negli studi di pericolosità, è necessario considerare che questi ultimi mediano tra tutte le possibili posizioni degli epicentri. In questo senso, il calcolo probabilistico, effettuato assumendo che l'epicentro sia noto e coincidente col sito di interesse, condurrebbe certamente a valori di pericolosità maggiori rispetto a quelli calcolati considerando che l'epicentro possa trovarsi in qualsiasi punto all'interno della sorgente sismica (la pericolosità dei siti più vicini alla sorgente è influenzata

anche da limiti intrinseci delle leggi di attenuazione e dello spettro a pericolosità uniforme di cui non si può discutere qui per brevità). Ne deriva che il confronto dei segnali registrati dopo un terremoto (il cui epicentro è dunque ormai noto) non può riferirsi al solo sito epicentrale ma al contrario deve tener in conto anche di tutte le registrazioni non epicentrali (e.g., McGuire e Bernhard 1981, Albarello e D'Amico 2008). Nel caso specifico, la stessa Figura 6, mostra chiaramente che gli spettri registrati dalle altre stazioni vicine all'epicentro sono significativamente minori dello stesso spettro di progetto con cui sono stati confrontati i segnali della stazione MRN. Appare quindi improprio ipotizzare una sottostima della pericolosità da parte della norma italiana. Come detto, l'unico

Figura 5. Confronto tra il modello di attenuazione di Bindi et al. (2011) e gli spettri di pseudo-accelerazione registrati durante l'evento del 20 (prima e seconda colonna da sinistra) e del ventinove maggio (terza e quarta colonna da sinistra). Componenti orizzontali nella prima e terza colonna e componenti verticali nella seconda e quarta colonna. Asse verticale:  $S_a$  (g); Asse orizzontale:  $T$  (s).



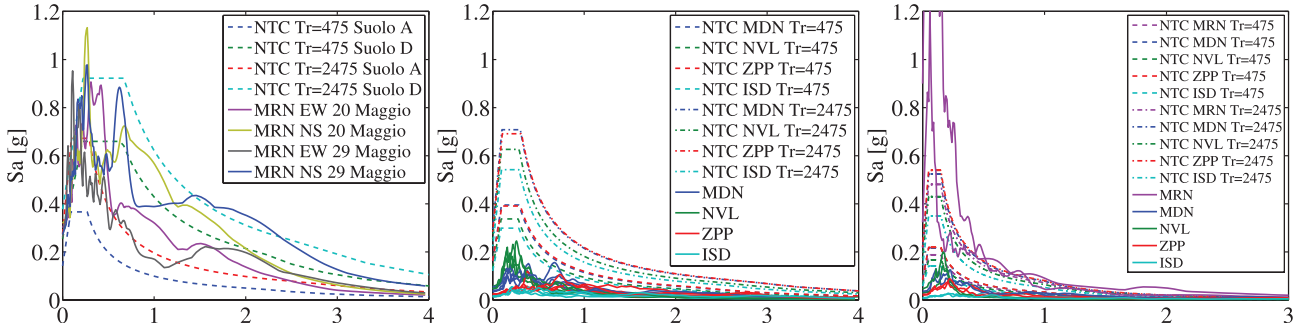


Figura 6. Confronto tra gli spettri della normativa sismica nazionale e le componenti orizzontali della stazione MRN (sinistra), delle altre 4 stazioni vicine gli epicentri (centro) e le componenti verticali di tutte le stazioni (destra). Evento del venti e del ventinove maggio. Asse orizzontale: T (s). (La componente verticale della stazione MRN può essere stata affetta da errori di tipo strumentali; Mirandola Earthquake Working Group, 2012a e 2012b).

modo per verificare l'adeguatezza delle analisi di pericolosità è valutare se le caratteristiche di sorgente manifestatesi siano opportunamente considerate nei modelli utilizzati per il calcolo probabilistico e se le leggi di attenuazione utilizzate nelle analisi siano tali da prevedere quanto osservato (Iervolino, 2012); da ciò i confronti presentati in questo lavoro.

**5. Domanda sismica inelastica**

In questa sezione si analizzano alcuni parametri di domanda strutturale inelastica di picco e ciclica, essendo questi particolarmente importanti per valutare il potenziale di danno dell'evento. Le stazioni considerate sono le cinque più vicine agli epicentri. Si sono considerati due diversi sistemi 1GdL in grado di rappresentare in modo sufficientemente generico il comportamento non lineare delle strutture (Figura 7): (a) un sistema elastico-perfettamente-plastico (EPP) non evolutivo; e (b) un sistema elasto-plastico-incrudente (EPH) con incrudimento del 5% della rigidità elastica ed isteresi caratterizzata dal solo degrado in rigidità, di tipo *pinching* secondo Ibarra et al. (2005).

In De Luca (2011) sono state sviluppate alcune equazioni predittive della risposta sismica per il sistema a 1GdL EPH assumendo un fattore di riduzione della resistenza ( $R_{\mu}$ ) costante.  $R_{\mu}$  è definito nell'Equazione (1), in cui  $F_y$  è la forza di snervamento ed  $m$  è la massa del sistema 1GdL.

$$R_{\mu} = \frac{S_a(T) \cdot m}{F_y} \tag{1}$$

I parametri di risposta considerati sono lo spo-

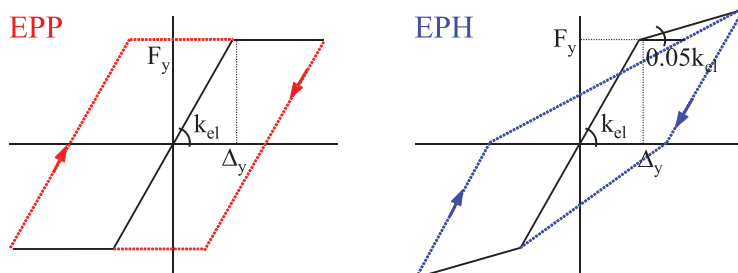
stamento inelastico ( $Sd_{R_{\mu} = i}$ ) e il numero di cicli equivalenti ( $N_{e,R_{\mu} = i}$ ). Quest'ultimo è definito in Equazione (2) ed è pari all'energia isteretica ( $E_H$ ) calcolata come somma delle aree dei cicli isteretici (non considerando il contributo dello smorzamento viscoso) normalizzata rispetto all'area del ciclo maggiore; quest'ultima è l'area al di sotto della risposta monotona, dallo spostamento di snervamento al picco di spostamento inelastico ( $A_{plastica}$ ).

$$N_e = \frac{E_H}{A_{plastica}} + 1 \tag{2}$$

In Figura 8 gli spettri non lineari di spostamento inelastico e numero di cicli equivalenti sono confrontati con i modelli di propagazione di De Luca (2011) assumendo un fattore  $R_{\mu}$  pari a 6. Nella stessa figura si riporta anche il confronto tra gli spettri di spostamento elastico registrati e quelli attesi secondo De Luca (2011). Tutti i confronti sono riferiti agli eventi del venti e ventinove maggio sia singolarmente che considerando l'effetto cumulato della sequenza (20+29 maggio). Così come per i confronti elastici precedenti, i risultati mostrano generalmente un buon accordo tra le registrazioni ed i modelli predittivi (ad eccezione del caso della stazione più vicina MRN in un particolare intervallo di periodi, e della stazione ZPP, probabilmente a causa dell'assunzione fatta sulle condizioni di sito).

Gli spostamenti di picco non subiscono incrementi significativi per l'effetto cumulato della sequenza, contrariamente a quanto riscontrabile nel caso del numero di cicli equivalenti per cui il susseguirsi dei due eventi produce effetti comprensibilmente non contemplati dai modelli predittivi (calibrati su singoli eventi e non su

Figura 7. Schema dei legami costitutivi per il sistema EPP ed EPH.



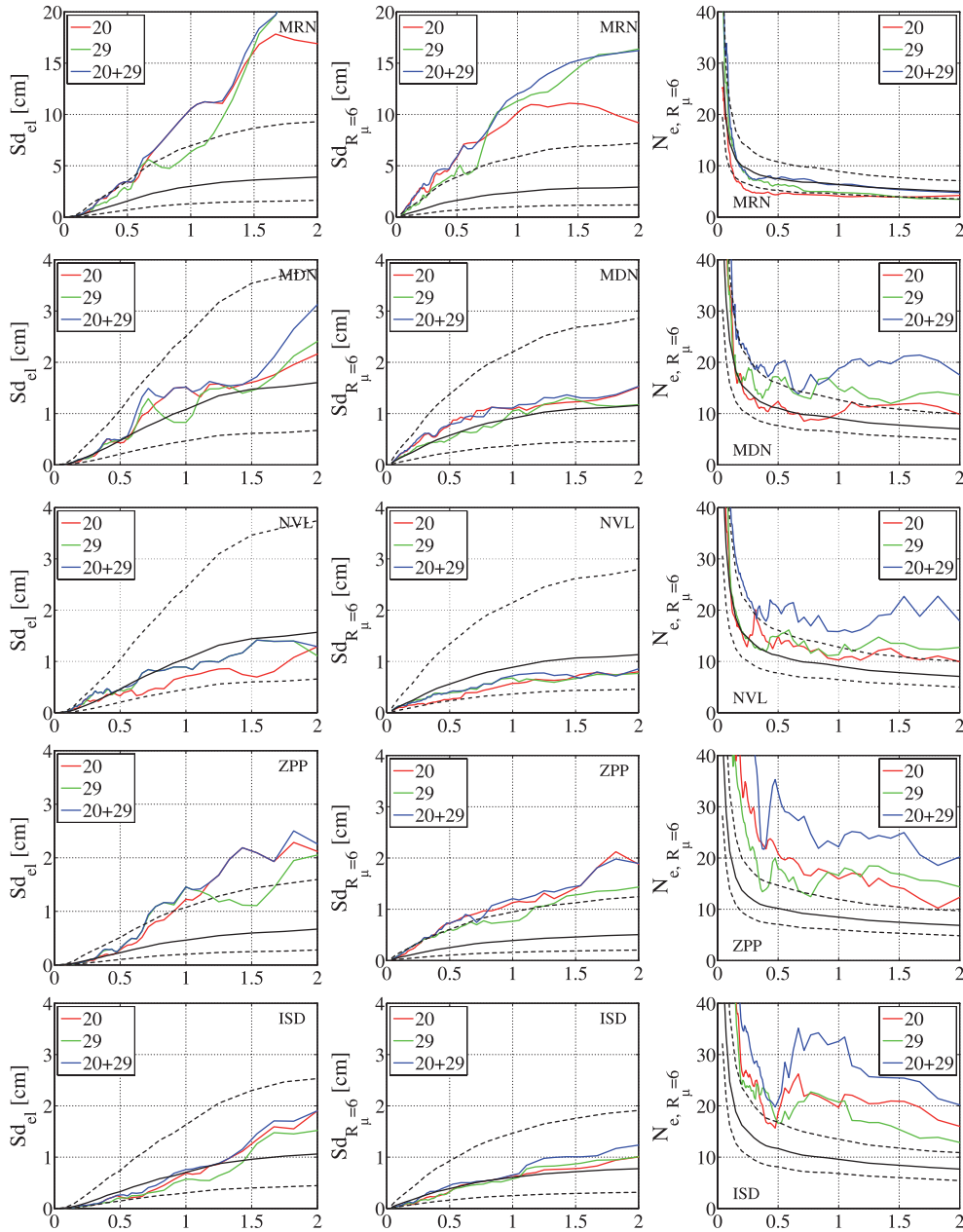


Figura 8. Media geometrica delle componenti orizzontali in termini spostamento elastico (prima colonna da sinistra), inelastico (seconda colonna) e di numero di cicli equivalenti (terza colonna) per gli eventi del venti e ventinove maggio e per l'effetto cumulato della sequenza (20+29) confrontati coi modelli predittivi di De Luca (2011). Asse orizzontale T(s).

sequenze). Se ne deduce che, come atteso, la sequenza sismica ha avuto una richiesta prestazionale superiore rispetto ai singoli eventi se riferita alle strutture sensibili al numero di cicli. Con riferimento al sistema EPP di Figura 7, è stata invece calcolata la domanda di duttilità cinematica (Iervolino et al., 2006) per le componenti orizzontali registrate delle 5 stazioni più vicine agli epicentri. Il sistema a 1GdL considerato ha il periodo fondamentale pari a 0.5 s ed un fattore  $R_{\mu}$  pari a 6 calcolato rispetto all'acce-

lerazione spettrale di progetto per la stazione MRN, classe di sito D e periodo di ritorno di 475 anni; i.e., 0.66 g. I risultati sono riportati in Tabella 2 per la sola stazione MRN in quanto in tutte le altre stazioni il sistema non ha presentato escursioni in campo plastico; i.e., la domanda di duttilità è pari a zero per il sistema considerato (tale risultato è in accordo con quanto suggerito dalla Figura 6). Al contrario la richiesta di duttilità per MRN è significativa in entrambe le direzioni.

Tabella 2 - Domanda di duttilità cinematica per la stazione MRN

Stazione		$\mu_1$ (20 Maggio)	$\mu_2$ (29 Maggio)	$\mu_1 + \mu_1$
MRN	EW	5.3	3.7	8.9
MRN	NS	10.4	13.8	24.2

## 6. Effetti direttivi

Si è verificata la presenza di effetti direttivi per le cinque stazioni entro i 50 km dall'epicentro. Il controllo è stato effettuato cercando forti impulsi nei segnali di velocità (e.g., Chioccarelli e Iervolino, 2010). Essendo sconosciuta l'esatta geometria della rottura, la ricerca è stata fatta su tutte le possibili rotazioni dei segnali nel piano orizzontale ma non è stato evidenziato alcun effetto di direttività rilevante ai fini strutturali; si veda Chioccarelli et al., 2012a e 2012b per ulteriori dettagli.

## 7. Conclusioni

Nel lavoro si presenta un'analisi preliminare dei segnali registrati nei due maggiori eventi della sequenza sismica emiliana del maggio 2012. L'obiettivo è stato valutare se la domanda sismica di tali eventi fosse da considerarsi non ordinaria; i.e., atipica rispetto a quanto previsto dai modelli comunemente utilizzati nelle analisi di pericolosità.

Le analisi si sono riferite principalmente alle stazioni più vicine alle sorgenti dei due eventi principali e sono consistite nel confrontare le registrazioni con gli attuali modelli predittivi basati sui dati italiani. A tal fine si sono considerate: (1) misure di intensità elastiche di picco e cicliche, (2) spettri elastici, e (3) parametri di risposta strutturale inelastica di picco e ciclici. In que-

st'ultimo caso si è considerato anche l'effetto cumulato dei due eventi considerati.

I risultati mostrano che le registrazioni non possono essere, in generale, considerate anomale rispetto a quanto atteso. Si è mostrato anche che, come prevedibile, il potenziale di danno della sequenza sismica in termini di domanda di duttilità e di numero di cicli sia significativamente maggiore rispetto a quello associato ai due eventi considerati singolarmente. Questo è particolarmente importante poiché lo stretto intervallo di tempo tra i due eventi non ha permesso interventi di riparazione o di rinforzo a larga scala dopo l'occorrenza del primo terremoto. Il confronto con gli spettri di progetto mostra che i terremoti sono confrontabili con le azioni associate a lunghi periodi di ritorno solo in corrispondenza degli epicentri. Si è brevemente discusso come ciò non rappresenti un motivo sufficiente per mettere in discussione l'analisi probabilistica di pericolosità. Infine, la ricerca di eventuali effetti direttivi non ha evidenziato la presenza di alcun impulso strutturalmente rilevante nei segnali di velocità.

## Ringraziamenti

Lo studio è stato condotto nell'ambito del programma triennale di ricerca ReLUIS (2010-2013) finanziato dal Dipartimento di Protezione Civile.

## Bibliografia

- Albarelo D., D'Amico V. (2008) - Testing probabilistic seismic hazard estimates by comparison with observations: an example in Italy, *Geophysical Journal International*, 175, 1088-1094.
- Bindi D., Pacor F., Luzi L., Puglia R., Massa M., Ameri G., Paolucci R. (2011) - Ground motion prediction equations derived from the Italian strong motion database, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9, 1899-1920.
- C.S.LL.PP (2008) - D.M. 14 Gennaio 2008: Norme tecniche per le costruzioni, 2008. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 29.
- Chioccarelli E., De Luca F., Iervolino I. (2012) - 2012a. Preliminary study of Emilia (May 20h 2012) earthquake ground motion records V2.11 (disponibile su <http://www.reluis.it>).
- Chioccarelli E., De Luca F., Iervolino I. (2012) - 2012b. Preliminary study of Emilia (May 29<sup>th</sup> 2012) earthquake ground motion records V1.0 (disponibile su <http://www.reluis.it>).
- Chioccarelli E., Iervolino I. (2010) - Near-source seismic demand and pulse-like records: a discussion for L'Aquila earthquake, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39, 1039-1062.
- De Luca F. (2011) - Records, capacity curve fits and reinforced concrete damage states within a performance based earthquake engineering framework. PhD thesis. Department of Structural Engineering, University of Naples Federico II. Advisors: G. Manfredi, I. Iervolino, G.M. Verderame. (disponibile su <http://wpag.unina.it/iuniervo/>).
- Ibarra L.F., Medina R.A., Krawinkler H. (2005) - Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34, 1489-1511.
- Iervolino I., Manfredi G., Cosenza E. (2006) - Ground motion duration effects on nonlinear seismic response. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35, 21-38.
- Iervolino I. (2012) - Probabilità e salti mortali: le insidie della validazione dell'analisi di pericolosità attraverso l'occorrenza di singoli terremoti. *Progettazione Sismica*, 2-2012, 37-43. IUSS Press, Pavia, Italy.
- McGuire R.K., Barnhard T.P. (1981) - Effects of temporal variations in seismicity on seismic hazard, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71, 321-334.
- Mirandola Earthquake Working Group (2012) - 2012a (DPC, UNiChieti, Uni Trieste, Regione Umbria) - Report 1- (<http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/ran.wp>)
- Mirandola Earthquake Working Group (2012) -



- 2012b (DPC, UNiCHieti, Uni Trieste, Regione Umbria) - Report 2 - (<http://www.protezionecivile.gov.it/jcms/it/ran.wp>)
- Montaldo V., Faccioli E., Zonno G., Akinci A., Malagnini L. (2005) - Treatment of ground-motion predictive relationships for the reference seismic hazard map of Italy. *Journal of Seismology*, 9(3), 295-316.
- Pacor F., Paolucci R., Ameri G., Massa M., Puglia R. (2011) - Italian strong motion records in ITACA: overview and record processing. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(6), 1741-1759.
- Sabetta F., Pugliese A. (1996) - Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motion. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86, 337-352.
- Stucchi M., Meletti C., Montaldo V., Crowley H., Calvi GM., Boschi E. (2011) - Seismic Hazard Assessment (2003-2009) for the Italian Building Code. *Bulletin of the Seismological Society of America*; 101(4), 1885-1911.