

# È possibile evitare il superamento delle azioni di progetto nell'area epicentrale di terremoti forti?

Is it possible to avoid exceedance of design spectra in the epicentral area of strong earthquakes?

Iunio Iervolino<sup>1</sup>, Massimiliano Giorgio<sup>2</sup> ■

## Sommario

No, praticamente non è possibile.

**Parole chiave:** strutture, norme, rischio sismico.

## Abstract

*No, it is not practically possible.*

**Keywords:** structures, standards, seismic risk.

## 1. Introduzione

La versione più aggiornata del catalogo italiano dei terremoti, il CPTI15 (<http://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/>), attribuisce magnitudo momento ( $M_w$ ) maggiore di sei a tredici terremoti nel periodo 1915-2014, il che vuol dire mediamente uno ogni otto anni circa.<sup>3</sup> Nell'ultimo decennio, tra le sequenze sismiche principali, si contano quelle di L'Aquila (2009), dell'Emilia (2012) e quella del centro Italia 2016-2017 (non compresa in CPTI15), i cui terremoti di magnitudo massima sono stati, rispettivamente,  $M_w$  6.3,  $M_w$  6.1 e  $M_w$  6.5. Questi eventi sono di particolare rilievo per l'ingegneria sismica e l'ingegneria sismologica perché di essi si ha una descrizione come mai prima, grazie agli estesi sistemi di monitoraggio permanenti e temporanei che li hanno registrati (e.g., ReLUIS-INGV Workgroup, 2016). Nello stesso periodo sono state in vigore (o quasi) le norme tecniche per le costruzioni o NTC (CS.LL.PP., 2008), in cui le azioni sismiche di progetto vengono stabilite su base probabilistica. Infatti, come è noto ai lettori di *Progettazione Sismica*, le NTC prescrivono l'uso di pseudo-accelerazioni, raccolte nel cosiddetto *spettro a pericolosità uniforme*, che siano superate con una data probabilità nell'arco di un periodo di tempo di riferimento, che a sua volta dipende dalla vita di progetto e dalla destinazione della costruzione. Per esempio, per una struttura *ordinaria*, progettata per lo *stato limite di salvaguardia della vita*, la azione sismica di progetto è tipicamente rappresentata dallo spettro le cui ordinate sono superate mediamente una volta ogni quattrocentosettantacinque anni. Gli spettri di progetto elastici sono valutati attraverso l'analisi probabilistica di pericolosità sismica descritta in (Stucchi et al., 2011) e i cui principi sono richiamati brevemente nella sezione successiva.

I menzionati terremoti occorsi nel paese di recente, grazie alla ricchezza di evidenze disponibili, hanno permesso di confrontare ex post le azioni osservate con la controparte prescritta per il progetto delle nuove costruzioni, soprattutto nelle aree epicentrali. Il confronto in questione ha mostrato azioni registrate sistematicamente eccedenti gli spettri di norma (si veda anche Iervolino, 2012). Obiettivo di questo articolo è dimostrare che gli spettri di progetto elastici, per motivi intrinseci al modo in cui sono determinati e alla natura dei terremoti, sono tali per cui è particolarmente probabile che siano superati nell'area epicentrale di terremoti quali quelli recenti già richiamati. Di fatto, tale probabilità può essere anche prossima all'unità. Ne consegue che, anche per le strutture di nuova progettazione, è atteso il superamento delle azioni elastiche di progetto praticamente con la stessa frequenza con cui si presentano i terremoti forti sul territorio nazionale.<sup>4</sup> Inoltre, questi superamenti, da

<sup>1</sup> Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II.

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione, Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli.

<sup>3</sup> Questa valutazione grossolana non tiene conto di considerazioni sulle cosiddette scosse di replica o questioni di completezza del catalogo.

<sup>4</sup> Superare l'azione di progetto non necessariamente vuol dire violare lo stato limite grazie a ulteriori margini di sicurezza introdotti durante il progetto, il cui effetto però non è formalmente quantificato a priori (Iervolino et al., 2017). D'altra parte, la prestazione sismica osservata di strutture progettate sismicamente, anche con norme non allo stato dell'arte odierno, è stata spesso più che soddisfacente dal punto di vista della sicurezza. Infine, va ricordato che le strutture possono, in principio, anche fallire per intensità inferiori a quella di progetto.

soli, non forniscono una evidenza della inadeguatezza nella determinazione delle azioni stesse, anzi in pratica le confermano. Per dimostrare la tesi, si parte con quanto osservato, in termini di azioni sismiche, nel sito di Amatrice (RT) durante il terremoto principale della recente sequenza sismica nel centro Italia. In seguito si richiamano brevemente i principi fondamentali per la determinazione delle azioni di progetto secondo le NTC. Successivamente, si mostra come, a causa della rapidità con la quale l'effetto dei terremoti si attenua con la distanza sito-sorgente, solo i terremoti che occorrono in prossimità del sito in questione contribuiscano significativamente alla pericolosità. Tra questi, quelli più frequenti poco probabilmente causano il superamento della accelerazione di progetto, mentre è alta la probabilità che quelli più rari (i.e., quelli di elevata magnitudo) provochino tale superamento. Se ne conclude, quindi, che per questi ultimi il rispetto del requisito di norma (e.g., superamento delle azioni di progetto mediamente una volta ogni quattrocentosettantacinque anni) è sostanzialmente garantito dal fatto che per tali eventi la probabilità di presentarsi in prossimità del sito della costruzione è molto bassa. La sistematicità con la quale si osserva il superamento delle azioni di progetto in area epicentrale non è affatto indice della inadeguatezza delle azioni di progetto delle norme, ma al contrario è una prevedibile conseguenza della logica con cui sono determinate. Il lavoro si conclude con considerazioni su tale logica per cui, guardando il patrimonio costruito nella sua interezza, ci si dovrà aspettare di osservare il superamento delle azioni di progetto per le costruzioni ogni volta che si verifichi un terremoto forte, in quanto, qualunque sia la localizzazione della sorgente, ci sarà comunque un'area epicentrale.

## 2. Gli spettri a pericolosità uniforme

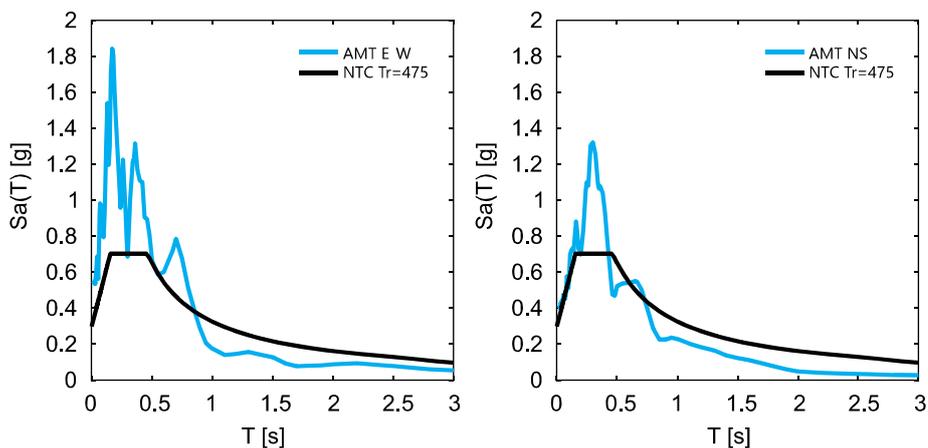
Secondo le NTC, l'intensità del terremoto di progetto è rappresentata da spettri elastici sito-specifici. Gli spettri forniscono le pseudo-accelerazioni,  $S_a$ , relative a un insieme di oscillatori semplici, con periodo di oscillazione naturale,  $T$ , variabile, ma stesso fattore di smorzamento. Tali pseudo-accelerazioni (semplicemente *accelerazioni* nel seguito) sono quelle con cui bisogna verificare le strutture in relazione a una determinata prestazione sismica di progetto (il menzionato stato limite).

La Figura 1 mostra gli spettri delle componenti orizzontali del moto sismico nel sito di Amatrice (stazione AMT) registrate durante il terremoto di magnitudo maggiore occorso nella sequenza dell'Italia centrale, quello di magnitudo 6.5 del trenta ottobre duemilasedici (ReLUIS-INGV Workgroup, 2016). Nella stessa figura è riportato lo spettro che si userebbe, secondo le NTC, per il progetto di una struttura ordinaria rispetto allo stato limite di salvaguardia della vita. Questo spettro è calcolato in modo che le sue ordinate siano superate mediamente una volta ogni determinato numero di anni, tale numero è detto anche periodo di ritorno ( $T_r$ ), e lo spettro in figura si riferisce a  $T_r = 475$  anni. Si nota come le azioni di progetto siano state di molto superate in un intervallo di periodi di oscillazione relativamente ampio. Si dimostrerà di qui a breve che ciò non è strano e non indica inadeguatezza degli spettri di norma stessi, bensì è del tutto prevedibile, vista la natura dagli spettri stessi.

### 2.1 Il calcolo degli spettri elastici di progetto

Si è detto che gli spettri di progetto elastici delle NTC sono, di fatto, spettri a pericolosità uniforme. Questi si calcolano, per un sito di interesse, attraverso l'analisi probabilistica di pericolosità sismica. Considerando come misura di intensità del terremoto la accelerazione spettrale  $S_a(T)$ , l'analisi di pericolosità consiste nel calcolo del numero atteso di terremoti che in un anno causano il superamento di un suo valore arbitrario, chiamiamolo  $sa$ . Il calcolo di tale tasso, qui indicato come  $\lambda_{S_a(T) > sa}$ , procede come segue. Per ciascuna sorgente sismica, ad esempio una area geografica in cui ci si aspetta possano occorrere terremoti di caratteristiche simili, si valuta il tasso,  $\nu$ . Esso è il numero medio annuo di terremoti nella *zona sismogenetica* in questione. Questa è poi suddivisa, attraverso una fitta griglia, in  $k$  sorgenti puntuali di terremoti. A ciascun punto,  $i = \{1, 2, \dots, k\}$  è assegnato lo stesso tasso di occorrenza dei terremoti, pari a  $\nu/k$ . Nota la distanza,  $r_i$ , della  $i$ -esima sorgente puntuale dal

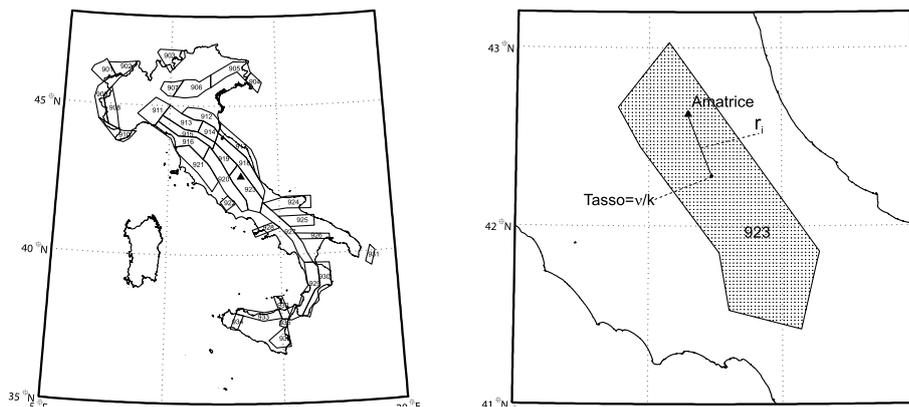
**Figura 1**  
Spettri di risposta orizzontali delle componenti est-ovest e nord-sud (a sinistra e destra, rispettivamente) registrate ad Amatrice (stazione AMT) durante il terremoto M6.5 del trenta ottobre 2016 e spettri di norma per  $T_r = 475$  anni.



sito di interesse, si calcola probabilità condizionata,  $P[Sa(T) > sa | m, r_i]$ , che un terremoto di magnitudo fissata,  $m$ , generato da tale sorgente, produca un superamento della misura di intensità al sito considerato. Questa probabilità, che è tipicamente computata utilizzando le cosiddette *leggi di attenuazione* (e.g., Ambraseys et al., 1996), si moltiplica per il tasso  $v/k$  associato alla sorgente  $i$ -esima. Tale calcolo si ripete per tutti i valori possibili di magnitudo e si mediano i risultati ottenuti utilizzando come pesi le probabilità che le magnitudo considerate siano osservate; i.e.,  $P[M=m]$ ,  $m \in (M_{min}, M_{max})$ .<sup>5</sup> Di solito, più alta è la magnitudo minore è la probabilità di osservarla; inoltre, tipicamente si assume che  $P[M=m]$  non dipenda da  $i$ . Una volta completato il calcolo per un punto si procede con un altro punto della griglia fino a completarli tutti. Infine si sommano i risultati ottenuti, come illustrato in equazione 1.<sup>6</sup>

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \sum_{i=1}^k \sum_{M_{min}}^{M_{max}} P[Sa(T) > sa | m, r_i] \cdot \frac{v}{k} \cdot P[M=m] \quad (1)$$

A titolo esplicativo, il pannello di sinistra di Figura 2 riporta il modello di trentasei zone sismogenetiche (Meletti et al., 2008) usato nella analisi di pericolosità di cui in Stucchi et al., 2011, in cui ogni zona è caratterizzata da un proprio tasso,  $v_j$ ,  $j = \{1, 2, \dots, 36\}$ . Nel pannello di destra di Figura 2, si mostra invece, la zona chiamata 923 che contiene il sito di Amatrice e una possibile griglia di  $k$  punti in cui distribuire la sismicità per calcolare il tasso in equazione 1.



**Figura 2**  
Modello di trentasei zone sismogenetiche alla base della mappa di pericolosità sismica utilizzata per stabilire le azioni di progetto secondo le NTC (sinistra); zona 923 e possibile discretizzazione per calcolare la pericolosità per il sito di Amatrice (destra).

Se il calcolo in equazione 1 si ripete per tutti i possibili valori di  $sa$  in un intervallo di interesse, allora si ottiene una curva che riporta  $\lambda_{Sa(T) > sa}$  in funzione di  $sa$ , detta *curva di pericolosità*. Per esempio, si riporta in Figura 3 (sinistra) una serie di curve di pericolosità per il sito di Amatrice. Ciascuna curva si riferisce ad un'ordinata spettrale diversa  $Sa(T)$ ,  $T \in (0s, 2s)$ . Per semplificare la discussione, ma senza ledere la generalità della trattazione, le curve sono state calcolate considerando solo la zona 923 (la più importante visto che contiene il sito, vedi Figura 1) tra quelle del modello di Meletti et al., 2008, e la legge di attenuazione di Ambraseys et al., 1996. Il tasso di occorrenza dei terremoti nella zona 923 è quello usato per la mappa nazionale (comunicazione personale di Carlo Meletti, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Pisa) e si riferisce all'intervallo di magnitudo  $m \in (4.3, 7.3)$ . Il software di calcolo è quello descritto in Iervolino et al., 2016.

Supponiamo ora si voglia calcolare lo spettro a pericolosità uniforme le cui ordinate sono superate mediamente ogni quattrocentosettantacinque anni. Secondo il modello classico (Cornell, 1968), il legame tra tasso annuale di superamento e periodo di ritorno si esprime secondo la relazione  $\lambda_{Sa(T) > sa} = 1/T_r$ , cioè sono l'uno il reciproco dell'altro. Siccome  $1/475 = 0.0021$ , risulta che le accelerazioni che nelle curve di pericolosità corrispondono a  $\lambda_{Sa(T) > sa} = 0.0021$  sono superate, al sito, mediamente una

<sup>5</sup> Allo scopo di semplificare l'illustrazione, si trattano variabili aleatorie continue (e.g., la magnitudo) come discrete.

<sup>6</sup> Se il sito è interessato da più sorgenti sismiche, diciamo che siano in numero di  $s$ , allora il tasso di superamento al sito è semplicemente la somma dei tassi ottenuti considerando una zona sismogenetica alla volta:

$$\lambda_{Sa(T) > sa} = \sum_{j=1}^s \lambda_{Sa(T) > sa, j}$$

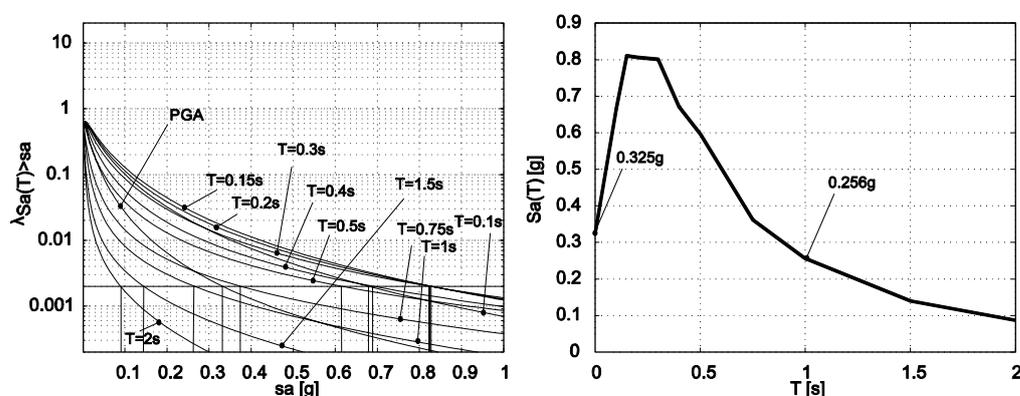
volta ogni quattrocentosettantacinque anni. In conclusione, entrando nell'asse verticale di ciascuna curva con tale valore del tasso e riportando l'ascissa corrispondente in funzione del periodo di oscillazione si ottiene lo spettro elastico di progetto cercato. Tale spettro, per il sito di Amatrice, è dato in Figura 3 (destra).

Si osservi che, attraverso l'equazione 2, si può calcolare la probabilità che una ordinata dello spettro a pericolosità uniforme sia superata almeno una volta in un dato intervallo di tempo  $\Delta t$ .

$$P[\text{Al sito si osserva almeno una volta } Sa(T) > sa \text{ in } \Delta t \text{ anni}] = 1 - e^{-\lambda_{Sa(T) > sa} \cdot \Delta t} \quad (2)$$

Nel caso in esame, la probabilità di osservare almeno una volta  $Sa(T) > sa_{T_r=475}$  in  $\Delta t = 50$  anni è 0.1, in quanto il tasso annuo di superamento di ciascuna ordinata è pari a 0.0021. Cioè, applicando l'equazione 2 risulta:  $0.1 = 1 - e^{-0.0021 \cdot 50}$ . Per questo motivo, lo spettro in Figura 3, come riporta la didascalia, si può anche riferire come quello corrispondente a 10% di probabilità di superamento in 50 anni.

**Figura 3**  
Curve di pericolosità per il sito di Amatrice, considerando categoria di sottosuolo B secondo la classificazione NTC (sinistra); spettro a pericolosità uniforme corrispondente a 10% di probabilità di superamento in 50 anni (destra).



È da notare infine, ed è altresì evidente dalla equazione 1, che lo spettro così costruito non può rappresentare lo spettro di alcun terremoto specifico (cioè di magnitudo e distanza fissate). Peraltro, le caratteristiche dei terremoti che maggiormente contribuiscono al superamento dei valori in ordinata variano al variare del periodo di oscillazione (Iervolino et al., 2011).

### 3. Contributo dei singoli terremoti alla pericolosità

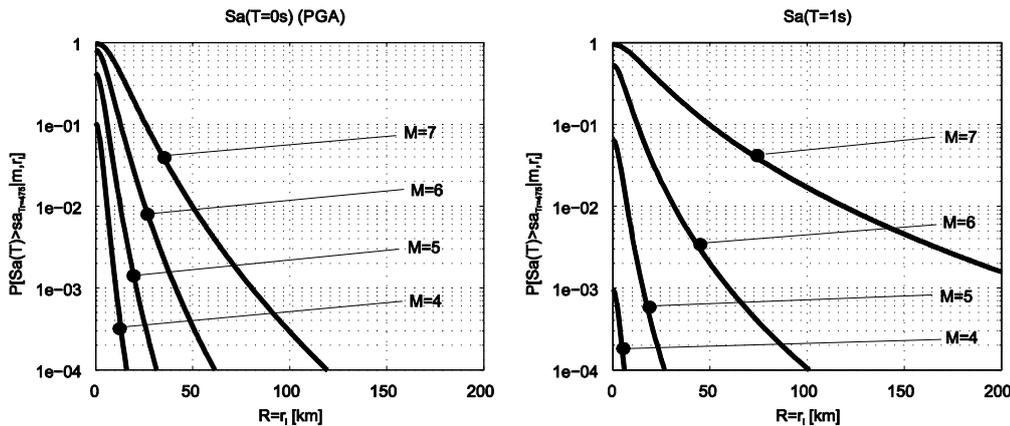
Nell'equazione 1, il prodotto  $P[Sa(T) > sa | m, r_i] \cdot (v/k) \cdot P[M=m]$  deve interpretarsi come il contributo alla pericolosità dei terremoti di magnitudo  $M=m$  che si originano nel punto  $i$ -esimo della griglia di sorgenti puntuali. Si noti, che il termine  $(v/k) \cdot P[M=m]$  rappresenta il tasso di terremoti di magnitudo  $M=m$  in ognuna delle sorgenti puntuali in cui è stata suddivisa la zona sismogenetica (come accennato, tale termine non dipende dall'indice  $i$  e quindi da dove si trova la sorgente puntuale rispetto al sito). Viceversa, il fattore  $P[Sa(T) > sa | m, r_i]$ , per i meccanismi fisici della propagazione dei terremoti, si abbatta rapidamente con la distanza. A titolo di esempio, in Figura 4 si mostra l'andamento, secondo il modello di attenuazione di Ambraseys et al., 1996, della probabilità di superamento  $P[Sa(T) > sa | m, r_i]$  in funzione della distanza sito-sorgente e della magnitudo, quando  $sa$  corrisponde alla  $Sa(T=0s) = 0.325$  g – cioè la PGA – o alla  $Sa(T=1s) = 0.256$  g dello spettro elastico di progetto di Figura 3, calcolato per Amatrice. Tali valori sono entrambi indicati genericamente come  $sa_{T_r=475}$ .

La figura mostra come sia molto improbabile che un terremoto, che occorresse a distanze superiori a 50 km dal sito di interesse, causi il superamento della accelerazione spettrale in questione. Infatti, solo per magnitudo  $M=7$  e per  $Sa(T=1s)$  tale probabilità è ancora dell'ordine del 10%; cioè relativamente bassa, ma ancora apprezzabile.

Si torni ora ad esaminare il calcolo di pericolosità: come ampiamente discusso, le ordinate dello spettro elastico di progetto sono quelle per cui la doppia sommatoria in equazione 1 fornisce come risultato  $\lambda_{Sa(T) > sa} = 0.0021$ . Per cui, è certamente vero che nessuno dei contributi di cui sopra può eccedere tale valore, cioè, per ogni  $i$  e  $m$ :

$$P[Sa(T) > sa | m, r_i] \cdot (v/k) \cdot P[M=m] \leq 0.0021. \quad (3)$$

Per rispettare questo vincolo, i terremoti frequenti, quando occorrono, possono avere probabilità bassa di superare la accelerazione che corrisponde al tasso che si sta calcolando. Di converso, i terremoti più rari, cioè con basso tasso di accadimento, possono avere probabilità  $P[Sa(T) > sa | m, r_i]$  anche relativamente molto elevata.



**Figura 4**  
 Probabilità, in funzione della magnitudo e della distanza sito-sorgente, che un terremoto causi superamento della  $Sa(T = 0s)$  (sinistra) e della  $Sa(T = 1s)$  (destra) che ha periodo di ritorno del superamento pari a  $T_r = 475$  anni ad Amatrice.

Per fissare le idee, in Tabella 1, con riferimento alla PGA con tasso annuo di superamento  $\lambda_{Sa(T)>sa} = 0.0021$ , si riportano in contributi alla doppia sommatoria in equazione 1, cioè i termini  $P[Sa(T=0s) > sa | m, r_i] \cdot (v/k) \cdot P[M=m]$ , per diversi intervalli di magnitudo e distanza.

**Tabella 1** - Scomposizione del calcolo di pericolosità in intervalli di magnitudo e distanza sito-sorgente per evidenziare i contributi di terremoti di caratteristiche specifiche.

$M = m$							
R= r [km]	4.3-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.3
0-5	0.0002125369	0.0001646155	0.0000838296	0.0000593162	0.0001336815	0.0001394064	0.0000538077
5-15	0.0000933151	0.0001075985	0.0000816569	0.0000953153	0.0001840470	0.0002588544	0.0001386767
15-25	0.0000034110	0.0000067848	0.0000085146	0.0000177255	0.0000398500	0.0000813592	0.0000675345
25-35	0.0000001951	0.0000006064	0.0000009991	0.0000031291	0.0000066940	0.0000178195	0.0000195228
35-45	0.0000000081	0.0000000590	0.0000001234	0.0000004943	0.0000011347	0.0000034880	0.0000048333
45-55	0.0000000000	0.0000000039	0.0000000135	0.0000000689	0.0000003040	0.0000010725	0.0000018269
55-65	0.0000000000	0.0000000003	0.0000000028	0.0000000201	0.0000000845	0.0000003571	0.0000006842
65-75	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000005	0.0000000065	0.0000000422	0.0000001815	0.0000004042
75-85	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000001	0.0000000021	0.0000000170	0.0000000823	0.0000002046
85-95	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000007	0.0000000070	0.0000000367	0.0000001006
95-105	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000002	0.0000000043	0.0000000242	0.0000000730
105-115	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000001	0.0000000016	0.0000000100	0.0000000324
115-125	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000003	0.0000000023	0.0000000079
125-135	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000000	0.0000000003	0.0000000011

Ovviamente, la somma di tutte le celle (al netto delle approssimazioni dovute alla rappresentazione in tabella) restituisce proprio il risultato di equazione 1, cioè 0.0021. Tuttavia, sommando i valori che corrispondono a sorgenti che si trovano a non più di 35 km dal sito (riquadro nero in tabella), si ottiene 0.00208. Ciò evidenzia che i terremoti oltre 35 km dal sito di Amatrice contribuiscono solo per lo 0.8% alla pericolosità in termini di PGA con periodo di ritorno del superamento  $T_r = 475$  anni, questo a causa della attenuazione (vedi Figura 4).

Concentrando ora l'attenzione solo sui contributi delle sorgenti nel riquadro, vale la pena, per semplicità, ulteriormente raggruppare le magnitudo in classi ampie:  $M \in (4,3,5)$ ,  $M \in (5,6)$ ,  $M \in (6,7)$ ,  $M > 7$ . Nella Tabella 2, per i terremoti appartenenti a queste classi di magnitudo, si riportano dapprima i contributi al tasso totale di superamento della PGA con  $T_r = 475$  anni ad Amatrice (come già discusso, questi contributi costituiscono la parte principale della doppia sommatoria in equazione 1 perché sommano a 0.00208). La seconda colonna riporta il tasso annuo di occorrenza dei terremoti appartenenti a ciascuna classe. Tali tassi sono indicati come  $v_m$  e sono stati ottenuti sommando i contributi, al tasso totale della zona 923, dei punti della zona sismogenetica che cadono nell'area entro 35 km dal sito. La terza colonna è ottenuta facendo il rapporto tra le celle della prima e quelle corrispondenti della seconda e, secondo le regole del calcolo delle probabilità, restituisce la probabilità che un terremoto, della classe di magnitudo considerata e che occorresse entro 35 km da Amatrice, produca superamento della PGA con  $T_r = 475$  anni; cioè  $P[Sa(T=0s) > sa_{T_r=475} | m, r \leq 35 \text{ km}]$ .

Tabella 2 - Classi di magnitudo, tassi annuali di occorrenza entro 35 km da Amatrice e probabilità che causino, una volta occorsi, il superamento della PGA con periodo di ritorno  $T_r = 475$  anni.

M=m	Contributo a $\lambda_{Sa(T)>sa}$	$\nu_m$	$P[Sa(T=0s)>sa_{T_r=475}   m, r \leq 35 \text{ km}]$
4.3-5.0	0.00059	0.164	0.004
5.0-6.0	0.00035	0.016	0.022
6.0-7.0	0.00086	0.004	0.242
M>7.0	0.00028	0.0006	0.466
Somma della colonna: 0.00208 $\approx$ 0.0021			

Questo è il risultato più importante per dimostrare le tesi di questo lavoro. Infatti, analizzando l'ultima colonna è evidente che nel caso di occorrenza dei terremoti più frequenti,  $M \in (4.3, 5.0)$  e  $M \in (5.0, 6.0)$ , la probabilità di superare la PGA di progetto è bassa, minore del 3%, quindi lo spettro a pericolosità uniforme rappresenta una soglia difficile da superare per questo tipo di terremoti. Per terremoti  $M \in (6.0, 7.0)$  la probabilità di superamento è quasi 0.25 mentre per  $M > 7$  è addirittura intorno al 50%.<sup>7</sup> Se ne deduce, incontrovertibilmente, che lo spettro a pericolosità uniforme implicitamente sia relativamente facile a superarsi per i terremoti più forti e vicini; di fatto, la protezione per questi terremoti è affidata al fatto che siano molto rari a occorrere in prossimità del sito di interesse. Di contro, quando essi occorrono vicino al sito in questione è molto probabile, e implicitamente contemplato dal calcolo di pericolosità, che possano causare il superamento delle azioni di progetto per molte strutture.

### 3.1 L'area epicentrale di un terremoto M6.5

Alla luce di quanto mostrato si può tornare ad analizzare quanto successo ad Amatrice durante il terremoto principale della recente sequenza sismica. Infatti, quello occorso è stato un terremoto relativamente forte secondo la Tabella 2, ma che occorrendo vicino al sito ( $r=7$  km) era molto probabile provocasse il superamento della PGA con periodo di ritorno  $T_r = 475$  anni. Per questo, quanto osservato è in perfetto accordo con i modelli alla base della analisi di pericolosità, anzi, guardando anche la Figura 4 (destra) ci si sarebbe potuto aspettare superamento anche per  $Sa(T=1s)$ .

In realtà, tale discorso si può estendere a tutta l'area epicentrale del terremoto. Per comprendere per quali località era preven- tivabile un superamento delle azioni di progetto per il terremoto occorso, può valere la pena analizzare la Figura 5.

Essa, per prima cosa, mostra la proiezione in superficie della rottura che ha determinato il terremoto (linea tratto-punto) e i confini dei comuni nella zona (linee grigie). Nella stessa figura sono anche riportate, come aree campite a colori, le accelerazioni di progetto (relative a  $T_r = 475$  anni) secondo le NTC (dalla analisi in Stucchi et al., 2011).<sup>8</sup> Ancora una volta, si sono considerate due ordinate spettrali  $Sa(T=0s)$  (sinistra) e  $Sa(T=1s)$  (destra). Le linee nere di iso-probabilità, invece, rappresentano i punti a diversa probabilità,  $p$ , di osservare il superamento delle accelerazioni di progetto NTC di cui alla mappa colorata sotto. Per ciascun sito della mappa, tali probabilità sono state calcolate attraverso la relazione 4, dove  $R$  è la distanza del sito dalla proiezione della rottura, mentre  $sa_{T_r=475}$  è l'ordinata di progetto nel sito -  $Sa(T=0s)$  a sinistra e  $Sa(T=1s)$  a destra. Ancora una volta, tali probabilità sono state calcolate con la legge di attenuazione di Ambraseys et al., 1996, pure usata per determinare le azioni di norma.

$$p = P[Sa(T) > sa_{T_r=475} | M = 6.5, R = r] \quad (4)$$

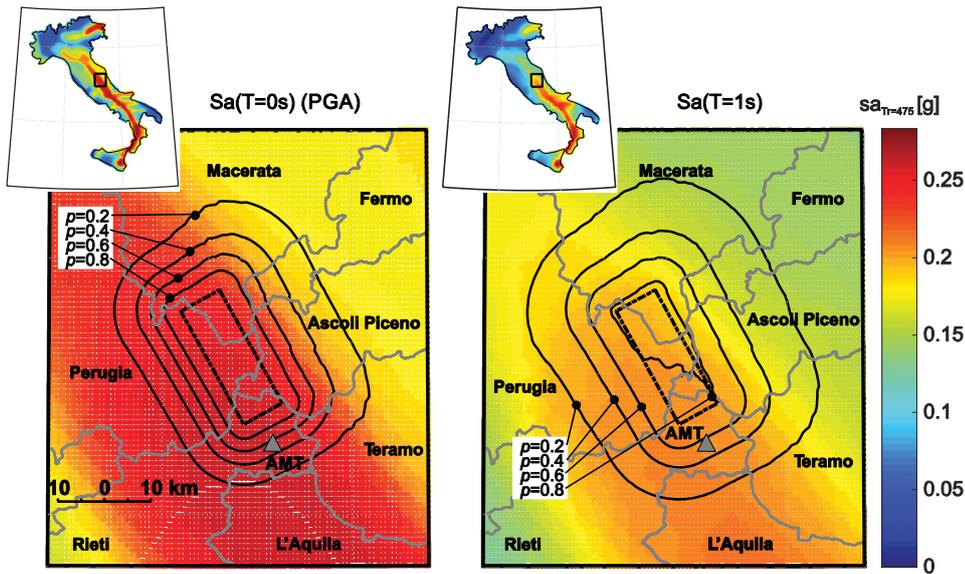
Si nota che, in ampie zone vicino alla sorgente, era molto probabile che per il terremoto occorso le azioni di progetto fossero superate. Come argomentato per Amatrice, ciò non smentisce affatto la mappa di pericolosità, ma ne è anzi una sua caratteristica intrinseca. D'altra parte, la probabilità di superare l'azione sismica per un terremoto M6.5, originatosi dove si trova la faglia di quello del trenta ottobre, diventa bassa rapidamente via via che ci si allontani dalla rottura.

## 4. Conclusioni

Si è argomentato in questo lavoro su cosa aspettarsi, riguardo alle azioni di progetto, per le nuove costruzioni in area epicentrale di terremoti forti. Dopo aver ricordato che gli spettri elastici di progetto sono di fatto spettri a pericolosità uniforme,

<sup>7</sup> Ragionamento del tutto analogo vale per qualunque altra ordinata spettrale in Figura 3, per questo è pleonastico discutere  $Sa(T=1s)$ .

<sup>8</sup> La mappa con le accelerazioni di progetto secondo le NTC si riferisce, per tutti i siti, a condizioni di sottosuolo tipo A, secondo la classificazione in CS.LL.PP., 2008.



**Figura 5**  
Azioni di progetto relative a  $T_r=475$  anni per  $S_a(T=0s)$  (sinistra) e  $S_a(T=1s)$  (destra) nella zona del terremoto M6.5 del 30 ottobre 2016 e zone a eguale probabilità di superamento delle azioni di progetto (i.e.,  $sa_{T_r=475}$ ) per un terremoto di magnitudo e localizzazione pari a quelle occorse.

calcolati attraverso l'analisi probabilistica di pericolosità sismica, si è evidenziato che:

1. per ogni fissata magnitudo, per effetto della propagazione, i terremoti che potrebbero occorrere vicino al sito della costruzione sono tipicamente quelli che maggiormente contribuiscono alla pericolosità del sito;
2. lo spettro elastico di progetto è fatto di ordinate che sono difficilmente superate dai terremoti più frequenti tra quelli contemplati nel calcolo di pericolosità, mentre sono superate con alta probabilità (anche prossima all'unità) dai terremoti più forti, qualora essi occorressero in prossimità del sito in questione;
3. ne consegue che lo spettro elastico di progetto, intrinsecamente, rappresenta una soglia dello scuotimento alta per terremoti relativamente frequenti, ma non lo è affatto quelli più rari (i.e., quelli di magnitudo più elevata), per questi ultimi il rispetto dei requisiti dettati dalla norma (e.g., il superamento dello spettro di progetto ogni quattrocentosettantacinque anni) è sostanzialmente garantito dal fatto che per tali eventi la probabilità di presentarsi in prossimità del sito della costruzione è molto bassa;
4. per questo, quando occorre un terremoto raro, ma prossimo al sito, bisogna attendersi il superamento delle azioni di progetto con probabilità che può anche essere prossima a uno.

In conclusione, è lecito ritenere che raramente una fissata struttura vedrà superate le azioni elastiche di progetto perché è raro che un terremoto forte occorra nelle sue vicinanze (e.g., una volta mediamente ogni quattrocentosettantacinque anni), ma allo stesso tempo, tali superamenti non possono essere considerati rari, perché attesi ovunque occorra un terremoto forte (molto più frequentemente che ogni quattrocentosettantacinque anni).

### Ringraziamenti

Questo lavoro è stato sviluppato nell'ambito del progetto ReLUIIS-DPC 2014-2018, finanziato dalla Presidenza del Consiglio dei Ministri - Dipartimento della Protezione Civile. Gli autori ringraziano il Prof. Ing. Mauro Dolce e il Dott. Massimiliano Stucchi per i commenti a versioni preliminari di questo lavoro.

### Bibliografia

- Ambraseys N.N., Simpson K.A., Bommer J.J. (1996) - Prediction of horizontal response spectra in Europe, *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 25(4), 371-400.
- Cornell C.A. (1968) - Engineering seismic risk analysis, *B. Seismol. Soc. Am.*, 58, 1583-1606.
- CS.LL.PP. (2008) - D.M. 14 gennaio, Norme tecniche per le costruzioni, *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana* 29, 2008.
- Iervolino I. (2012) - Probabilità e salti mortali: le insidie della validazione della analisi di pericolosità attraverso l'occorrenza di singoli terremoti, *Progettazione Sismica*, 2-2012, 37-43.
- Iervolino I., Chioccarelli E., Cito P. (2016) - REASSESS V1.0: a computationally-efficient software for probabilistic seismic hazard analysis, VII European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS, Crete Island, Greece, 5-10 giugno.
- Iervolino I., Chioccarelli E., Convertito V. (2011) - Engineering design earthquakes from multimodal hazard disaggregation, *Soil. Dyn. Earthq. Eng.*, 31, 1212-1231.

- Iervolino I., Spillatura A., Bazzurro P. (2017) - RINTC Project – Assessing the (implicit) seismic risk of code-conforming structures in Italy, COMPDYN 2017 - 6th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering, M. Papadrakakis, M. Fragiadakis (eds.), Rhodes Island, Greece, 15-17 giugno.
- Meletti C., Galadini F., Valensise G., Stucchi M., Basili R., Barba S., Vannucci G., Boschi E. (2008) - A seismic source zone model for the seismic hazard assessment of the Italian territory, *Tectonophysics*, 450(1), 85-108.
- ReLUIS-INGV Workgroup (2016) - Preliminary study on strong motion data of the 2016 central Italy seismic sequence V6. Disponibile a <http://www.reluis.it>.
- Stucchi M., Meletti C., Montaldo V. (2011) - Seismic hazard assessment (2003-2009) for the Italian building code, *B. Seismol. Soc. Am.*, 101, 1885-1911.

## **Gli Autori**

### **Iunio Iervolino**

Iunio Iervolino è professore ordinario per il settore scientifico disciplinare *Tecnica delle Costruzioni* presso l'Università degli Studi di Napoli Federico II, dove insegna *Dinamica delle Costruzioni e Ingegneria Sismica*, e dove coordina il corso di laurea magistrale in *Ingegneria Strutturale e Geotecnica*. Iunio Iervolino si è laureato nel 2000, presso la Federico II, in *ingegneria gestionale della logistica e della produzione*. Nel 2004 ha conseguito un master in *Earthquake Risk Reduction* presso lo IUSS di Pavia e un dottorato in *Rischio Sismico* alla Federico II. Dal 2003 al 2007 ha collaborato con l'università di Stanford (California) sotto la guida di C. Allin Cornell. È autore di più di duecento pubblicazioni scientifiche sul rischio sismico delle strutture e infrastrutture civili, l'ingegneria sismologica, e l'allerta sismica preventiva. Tra i riconoscimenti ricevuti, vale la pena ricordare la borsa Fulbright vinta nel 2014 per svolgere ricerca presso la Stanford University e l'AXA Research Fund Grant vinto nel 2011.

### **Massimiliano Giorgio**

Massimiliano Giorgio è professore associato per il settore scientifico disciplinare *Statistica per la Ricerca Sperimentale e Tecnologica* presso il dipartimento di *Ingegneria Industriale e dell'Informazione* della Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli. Laureato in *Ingegneria meccanica* presso la Università degli Studi Federico II nel 1991, nel 1997 consegue presso la stessa università il titolo di dottore di ricerca in *Statistica Computazionale ed Applicazioni*. Dal 1996 tiene/ha tenuto corsi di *Metodi Statistici di Controllo della Qualità, Teoria e Metodi Statistici dell'Affidabilità, Elementi di Affidabilità, Affidabilità e Manutenzione, Statistica e Calcolo delle Probabilità, Statistica per la Ricerca e lo Sviluppo Sperimentale, Affidabilità e Controllo della Qualità, Probabilità e Informazione* presso l'Università degli Studi del Sannio, l'Università degli studi di Napoli Federico II e l'Università degli studi della Campania Luigi Vanvitelli (già Seconda Università degli Studi di Napoli). È autore di più di cento pubblicazioni su tematica di *statistica industriale, affidabilità, modellazione stocastica di processi di degrado e valutazione e mitigazione dei rischi naturali*. Nel 2012 ha ricevuto l'IIE transactions 2012 best paper award in *Quality and Reliability Engineering* per il lavoro: Giorgio M., Guida M., Pulcini G., *An age- and state-dependent Markov model for degradation processes*, *IIE Transactions*, 43: 9, pp 621-632.