

1.7 Uno sguardo agli spettri delle NTC08 in relazione al terremoto de L'Aquila

H. Crowley¹, M. Stucchi², C. Meletti², G.M. Calvi¹, F. Pacor² ■

1.7.1 Introduzione

Le numerose registrazioni del terremoto de L'Aquila hanno indotto alcuni confronti fra gli spettri dei segnali registrati e quelli di alcune norme sismiche, fra cui in particolare quelli degli Eurocodici 8 (CEN, 2004) e delle Norme Tecniche per le Costruzioni, 2008, chiamate nel seguito NTC08.

Gli spettri delle norme rappresentano in genere approssimazioni conservative degli spettri a pericolosità uniforme (UHS), ancorati a valori di accelerazione di picco a determinati periodi di ritorno (di solito 475 anni). Gli spettri delle NTC08 tendono a approssimare maggiormente gli UHS. Il confronto con gli spettri registrati ha mostrato che in alcuni casi i parametri del moto del suolo hanno superato anche di molto quelli previsti dagli spettri delle NTC08 (per un periodo

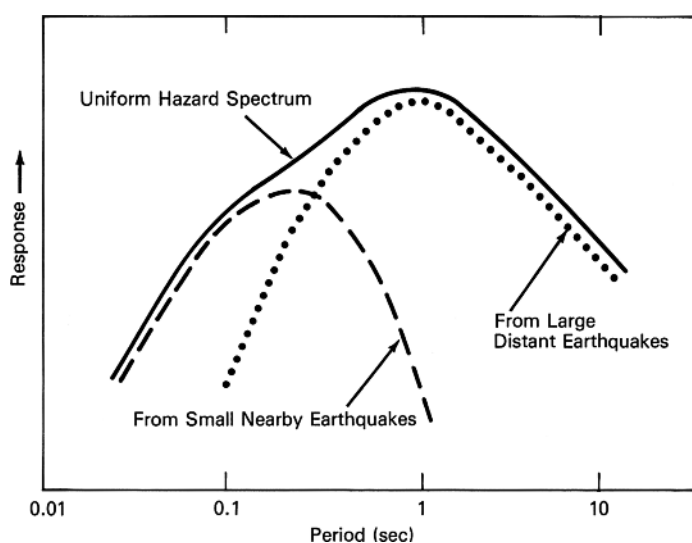
di ritorno di 475 anni. Questo lavoro affronta quindi il problema se i confronti fra spettri nelle normative e spettri delle registrazioni abbiano significato e se possano essere utilizzati per "validare" (o viceversa) gli spettri delle norme stesse. Il terremoto de L'Aquila è stato uno degli eventi per il quale si è avuto il maggior numero di registrazioni nella storia recente italiana. La quantità di informazioni ottenuta da queste registrazioni contribuirà a migliorare la conoscenza dei terremoti e delle azioni sismiche. Scopo dell'articolo è di capire se, a valle del terremoto, l'aumento delle conoscenze suggerisce modifiche alle modalità con le quali la pericolosità sismica dell'area è stata valutata e, con essa, le azioni sismiche prescritte per costruire secondo le NTC08.

1.7.2 Gli spettri della normative italiana

Gli spettri delle norme rappresentano in genere approssimazioni conservative degli spettri a pericolosità uniforme (UHS). Uno spettro a pericolosità uniforme è uno spettro di risposta calcolato mediante una valutazione probabilistica della pericolosità sismica, nel quale ciascuna ordinata spettrale ha lo stesso periodo di ritorno (in media, l'intervallo fra le eccedenze di una data ordinata spettrale)³. Si deve osservare che per un dato periodo di ritorno, diverse ordinate spettrali dello spettro a pericolosità uniforme possono essere prodotte da diversi terremoti considerati nella analisi di pericolosità (Fig. 1). Le norme sismiche usano gli spettri a pericolosità uniforme in modo tale che tutte le costruzioni siano progettate per lo stesso livello di rischio (ovvero di probabilità di collasso), indipendentemente dal periodo di vibrazione. Costruzioni di diversa altezza e tipologia (e quindi di diverso periodo proprio) non vengono progettate per resistere ad un unico evento in quanto, se questo fosse di magnitudo bassa e a breve distanza, porterebbe a progettare in modo più severo le costruzioni basse rispetto a quelle alte, e viceversa nel caso di magnitudo alte e più distanti, come si può dedurre dalla figura 1.

È evidente che costruzioni in una data area urbana saranno, con buona probabilità, soggette a un unico terremoto; pertanto, considerando la diversa risposta di questi edifici allo scuotimento, ci si aspetta una diversità nella prestazione e nel danno. Comunque, dato che la magnitudo e la localizzazione del prossimo terremoto sono generalmente sconosciuti, la filosofia corrente è di progettare le costruzioni per scuotimenti che hanno la stessa probabilità di

Fig. 1
Rappresentazione schematica di uno spettro a pericolosità uniforme a un dato periodo di ritorno nel quale il contributo alla pericolosità a periodi corti e lunghi proviene da sorgenti diverse (Reiter, 1990).



¹ Fondazione Eucentre - Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia. www.eucentre.it

² INGV - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Milano. www.ingv.it

³ Il periodo di ritorno è l'inverso della frequenza annuale di eccedenza; se le eccedenze del moto del suolo sono di tipo stazionario, un modello di Poisson può essere usato per trasformare la frequenza annuale di eccedenza in probabilità annuale di eccedenza, ovvero in probabilità di eccedenza in un dato intervallo di tempo (es. 50 anni). Un periodo di ritorno di 475 anni corrisponde a un 10% di probabilità di eccedenza in 50 anni.

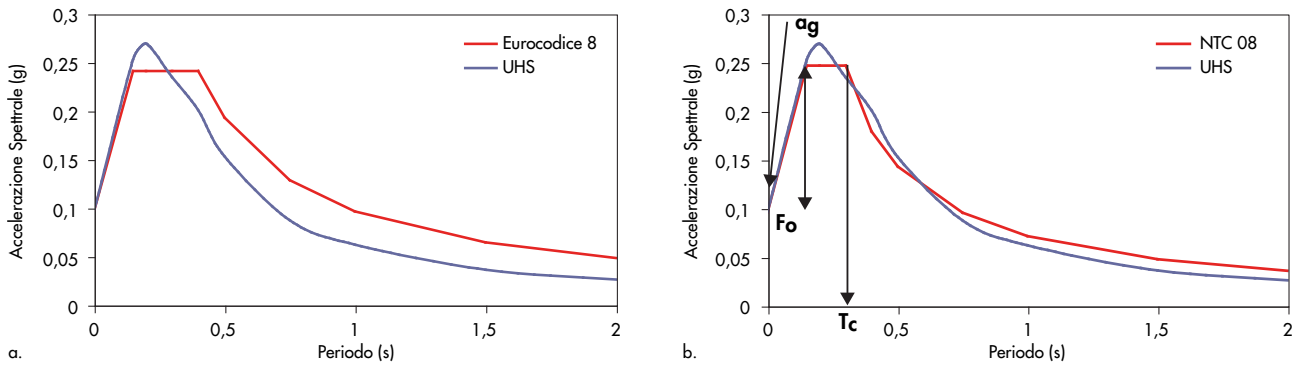


Fig. 2
 Confronto di uno spettro a pericolosità uniforme (UHS) con (a) tipico spettro di progetto ancorato alla stima di a_g e con (b) spettro di progetto definito in NTC08 (sono mostrati anche i parametri forniti dalle stesse norme per costruire lo spettro).

eccedenza. Le norme sismiche utilizzano in genere valutazioni probabilistiche di pericolosità sismica per descrivere le azioni sismiche rispetto alle quali le costruzioni devono essere progettate. Una valutazione probabilistica considera tutti i possibili terremoti che possono avvenire in una data regione, la loro frequenza di occorrenza e i livelli di scuotimento che possono produrre a un dato sito. Una valutazione probabilistica viene spesso eseguita per calcolare il picco di accelerazione a un dato periodo di ritorno ed è utilizzata per ancorare a questo valore lo spettro delle norme. Il problema con l'approccio descritto più sopra è che lo spettro che ne deriva non è a pericolosità uniforme in quanto la forma dello spettro di risposta delle norme viene fissato indipendentemente dal periodo di ritorno o dalla posizione del sito; in realtà lo spettro a probabilità uniforme cambia forma in relazione a questi due parametri in quanto è influenzato dalla magnitudo del terremoto che contribuisce maggiormente alla pericolosità sismica. Per contro la forma spettrale delle NTC08 si basa direttamente sui risultati della valutazione probabilistica effettuata ad hoc (Gruppo di Lavoro MPS04, 2004; Meletti, 2007); pertanto varia a seconda del periodo di ritorno e posizione del sito e utilizza, in aggiunta al picco di accelerazione, due parametri che variano in modo da permettere alla forma spettrale di approssimare meglio lo spettro a pericolosità uniforme. Questi due parametri sono il periodo angolare (T_c) e il fattore di amplificazione spettrale (F_0), come mostrato in figura 2. Ai progettisti le NTC08 consentono anche di usare direttamente gli spettri a pericolosità uniforme calcolati per supportare le NTC08 stesse (Meletti, 2007), che sono disponibili all'indirizzo: <http://esse1.mi.ingv.it>. Il vantaggio dell'approccio delle NTC08 è che le costruzioni vengono progettate per un livello di rischio simile, indipendentemente dalla loro posizione e dalla frequenza propria; lo svantag-

gio è che l'approccio sito-dipendente delle NTC08 non include più quell'elemento conservativo contenuto nelle norme precedente che avevano un approccio zona-dipendente. La valutazione recente di pericolosità sismica su cui si basano gli spettri delle NTC08 ha seguito un approccio aggiornato che tiene conto esplicitamente delle incertezze epistemiche (derivanti dalla scarsità di conoscenza) e del parere degli esperti. È stato utilizzato un albero logico con l'obiettivo di modellare l'incertezza epistémica e di esplorare la variabilità di: a) valutazioni di completezza del catalogo dei terremoti; b) tassi di sismicità e determinazione di M_{max} ; c) equazioni predittive del moto del suolo. L'albero logico non ha esplorato incertezze relative a catalogo dei terremoti e zonazione sismogenetica. Per ciascun ramo dell'albero logico sono stati scelti un ristretto numero di rami cui sono stati assegnati pesi sulla base del parere degli esperti. Il risultato ottenuto è costituito da un insieme di curve di pericolosità, ciascuna con un peso diverso; ordinando queste curve per magnitudo e sommando i relativi pesi si ottiene una distribuzione cumulativa dalla quale si possono stimare i valori del 16mo percentile, 50mo percentile (valore mediano) e 84mo percentile. Le NTC08 utilizzano solo lo spettro mediano della valutazione descritta. Il periodo di ritorno che deve essere adottato per il progetto dipende dalla "vita" delle costruzioni (assunto di solito uguale a 50 anni per costruzioni standard) e dalla probabilità di eccedenza degli stati limite da considerarsi nella progettazione. La maggior parte delle costruzioni ordinarie sono progettate per due stati limite, ovvero livelli di "efficienza sismica": stato limite di danno e stato limite di collasso, dove il primo deve essere rispettato in occasione di azioni sismiche con il 63% di probabilità di superamento in 50 anni (ossia un periodo di ritorno di 50 anni) e il secondo in occasione di azioni sismiche con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni (ossia un periodo di ritorno di 475 anni).

Una volta scelto il periodo di ritorno si determinano i parametri per costruire lo spettro nel sito di

interesse, e si applicano coefficienti che tengono conto di amplificazioni di sito e effetti topografici.

1.7.3 Il modello di pericolosità sismica nella regione de L'Aquila

Un'analisi dettagliata della pericolosità sismica nella regione dell'Abruzzo è riportata nell'articolo di Stucchi et al. (questo volume). Il terremoto si è verificato nella zona 923 dell'attuale zonazione sismogenetica (Meletti et al., 2008) che comprende le sorgenti dei terremoti localizzate a sud della sorgente di Colfiorito che ha generato l'evento del 1997 e si estende fino alle aree di Sulmona e Isernia; questa ZS è caratterizzata da alta sismicità e al suo interno hanno avuto luogo eventi molto forti, quale il terremoto di Avezzano del 1915 ($M = 7$). Le principali caratteristiche dell'evento aquilano ricadono nella media dei valori attesi per l'area: profondità ipocentrale pari a 9.5 km (valori attesi tra 8 e 12 km); meccanismo focale normale (come atteso) e magnitudo M_w 6.3 (magnitudo massima prevista $M_{w,max} = 7.0$, stimata da dati geologici).

La valutazione probabilistica della pericolosità sismica i cui risultati sono confluiti nell'ambito delle Norme Tecniche NTC08 (Gruppo di Lavoro MPS04, 2004), fornisce un valore del picco di accelerazione, con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni, pari a circa 0.25g per l'area de L'Aquila (Stucchi et al., questo volume, Fig. 2); questo valore è di soli 0.03g inferiore al valore massimo previsto per il territorio Italiano. La curva di pericolosità sismica per la località de L'Aquila è mostrata nella figura 14 dell'articolo

citato. Un test effettuato includendo nei dati originali il terremoto de L'Aquila, ha mostrato che i risultati non cambiano in modo significativo. La principale conclusione del lavoro di Stucchi et al. (questo volume) è quindi che il modello di sismicità, in termini di catalogo, completezza e tassi di sismicità, utilizzato per la valutazione della pericolosità sismica nella regione de L'Aquila non dovrebbe subire cambiamenti sulla base di nuove informazioni disponibili a seguito del terremoto del 2009.

Un argomento che non è stato affrontato nell'articolo citato è l'affidabilità delle equazioni predittive del moto del suolo utilizzate nell'analisi di pericolosità (Gruppo di Lavoro MPS04, 2004). Questa analisi si basa sull'utilizzo - come rami dell'albero logico - di tre equazioni empiriche predittive del moto del suolo: Sabetta e Pugliese (1996), basata su dati strong-motion italiani; Ambraseys et al. (1996), basata su dati europei; un set di relazioni regionali basati sugli studi di Malagnini et al. (2000 e 2002) e Morasca et al. (2002), basati su dati weak-motion (questi modelli non vengono considerati nei confronti che seguono). L'applicazione di queste relazioni di attenuazione per la stima della pericolosità sismica in Italia è descritta nel dettaglio in Montaldo et al. (2005).

Le registrazioni accelerometriche dell'evento principale della sequenza aquilana provengono da 55 stazioni digitali delle rete accelerometrica nazionale (RAN) del Dipartimento della Prote-

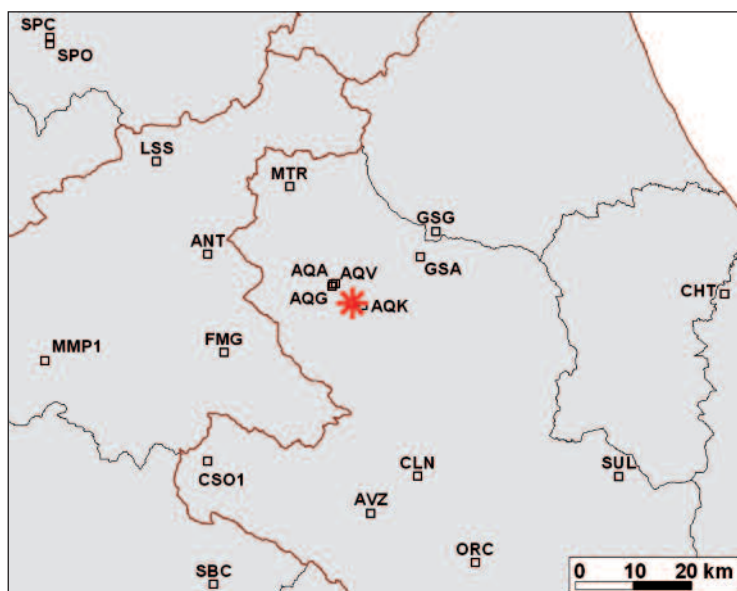


Fig. 3. Mappa dell'area epicentrale del terremoto del 6 Aprile 2009. L'asterisco rappresenta l'epicentro, i quadrati le stazioni accelerometriche più prossime che hanno registrato la scossa principale.

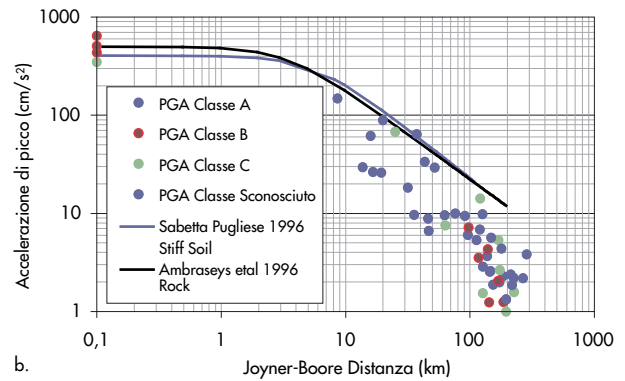
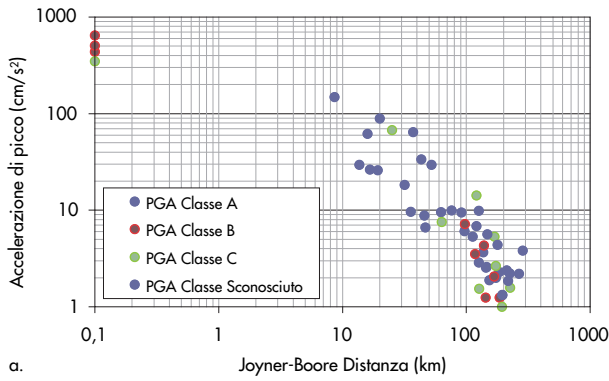
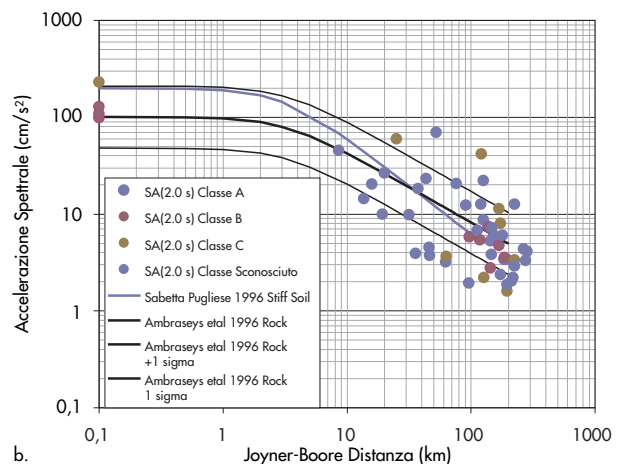
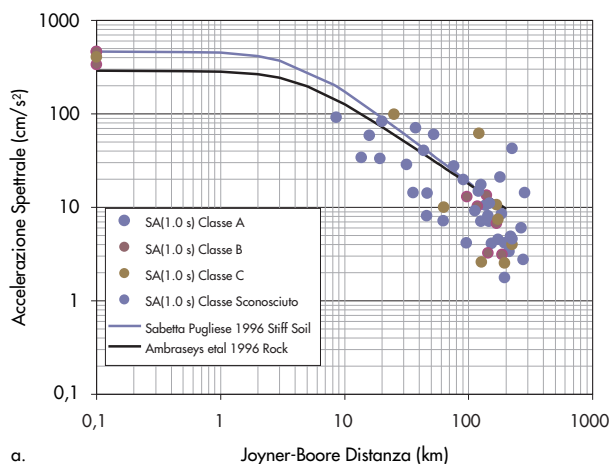


Fig. 4
 (a) Valori osservati dei picchi di accelerazione alle 55 stazioni accelerometriche in funzione della distanza Joyner-Boore.
 (b) Valori mediani del picco di accelerazione in funzione della distanza Joyner-Boore, predetti dalle due GMPEs (Ambraseys et al., 1996 e Sabetta e Pugliese 1996) utilizzate dallo studio di pericolosità sismica (Gruppo di Lavoro MPS, 2004) adottato dalle Norme Tecniche NTC08.

zione Civile e possono essere scaricate dalla banca dati accelerometrica ITACA: <http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet>. La figura 3 illustra la posizione delle stazioni accelerometriche in area epicentrale, mentre per una figura dettagliata dell'area si rimanda alla figura 1 in Pacor et al. (questo volume). La figura 4a mostra la distribuzione dei valori massimi di picco di accelerazione registrati, distinti per categorie di suolo secondo la classificazione EC8 (CEN, 2004) in funzione della distanza Joyner-Boore (definita come la distanza minima dalla proiezione in superficie del piano di faglia). L'andamento dei valori osservati non mostra una chiara dipendenza dalle condizioni sito, peraltro rappresentate da una semplice classificazione. In figura 4b sono riportati i valori mediani del picco di accelerazione predetti dalle due relazioni empiriche (nel seguito indicate come GMPE, *Ground Motion Prediction Equation*), per la classe di sito più rigida, in ragione della osservazione precedente della mancanza di correlazione tra il moto del suolo e categorie di suolo. Il confronto mostra che i valori di accelerazione registrati sono ben riprodotti a breve distanze (campo vicino) mentre si attenuano più velocemente rispetto alle predizioni. Analoghi grafici sono presentati in figura

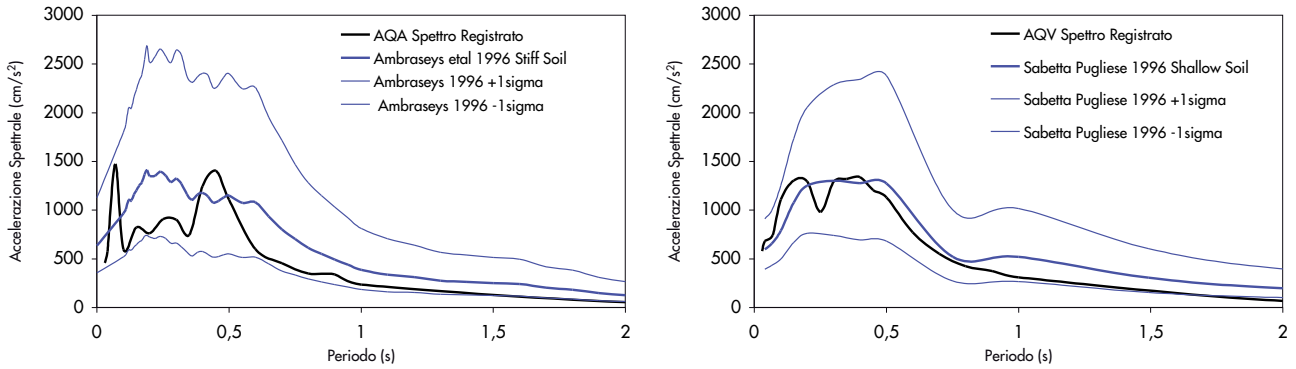
5, dove sono rappresentate le accelerazioni spettrali per i periodi di 1.0 s e 2.0 s. In questo caso i valori predetti riproducono meglio l'attenuazione dei dati osservati, quando si considerano gli alti periodi di vibrazione. La deviazione standard del logaritmo dei residui tra valori osservati e valori attesi secondo la relazione di Ambraseys et al. (1996) per le accelerazioni spettrali SA a 2 secondi è pari a 0.33, valore molto simile alla deviazione standard associata al logaritmo delle ordinate spettrali fornita dalla stessa relazione. L'andamento generalmente conservativo dei valori mediani attesi mostrati nelle precedenti figure e i valori simili tra la dispersione osservata nei dati e quella associata ai valori attesi indicano che le stime del moto del suolo utilizzate nello studio di pericolosità sismica non sono sottostimate. Questa ipotesi è ulteriormente rafforzata dal confronto (Fig. 6) fra gli spettri di risposta in accelerazione relativi a due registrazioni in campo vicino con quelli predetti dalle due equazioni empiriche descritte precedentemente (considerando un evento di magnitudo 6.3 a distanza Joyner-Boore di 0.1 km). Gli spettri osservati sono molto simili agli spettri mediani e sono comunque compresi tra i valori mediani, più o meno una deviazione standard.

Fig. 5
 Confronto in funzione della distanza Joyner-Boore fra le ordinate spettrali osservate alle 55 stazioni accelerometriche che hanno registrato il terremoto de L'Aquila e valori mediani, predetti dalle due GMPEs (Ambraseys et al., 1996 e Sabetta e Pugliese 1996) utilizzate nello studio di pericolosità sismica adottato dalle Norme Tecniche NTC08. (a) accelerazioni spettrali a 1.0 s e (b) accelerazioni spettrali a 2.0 s.



a.

b.



1.7.4 Confronto tra gli spettri di progetto delle NTC08 e gli spettri registrati durante il terremoto de L'Aquila

Nel paragrafo precedente è stato mostrato come i valori di picco delle accelerazioni registrate in occasione di questo terremoto abbiano una buona corrispondenza con quelli previsti dalle relazioni di attenuazione adottate nello studio di pericolosità sismica su cui si basano le NTC08. La domanda sorta dopo questo terremoto è se queste registrazioni possono darci una indicazione sulla attendibilità degli spettri di risposta previsti dalle norme stesse.

La figura 7 mostra il confronto tra gli spettri a pericolosità uniforme su roccia per differenti probabilità di eccedenza in 50 anni (cioè a differenti periodi di ritorno) secondo le valutazioni di pericolosità sismica su cui si basano le NTC08 e lo spettro registrato in occasione del terremoto

del 6 aprile 2009 in una stazione posta in vicinanza dell'epicentro. Lo spettro registrato è quello della stazione AQA della Rete Accelerometrica Nazionale (caratterizzata da suolo di classe B e distanza di Joyner-Boore di 0.1 km); lo spettro a pericolosità uniforme è quello determinato da INGV per il sito di coordinate 42.376°N e 13.400°E per suolo roccioso ed è stato ricavato dal sito <http://esse1.mi.ingv.it>.

È evidente dal confronto di figura 7 che le ordinate spettrali dello spettro registrato non seguono la forma spettrale a pericolosità uniforme. Un motivo è da ricercarsi nel fatto che le condizioni di sito non sono considerate negli spettri calcolati da INGV; tuttavia non ci si dovrebbe aspettare che le due forme spettrali coincidano, vista la natura profondamente diversa dei due spettri (si veda Fig. 1).

Inoltre, la variabilità aleatoria degli scuotimenti

Fig. 6 Confronto fra spettri di accelerazione osservati e predetti. (a) spettro di risposta in accelerazione alla stazione AQA e spettri ottenuti da Ambraseys et al. (1996); (b) spettro di risposta in accelerazione alla stazione AQV e spettri ottenuti da Sabetta e Pugliese (1996).

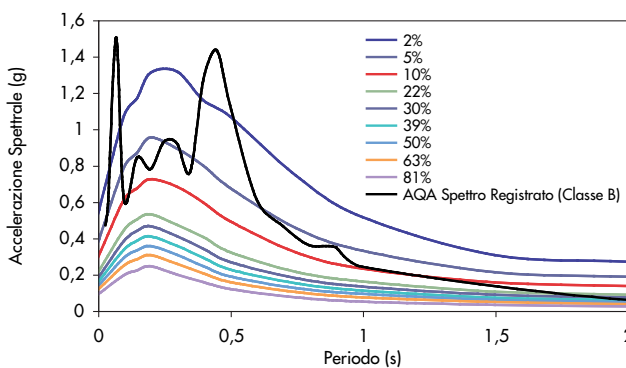


Fig. 7. Confronto tra il valore medio degli spettri a pericolosità uniforme per diversi periodi di ritorno lo spettro registrato dalla stazione AQA.

(come evidenziato da ampi picchi e avvallamenti nello spettro registrato) è considerata nel periodo di ritorno dello spettro a pericolosità uniforme e non nella forma (basata sulla forma liscia che deriva dalle relazioni predittive dello scuotimento, per le quali si assume che tutte le ordinate spettrali siano pienamente correlate). Di conseguenza, lo spettro a pericolosità uniforme non cerca di descrivere la variabilità spaziale dello scuotimento, e neppure la variabilità tra ordinate

spettrali. Guardando le registrazioni dei 4 siti (AQA, AQQ, AQK, AQV) posti ad una distanza Joyner-Boore di 0.1 km, tre dei quali posti a poche centinaia di metri l'uno dall'altro (si veda Fig. 3), la grande variabilità delle accelerazioni è evidente (Fig. 8). Pertanto il tentativo di confrontare lo spettro a pericolosità uniforme con una qualsiasi di queste registrazioni è destinato a non avere successo, come osservato anche da Ameri et al. (2009) e da Paolucci (2009). Ha

Fig. 8
Spettri di risposta delle 4 stazioni AQA, AQQ, AQK e AQV per entrambe le componenti orizzontali.

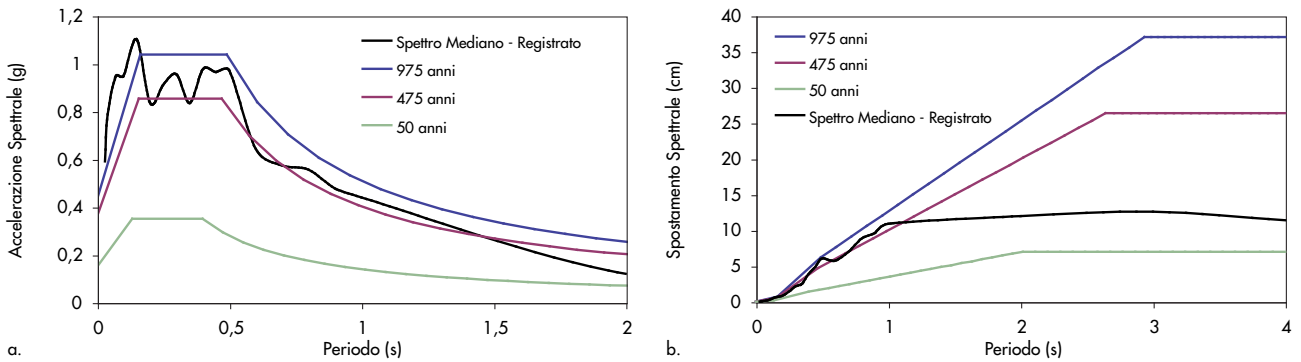
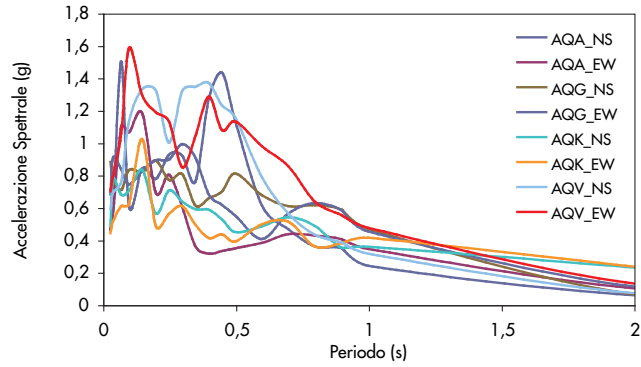


Fig. 9
Confronto tra gli spettri proposti da NTC08 per tre diversi periodi di ritorno e la mediana delle ordinate spettrali delle 4 registrazioni in prossimità dell'epicentro: (a) spettro in accelerazione; (b) spettro in spostamento.

invece più significativo realizzare il confronto dello spettro a pericolosità uniforme con la mediana degli spettri registrati, considerando la massima ordinata spettrale tra le due direzioni ortogonali di ogni stazione di registrazione (poiché questo è il parametro proposto delle relazioni di attenuazione usate nello studio di pericolosità su cui si basano le NTC08); questo confronto è proposto in figura 9 in termini sia di spettro di accelerazione che di spostamento.

Gli spettri di progetto mostrati sono quelli che si ottengono dai dati NTC08 per un sito di coordinate 42.38°N e 13.40°E, applicando il coefficiente correttivo per un suolo di tipo B e il coefficiente 1.2 che consideri un effetto topografico. Il confronto di figura 9a mostra che la mediana delle ordinate spettrali registrate in termini di accelerazione superano i valori previsti dagli spettri di progetto per i brevi periodi (fino a 0.2 secondi), ma sono inferiori a quelli con periodi di ritorno di 975 anni per tutti gli altri periodi di vibrazione; sono molto simili allo spettro con periodo di ritorno di 475 anni per i periodi di vibrazione da 0.55s in su. Per quanto riguarda gli spettri di risposta in termini di spostamento, la mediana degli spettri registrati è molto simile allo spettro di progetto con periodo di ritorno di 475 anni, ma è molto più basso per periodi propri superiori ad 1 secondo e pertanto lo spettro di progetto sembra essere eccessivamente conservativo. Va comunque notato che le registra-

zioni utilizzate sono rappresentative di un solo valore di magnitudo, mentre lo spettro di progetto rappresenta l'involuppo degli spettri di risposta di tutti i possibili terremoti di varia magnitudo che possono interessare il sito dato (fig. 1); come detto in precedenza, in questa zona sismogenetica sono attesi eventi con magnitudo fino a 7.

Le alte accelerazioni spettrali registrate ai brevi periodi non sono significative dal punto di vista ingegneristico, se si considera che la maggior parte delle strutture hanno periodi di vibrazione maggiori di 0.3 secondi. Va anche notato che gli spettri di progetto nella figura 9a si basano sulla mediana degli spettri a pericolosità uniforme determinati nello studio di pericolosità sismica di riferimento; tuttavia bisogna ricordare che a tali spettri è associata un'incertezza epistemica. Per l'area de L'Aquila gli spettri corrispondenti all'84mo percentile sono superiori di circa il 10-15% rispetto allo spettro mediano. Se nel grafico di figura 9a si aggiunge lo spettro di progetto incrementato del 13% (Fig. 10), la maggior parte dello spettro mediano delle registrazioni ricade al di sotto dello spettro periodo di ritorno di 475 anni, che è il periodo di ritorno utilizzato per la progettazione della maggior parte delle strutture ordinarie.

Infine si riporta un'ultima considerazione sugli spettri di risposta in spostamento, in quanto negli ultimi anni questo tema viene trattato in modo

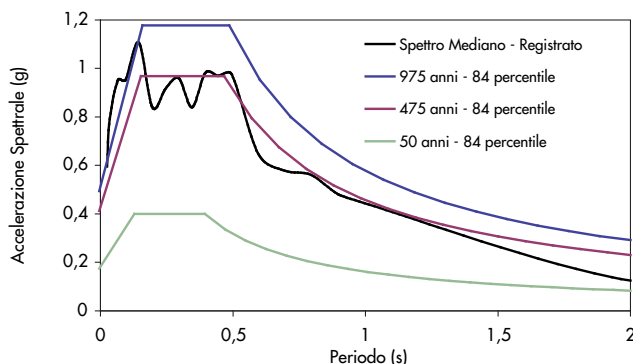
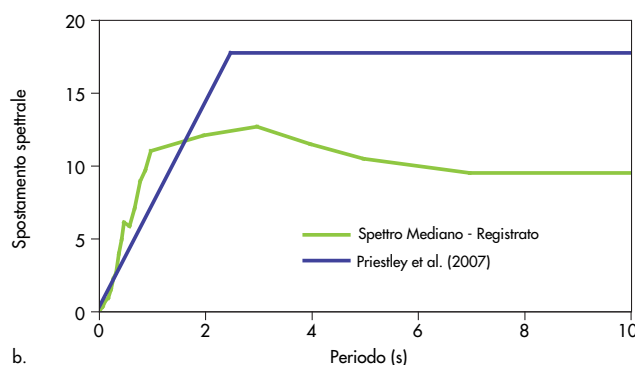
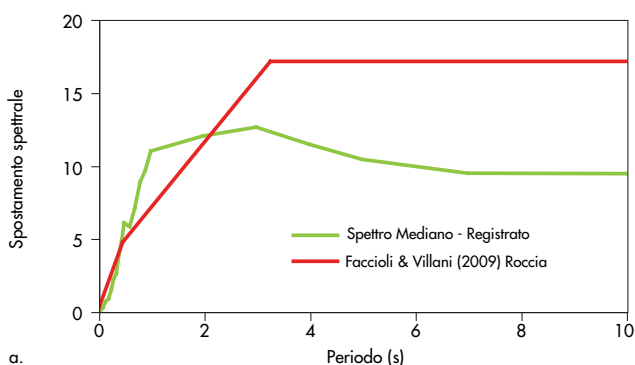


Fig. 10
Confronto tra gli spettri delle NTC08 corrispondenti all'84mo percentile per tre diversi periodi di ritorno e la mediana delle ordinate spettrali delle 4 registrazioni in prossimità dell'epicentro.

approfondito nello studio della progettazione in termini di spostamenti. Uno studio nazionale (INGV-DPC S5, 2007; Faccioli e Villani, 2009) ha proposto una nuova forma per lo spettro di risposta in spostamento basato su stime di pericolosità sismica probabilistiche. Queste stime vengono sviluppate utilizzando relazioni di attenuazione derivate in termini di ordinata spettrale in spostamento fino ad un periodo di vibrazione di 10 secondi. Utilizzando questo nuovo approccio diventa possibile stimare direttamente le ordinate spettrali in termini di spostamento per lunghi periodi di vibrazione; questo non era possibile nel passaggio da ordinate spettrali in termini di accelerazione a ordinate spettrali in termini di spostamento, in quanto le NTC08 sono basate su leggi di attenuazione che forniscono le ordinate spettrali fino ad un periodo di 2 secondi. La figura 11a confronta lo spettro di risposta in spostamento proposto da Faccioli e Villani (2009) per un periodo di ritorno di 475 anni per il comune de L'Aquila con la mediana degli spettri registrati. Per la stima dello spettro, il valore massimo dello spostamento viene ricavato dalle ordinate spettrali per il periodo di 10 secondi e viene poi utilizzato per il calcolo del periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante, T_D . La forma dello spettro può essere schematizzata in tre segmenti diversi. Il primo si ricava a partire dallo spettro in accelerazione; il

valore di spostamento che caratterizza la fine del primo ramo è quello corrispondente al valore di accelerazione caratteristico del plateau nello spettro in accelerazione, mentre il valore del periodo è quello del periodo che delimita la zona ad accelerazione costante da quella a velocità costante. Il secondo segmento conduce al punto di massimo spostamento e periodo T_D , mentre il terzo segmento è rappresentato da una retta orizzontale a spostamento costante. Un altro approccio per il calcolo dello spettro di risposta in spostamento per una data magnitudo è quello proposto da Priestley et al. (2007). In questo caso, sia il periodo T_D che lo spostamento massimo dello spettro sono funzione della magnitudo momento. In figura 11b viene riportato lo spettro in spostamento considerando il valore di M_w stimato per il terremoto del 6 aprile ($M_w=6.3$) e condizioni intermedie come condizioni di suolo. Si nota come i due spettri riportati in figura 11a e 11b sono molto simili tra loro sebbene uno sia basato su una stima probabilistica con periodo di ritorno di 475 anni e l'altro sia basato su un evento sismico. Entrambi danno ordinate spettrali maggiori rispetto allo spettro registrato dopo 1,5-2 secondi (periodi minori, in genere, non vengono considerati nella progettazione agli spostamenti, vedi Priestley et al., 2007), ma minori rispetto ai valori che si ottengono dagli spettri di spostamento ottenibili dalle NTC08 (Fig. 9), che

Fig 11
(a) Spettro di risposta in spostamento per il comune de L'Aquila proposto da Faccioli e Villani (2009) e (b) spettro di risposta in spostamento per il terremoto del 6 aprile 2009 basato sulle equazioni di Priestley et al. (2007), confrontati con lo spettro mediano delle registrazioni ottenute in siti posti in prossimità de L'Aquila.



a.

b.

sembrerebbero essere più conservativi. Ulteriori ricerche in questo campo sembrano necessarie

per migliorare la stima della risposta sismica in spostamento delle strutture.

1.7.5 Conclusioni

Il terremoto de L'Aquila del 6 aprile 2009 è da considerarsi come il primo, importante test delle NTC08 recentemente adottate e dei parametri di pericolosità sismica su cui queste si basano. È da osservare innanzitutto che l'effetto principale del terremoto è stato quello di determinare l'entrata in vigore definitiva delle NTC08 dal 1° luglio 2009, dopo un lungo periodo di stand-by. Come qui discusso, il tentativo di validare gli spettri di progetto delle norme tecniche attraverso confronti puntuali con gli scuotimenti osservati (in termini di spettri di risposta) non sembra un esercizio significativo a causa delle differenze concettuali tra spettri a pericolosità uniforme e spettri di scenario. Ciononostante sono stati presentati alcuni dei confronti che è possibile realizzare tra scuotimenti registrati e stime di pericolosità sismica alla base delle recenti NTC08; questi hanno mostrato che le assunzioni e le scelte dei modelli fatte nello studio di pericolosità sismica sono in linea con le osservazioni. Tali confronti hanno fornito utili spunti su molti aspetti della stima della pericolosità sismica di riferimento in Italia e della filosofia delle recenti Norme Tecniche per le Costruzioni. Sul primo aspetto, le stime di pericolosità sismica, realizzate nel periodo 2004-2007, si basano sul set di dati disponibili nel 2004 e pertanto alcuni elementi sono stati aggiornati nel frattempo. Le stime dei tassi di sismicità non sembrano instabili (si veda Stucchi et al., in questo volume); scelte diverse nella definizione della zonazione sismogenetica avrebbero potuto portare alla determinazione di livelli diversi di pericolosità sismica. Per fare un esempio, la suddi-

visione della zona sorgente 923 del modello adottato in due parti (Norcia-L'Aquila e area di Sulmona-Isernia) ovvero l'adozione di un approccio di tipo "smoothed seismicity" avrebbero portato a stime di pericolosità più elevate per l'area de L'Aquila, avvicinandosi maggiormente ai valori registrati. D'altro canto, queste opzioni diverse avrebbero portato a diminuire la pericolosità sismica a Sulmona, dove viceversa le caratteristiche tettoniche indicano un potenziale sismogenetico simile a quello de L'Aquila.

Il terremoto de L'Aquila ha fornito nuovi dati per lo scuotimento in campo vicino, per il quale ben pochi erano disponibili prima; peraltro le relazioni di attenuazione hanno già visto grandi progressi rispetto al 2004.

In conclusione è importante ricordare che l'incertezza epistemica era stata valutata nello studio di pericolosità sismica di riferimento (2004-2007); la sua notevole influenza è stata dimostrata più sopra qualora venga presa in considerazione. Alla luce di ciò, si può concludere che non si ravvedono gli estremi per raccomandare cambi significativi nella normativa. Tuttavia potrebbe essere considerata la possibilità di includere l'incertezza epistemica nelle norme, per esempio attraverso l'esplicitazione di questa incertezza in modo tale che il progettista possa decidere quale percentile usare per il proprio progetto (Abrahamson and Bommer, 2005). Infine, resta la necessità di approfondire la spiegazione delle differenze tra gli spettri in spostamento delle NTC08 e quelli proposti da studi recenti, precedenti il terremoto de L'Aquila.

Bibliografia

- Abrahamson N., Bommer J.J. (2005) - Probability and Uncertainty in Seismic Hazard Analysis, *Earthquake Spectra*, Vol 21, Issue 2, 603-607.
- Ambraseys N.N., Simpson K.A., Bommer J.J. (1996) - Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 25, 371-400.
- Ameri G., Massa M., Bindi D., D'Alema E., Gorini A., Luzi L., Marzorati S., Pacor F., Paolucci R., Puglia R., Smerzini C. (2009) - The 6 April 2009, Mw 6.3, L'Aquila (Central Italy) earthquake: strong-motion observations, *Seismological Research Letters*, in press.
- CEN (2004) - European Committee for Standardisation.

tion. Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, European Standard EN 1998-1: 2004 (stage 51), Brussels, 229 pp.

Faccioli E., Villani M. (2009) - Seismic hazard mapping for Italy in terms of broadband displacement response spectra. *Earthquake Spectra*, Vol 25, No. 3, 515-539.

Gruppo di Lavoro MPS (2004) - Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM del 20 marzo 2003 n.3274 All. 1. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 allegati, <http://zonesismiche.mi.ingv.it>.

- INGV-DPC S5 (2007) - Definizione dell'input sismico sulla base degli spostamenti attesi. URL: <http://www.progettos5.stru.polimi.it>.
- Malagnini L., Akinci A., Herrmann R.B., Pino N.A., Scognamiglio L. (2002) - Characteristics of the Ground Motion in Northeastern Italy. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 92, 6, 2186-2204.
- Malagnini L., Herrmann R.B., Di Bona M. (2000) - Ground motion scaling in the Apennines (Italy). *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, 4, 1062-1081.
- Meletti C. (2007) - Progetto S1: proseguimento della assistenza al DPC per il completamento e la gestione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274/2003 e progettazione di ulteriori sviluppi. Progetto DPC-INGV S1, Rapporto finale, http://esse1.mi.ingv.it/data/S1_Rendicontazione_Scientifica_finale_S1.pdf, 70 pp.
- Meletti C., Galadini F., Valensise G., Stucchi M., Basili R., Barba S., Vannucci G., Boschi E. (2008) - A seismic source model for the seismic hazard assessment of the Italian territory. *Technophysics*, 450(1), 85-108.
- Montaldo V., Faccioli E., Zonno G., Akinci A., Malagnini L. (2005) - Treatment of groundmotion predictive relationships for the reference seismic hazard map of Italy. *J. Seismol.*, 9(3), 295-316.
- Morasca P., Malagnini L., Akinci A., Spallarossa D., (2002) - Ground-motion scaling in the Western Alps, *Seism. Res. Lett.* 73, 251.
- NTC08. Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. 14 Gennaio 2008.
- Pacor F., Paolucci R., Iervolino I., Nicoletti M., Ameri G., Bindi D., Cauzzi C., Chioccarelli E., D'Alema E., Luzi L., Marzorati S., Massa M., Puglia R., (2009) - Caratteristiche dei dati accelerometrici registrati durante la sequenza sismica aquilana. *Progettazione Sismica*, This issue.
- Paolucci R. (2009) - Long-period earthquake ground motion: recent advances and observations from the April 6 2009, Mw 6.3 L'Aquila earthquake, Italy, *Proceedings of the ACES Workshop Performance-Based Earthquake Engineering*, Corfù, Greece, 5-6 July 2009
- Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J. (2007) - Displacement-based seismic design of structures. IUSS Press, Pavia, Italy.
- Reiter L. (1990) - Earthquake Hazard Analysis, Columbia University Press, New York.
- Sabetta F., Pugliese A. (1996) - Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motions, *Bulletin of the Seismological Society America*, Vol. 86, No. 2, 337-352.
- Stucchi M., Meletti C., Rovida A., D'Amico V., Gomez Capera A.A. (2009). Terremoti storici e pericolosità dell'area aquilana. *Progettazione Sismica*, Questo volume.