

Definizione di accelerogrammi reali spettro-compatibili per l'intero territorio nazionale

Selection of natural spectrum-compatible accelerograms for the entire Italian territory

Lorenzo Taverna¹, Elisa Zuccolo², Mirko Corigliano³, Maria Rota⁴, Carlo G. Lai⁵, Andrea Penna⁶ ■

Sommario

L'analisi dinamica non lineare, ovvero il metodo di simulazione più accurato per valutare la risposta sismica di strutture e sistemi geotecnici, richiede la definizione dell'input sismico in termini di serie temporali (normalmente accelerogrammi, talvolta tracce di velocità o spostamento). Nonostante la sempre maggiore disponibilità di banche dati accelerometriche in rete, da cui è possibile scaricare registrazioni di eventi sismici reali, nella pratica ingegneristica l'individuazione di un gruppo di accelerogrammi che siano compatibili con la pericolosità sismica del sito non è semplice e richiede competenze specialistiche. D'altra parte, la scelta dell'input è uno degli aspetti che influenzano maggiormente i risultati delle analisi. Questo articolo illustra una metodologia recentemente sviluppata per la definizione automatica dell'input sismico in termini di gruppi di accelerogrammi registrati su roccia e compatibili, in media, agli spettri di normativa definiti dalle norme tecniche italiane (NTC2008). L'approccio si basa sulla suddivisione del territorio italiano in zone omogenee caratterizzate da forme spettrali simili (mesozonazione). Per ogni zona, è stato definito uno spettro di riferimento rispetto al quale selezionare gli accelerogrammi con il programma ASCONA (Corigliano et al, 2012). Tali accelerogrammi, opportunamente scalati, risultano spettro-compatibili a tutti gli spettri della zona omogenea selezionata. I risultati ottenuti, per il periodo di ritorno di 475 anni, sono resi disponibili sul sito www.eucentre.it/seismhome.html, dal quale è possibile scaricare 7 accelerogrammi spettro-compatibili, in media, allo spettro delle norme tecniche italiane, per qualsiasi sito del territorio italiano. L'input sismico può essere scaricato direttamente dall'applicazione SEISM-HOME (SElection of Input Strong-Motion for HOmogeneous MEsozones) e può essere utilizzato direttamente, senza quindi apportare alcun tipo di correzione, per analisi ingegneristiche di strutture ubicate su siti rigidi o come segnale d'ingresso per analisi di risposta sismica locale nel caso di opere localizzate in siti non rocciosi.

Parole chiave: Accelerogrammi naturali, spettro-compatibilità, analisi dinamica al passo.

Abstract

Non-linear time-history analysis is the most accurate method to analyze the seismic response of structures and geotechnical systems. It requires the definition of seismic input by means of properly selected time-series (usually accelerograms, sometimes velocity or displacement time-histories). A number of accelerometric databases available online allow for downloading real earthquake records, but still the identification of suites of accelerograms compatible with the seismic hazard at the site of interest is not an easy task and requires specific skills. Moreover, the selection of seismic input is one of the aspects mostly influencing the analysis results. This paper presents a recently developed methodology for the automatic definition of seismic input by means of suites of accelerograms recorded on rock and compatible, on average, with the response spectra provided in the Italian building code (NTC2008). This approach is based on the subdivision of the Italian territory into homogeneous zones, characterised by similar spectral shapes (mesozonation). The selection of groups of real accelerograms has been carried out by the ASCONA program (Corigliano et al., 2012) for identified reference response spectra, each representative of a homogeneous zone. Subsequently, such groups of accelerograms have been properly scaled in order to be spectrum-compatible with any response spectrum over the Italian territory. The results achieved for the 475 years return period are available at the web site www.eucentre.it/seismhome.html through the

1 Ingegnere Civile, Trevi Spa

2 Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Pavia, Italia - ✉ elisa.zuccolo@unipv.it

3 Ingegnere Civile, Pavia

4 Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica - Eucentre, Pavia, Italia - ✉ maria.rota@eucentre.it

5 Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Pavia, Italia - ✉ carlo.lai@unipv.it

Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica - Eucentre, Pavia, Italia - ✉ carlo.lai@eucentre.it

6 Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università degli Studi di Pavia, Italia - ✉ andrea.penna@unipv.it

Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica - Eucentre, Pavia, Italia - ✉ andrea.penna@eucentre.it

SEISM-HOME (SElection of Input Strong-Motion for HOmogeneous MEsozones) application, which allows to download suites of 7 accelerograms spectrum-compatible, on average, with the Italian code spectrum for any site of the Italian territory. The downloaded seismic input can be directly used, without any need for corrections, for the analysis of engineering structures located on rock or as input signals for site response analyses in case of non rocky sites.

Keywords: Natural accelerograms, spectrum-compatibility, time-history analysis.

1. Introduzione

Il metodo di simulazione numerica più accurato per la valutazione della risposta sismica di strutture e sistemi geotecnici consiste nell'esecuzione di analisi dinamiche non lineari, che richiedono la definizione dell'input sismico in termini di serie temporali. Altri casi in cui l'utilizzo di accelerogrammi opportunamente identificati è necessario includono per esempio analisi di risposta sismica locale o valutazione di spostamenti permanenti di un pendio o di un'opera di sostegno con il metodo di Newmark (1965).

Se da un lato, per riprodurre opportunamente il comportamento ciclico degli elementi strutturali è necessaria una corretta modellazione, dall'altro lato è indispensabile una accurata caratterizzazione dell'input sismico atteso per il sito in esame e la conseguente selezione di segnali compatibili con la pericolosità sismica del sito. Tale aspetto è normalmente associato alla cosiddetta "spettro-compatibilità", ovvero al fatto che la differenza tra lo spettro medio derivante dagli accelerogrammi selezionati e lo spettro di riferimento non ecceda una prefissata tolleranza in uno specificato intervallo di periodi. Le serie temporali selezionate dovrebbero anche soddisfare il requisito della "sismo-compatibilità" e cioè dovrebbero essere coerenti con il contesto sismo-tettonico e sismo-genetico regionale. Tuttavia, in alcuni casi, questa condizione senz'altro desiderabile si scontra con la carenza di dati per specifici contesti regionali, in particolare nel caso di siti rocciosi, in campo vicino e per terremoti forti ed è quindi necessario accettare alcuni compromessi.

Le Norme Tecniche per le costruzioni (NTC08, 2008), consentono di adottare accelerogrammi appartenenti ad una delle seguenti categorie:

- *accelerogrammi naturali*, ovvero registrazioni accelerometriche relative ad eventi sismici realmente avvenuti, reperibili in banche dati "strong motion" accreditate, nazionali ed internazionali;
- *accelerogrammi artificiali*, ottenuti mediante tecniche di sintesi di tipo stocastico, eventualmente vincolati ad essere compatibili con uno spettro di risposta obiettivo (ad es. di normativa, oppure ottenuto da apposite analisi probabilistiche oppure deterministiche di pericolosità sismica);

- *accelerogrammi sintetici*, ottenuti mediante una simulazione numerica del terremoto, basata su un modello cinematico di sorgente sismica estesa e su un modello elastodinamico di propagazione delle onde fino al sito di interesse.

Le NTC08 riportano, inoltre, caratteristiche e limitazioni (anche in termini di applicabilità) di ognuna delle precedenti categorie di accelerogrammi. Si può comunque affermare come, in generale, l'utilizzo di segnali naturali sia preferibile. Le NTC08 recitano che *l'uso di accelerogrammi artificiali non è ammesso nelle analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici.*

Gli accelerogrammi naturali sono ovviamente realistici in termini di contenuto in frequenza, durata, numero di cicli, correlazione tra le componenti orizzontali e verticali e contenuto energetico in relazione ai parametri sismogenetici. Secondo le NTC08, l'utilizzo di accelerogrammi reali è ammesso a condizione che la loro scelta sia rappresentativa della sismicità del sito e *sia adeguatamente giustificata in base alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente (..) e alla massima accelerazione orizzontale attesa al sito.* La Circolare esplicativa delle NTC08 (Circ. NTC08, 2009) precisa che è possibile fare riferimento, anche per i segnali naturali, alle condizioni di compatibilità spettrale media definite per i segnali artificiali, ovvero verificare che l'ordinata spettrale media non presenti uno scarto in difetto superiore al 10%, rispetto alla corrispondente componente dello spettro elastico, in un prefissato intervallo di periodi strutturali. Tale intervallo è definito come il maggiore tra gli intervalli $0.15 \text{ s} \div 2.0 \text{ s}$ e $0.15 \text{ s} \div 2 T$, con T il periodo fondamentale di vibrazione della struttura in campo elastico, per le verifiche agli stati limite ultimi, e $0.15 \text{ s} \div 1.5 T$, per le verifiche agli stati limite di esercizio. Sempre nella Circolare esplicativa delle NTC08 viene inoltre precisato che se gli accelerogrammi devono essere scalati linearmente in ampiezza allo scopo di soddisfare il requisito della spettro-compatibilità, il fattore di scala deve essere limitato nel caso di segnali provenienti da eventi di piccola magnitudo.

Le NTC08 definiscono l'azione sismica in termini di spettri di risposta elastici in accelerazione, utilizzando i risultati dell'analisi probabilistica di pericolosità sismica ottenuti dall'Istituto

Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) per un reticolo di 16921 nodi sul territorio italiano (<http://esse1.mi.ingv.it/>).

L'elevata variabilità degli spettri delle NTC08 rende molto onerosa la selezione di accelerogrammi naturali spettro-compatibili e il ricorso ad analisi dinamiche non lineari di strutture e sistemi geotecnici nella pratica ingegneristica è spesso inibito anche dalle difficoltà associate alla definizione dell'input sismico. Questo articolo si propone di fornire un contributo alla soluzione di questo problema attraverso una procedura recentemente sviluppata ad Eucentre che consente di definire in modo automatico ed immediato sull'intero territorio nazionale accelerogrammi reali spettro-compatibili e coerenti alle prescrizioni delle NTC08. La messa a punto della procedura ha richiesto l'implementazione dei seguenti passi:

1. mesozonazione del territorio italiano al fine di suddividere i nodi del reticolo su cui è definita l'azione sismica, in gruppi omogenei caratterizzati da forme spettrali simili. Questa operazione ha richiesto la definizione quantitativa del concetto di *similarità* di forme spettrali.
2. per ogni gruppo omogeneo, identificazione dello spettro di risposta in accelerazione di riferimento, opportunamente scelto tra gli spettri di normativa appartenenti al medesimo gruppo;
3. selezione di accelerogrammi reali registrati su roccia affiorante e spettro-compatibili con lo spettro di riferimento, utilizzando il codice di calcolo ASCONA secondo la procedura descritta in Corigliano et al (2012). La scelta di utilizzare accelerogrammi registrati su roccia è motivata dalle considerevoli incertezze che caratterizzano la selezione di accelerogrammi registrati su terreni non rocciosi, in particolare quando si richiede che tali accelerogrammi siano spettro-compatibili con uno spettro di normativa per terreni non rocciosi. Inoltre gli accelerogrammi registrati su roccia costituiscono l'input sismico per le analisi di risposta sismica locale che sono funzionali alla definizione dell'azione sismica di progetto in siti di costruzione non rocciosi.
4. scalatura lineare degli accelerogrammi selezionati al fine di soddisfare, in media, il requisito della spettro-compatibilità con ciascuno degli altri spettri di risposta appartenenti al medesimo gruppo omogeneo.

Gruppi costituiti da 7 accelerogrammi reali spettro-compatibili per il periodo di ritorno di 475 anni e per sito roccioso sono scaricabili dal sito www.eucentre.it/seismhome.html attraverso l'applicazione SEISM-HOME (SElection of Input

Strong-Motion for HOmogeneous MEsozones) per qualsiasi punto del territorio nazionale, semplicemente specificandone le coordinate geografiche. Il programma è di immediata fruizione e non richiede alcun tipo di selezione, né la conoscenza delle caratteristiche sismogenetiche e di pericolosità del sito in esame. Inoltre, i segnali scaricati sono già stati corretti anche dal punto di vista dei fattori di scala, che sono mantenuti vicini all'unità.

Ad oggi, la selezione di un insieme di accelerogrammi spettro-compatibile può essere effettuata ricorrendo ad uno dei tanti applicativi disponibili, quali ad esempio ASCONA (Corigliano et al., 2012), REXEL (Iervolino et al., 2009, 2010) e REXELite (Iervolino et al., 2011b), che tuttavia sono rivolti ad utenti più esperti.

2. Mesozonazione del territorio italiano

I dati di partenza di questo studio sono i risultati dell'analisi probabilistica di pericolosità sismica ottenuti dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) per l'intero territorio nazionale e resi pubblici a partire dal 2004 (<http://esse1.mi.ingv.it/>). Essi comprendono per ogni nodo di un reticolo di riferimento costituito da 16921 nodi situati ad una distanza relativa inferiore a 10 km, mappe di pericolosità sismica espresse da 11 valori delle accelerazioni spettrali su sito rigido, per 9 periodi di ritorno (da 30 a 2475 anni) e per 3 livelli di affidabilità.

Le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC08, 2008) hanno recepito i risultati dello studio di pericolosità dell'INGV, definendo, per i nodi del reticolo di riferimento, uno spettro di risposta elastico in accelerazione caratterizzato da 4 rami, secondo un modello adottato per esempio anche nell'Eurocodice 8 (EN 1998-1, 2005), ciascuno definito da un'espressione analitica che, in assenza di effetti di sito, dipende da tre parametri: l'accelerazione orizzontale di picco del terreno (a_g), il valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale (F_0) e il periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale (T_c^*).

Per ciascuno dei nodi del reticolo di riferimento e per ciascuna delle 9 probabilità di eccedenza in 50 anni (corrispondenti ai 9 periodi di ritorno sopra definiti), le NTC08 riportano i valori dei tre parametri a_g , F_0 e T_c^* , ricavati con riferimento al 50esimo percentile ed attribuendo ad a_g il valore predetto dallo studio INGV e ad F_0 e T_c^* i valori ottenuti minimizzando lo scarto tra le forme spettrali previste dalle NTC08 e i corrispondenti spettri isoprobabili calcolati da INGV (per ciascun sito e ciascun periodo di ritorno).

Un esempio di confronto tra spettro isoprobabile e forma spettrale definita dalle NTC08 è mostrato in Figura 1.

In questo studio sono stati utilizzati gli spettri di risposta elastici prescritti dalle NTC08 per il periodo di ritorno di 475 anni per sito rigido (categoria di suolo A) con superficie topografica orizzontale. Da questi spettri, riferiti ai nodi del reticolo dell'Allegato B delle NTC08, sono stati eliminati quelli corrispondenti a punti situati in mare e fuori dai confini nazionali, ottenendo un numero complessivo di 8948 spettri. Per quanto la selezione di accelerogrammi per siti in mare possa potenzialmente essere utile per l'analisi di strutture off-shore, spesso tali strutture hanno periodo proprio di vibrazione maggiore di 1 s che ricadrebbero facilmente al di fuori dell'intervallo di periodi per cui è garantita la spettro-compatibilità e, inoltre, ricadono tra le opere speciali che richiedono studi ad hoc (anche per quanto riguarda la pericolosità sismica, poiché necessitano della definizione dell'azione sismica per periodi di ritorno maggiori).

Dalla rappresentazione grafica di tali spettri

(Figura 2a) emerge una variabilità elevata dei valori delle accelerazioni spettrali, mentre la Figura 2b, che riporta gli stessi spettri normalizzati al valore di a_g , mostra la notevole diversità delle forme spettrali che, pur essendo sempre definite dalle stesse espressioni analitiche dei 4 rami degli spettri, hanno forma diversa in funzione dei valori assunti dai 3 parametri, che sono funzione della pericolosità sismica al sito di interesse. Da qui l'esigenza di individuare un numero minimo di forme spettrali che siano rappresentative della totalità degli spettri. Si vogliono cioè identificare gruppi omogenei di spettri di risposta di forma e caratteristiche simili e definire, per ciascun gruppo, uno spettro di riferimento da utilizzare per la definizione dell'input sismico rappresentato da accelerogrammi reali spettro-compatibili.

2.1 Identificazione delle mesozone

L'operazione di mesozonazione del territorio italiano ha richiesto la definizione di gruppi di spettri di risposta omogenei aventi forma, ampiezza e caratteristiche simili tra loro. L'iden-

Figura 1
Confronto tra lo spettro isoprobabile calcolato da INGV e lo spettro delle NTC08 su suolo rigido per un periodo di ritorno di 475 anni, per il sito di Pontremoli, MS (Lai et al., 2009).

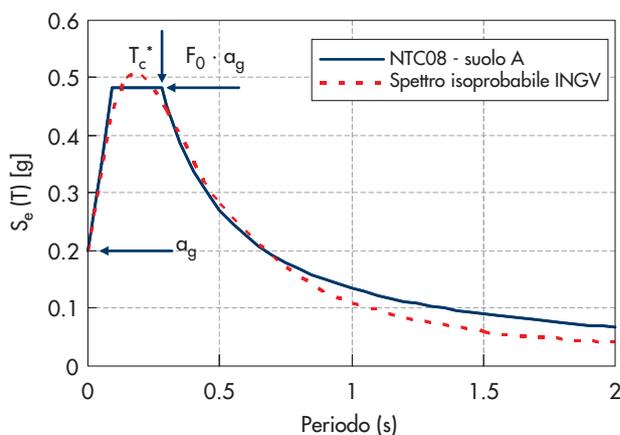
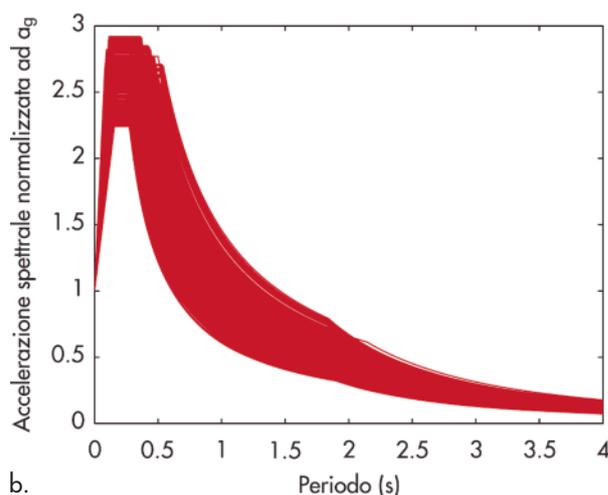
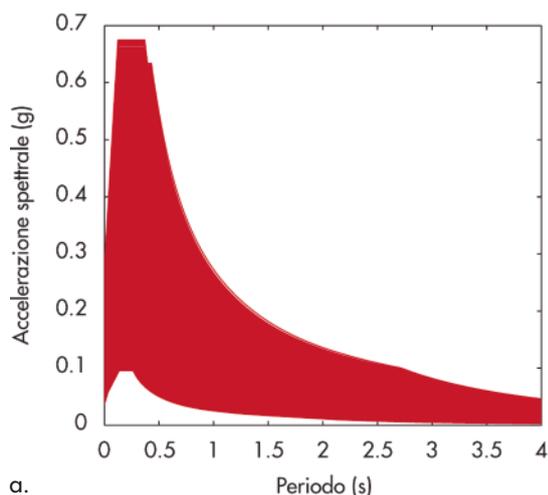


Figura 2
Rappresentazione degli 8948 spettri di risposta in accelerazione individuati sul territorio nazionale, riferiti al periodo di ritorno di 475 anni, per suolo di categoria A (a) e degli stessi spettri normalizzati al valore di a_g (b).



tificazione dei gruppi è avvenuta sulla base di tre parametri, ovvero la deviazione spettrale media δ (Iervolino et al, 2008) e i valori di T_c^* e F_0 definiti dalle NTC08. I valori soglia dei tre parametri derivano dall'esigenza di trovare un compromesso tra il numero di gruppi omogenei indipendenti (che deve essere limitato per ridurre il numero di selezioni richieste) e la necessità che lo spettro di riferimento sia rappresentativo degli altri spettri del gruppo (per far sì che gli accelerogrammi selezionati siano spettro-compatibili con tutti gli spettri del gruppo come verrà discusso in dettaglio nel seguito). Tali valori sono stati quindi determinati con una procedura iterativa, fino ad ottenere un numero di gruppi considerato accettabile. In particolare, la condizione imposta sul parametro T_c^* è finalizzata a controllare la forma degli spettri appartenenti ai singoli gruppi, mentre quella su F_0 serve a limitare i fattori di scala che dovranno essere applicati agli accelerogrammi come verrà discusso successivamente. L'algoritmo si articola quindi nella implementazione dei seguenti passi:

1. identificazione dello spettro (S_{max}) caratterizzato dalla massima ordinata spettrale (determinata dal prodotto $a_g \times F_0$ maggiore);
2. per ciascuno spettro S_k , calcolo della sua deviazione spettrale media δ rispetto a S_{max} mediante:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{S_k(T_i) - S_{max}(T_i)}{S_{max}(T_i)} \right)^2} \quad (1)$$

dove N rappresenta il numero di periodi T_i (equi-spaziati) che sono stati assunti per discretizzare lo spettro. Il valore di δ è calcolato nell'intervallo di periodi rilevanti ai fini della spettro-compatibilità, ovvero tra 0.15s e 2s. Un esempio del calcolo della deviazione spettrale media δ è riportato in Figura 3.

3. individuazione degli spettri caratterizzati da $\delta < 0.2$;
4. identificazione del valore di T_c^* associato allo spettro S_{max} , ovvero $T_{c,max}^*$;
5. individuazione degli spettri caratterizzati da valori di T_c^* , $T_{c,k}^*$ tali che (Figura 4):

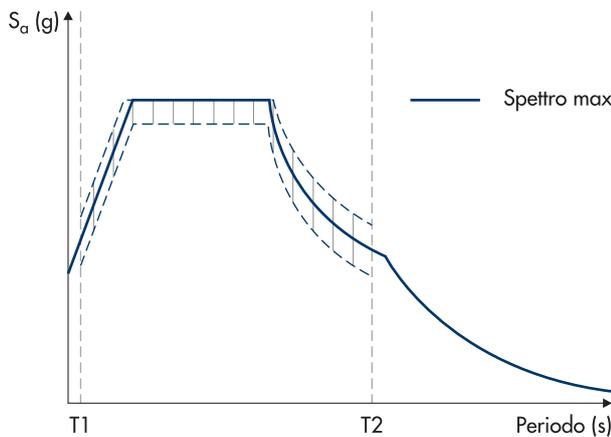


Figura 3
Rappresentazione grafica del controllo effettuato sulla deviazione spettrale media, δ , utilizzando come spettro di riferimento quello massimo, nell'intervallo di periodi $T_1 \div T_2$.

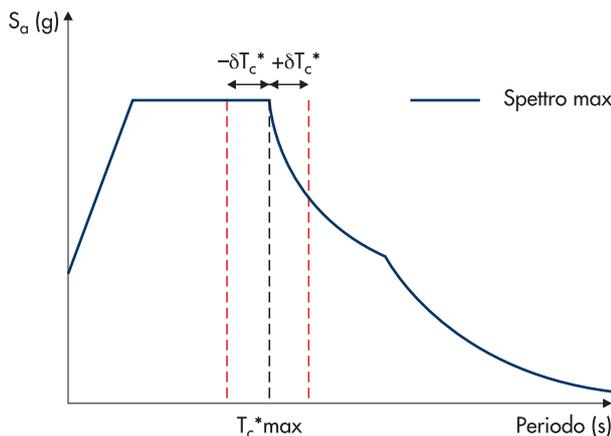


Figura 4
Raffigurazione grafica del controllo sulla forma spettrale effettuato dal parametro T_c^* . Lo spettro massimo è assunto come spettro di riferimento (colore blu). In figura è indicata la fascia dei valori di T_c^* che appartengono all'intervallo considerato (colore rosso). Nel caso in esame $dT_c^* = 0.05$.

Figura 5
Rappresentazione grafica del controllo sulla forma spettrale effettuato dal parametro F_0 , ottenuto limitando i valori nel tratto dello spettro ad accelerazione costante.

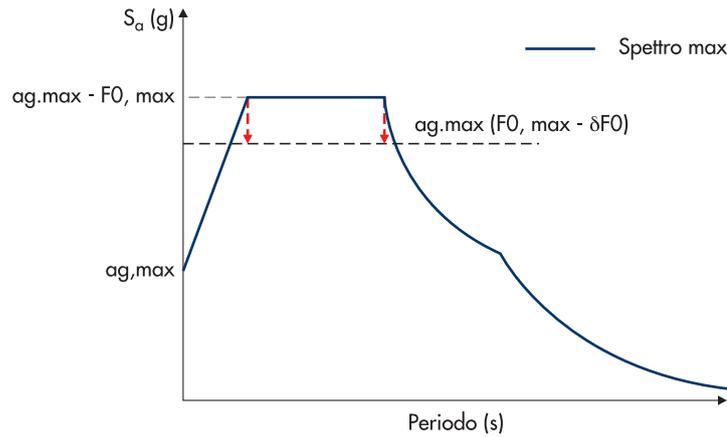
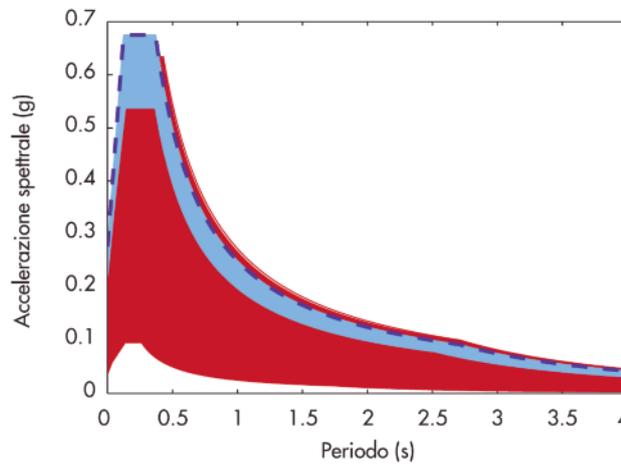


Figura 6
Rappresentazione grafica della definizione del gruppo 1: si notino lo spettro massimo (in blu), gli spettri appartenenti al gruppo 1 (in azzurro) e i rimanenti spettri del gruppo (in rosso).



$$|T_{c,max}^* - T_{c,k}^*| \leq 0.05 \quad (2)$$

6. identificazione dei valori di F_0 e a_g associati allo spettro S_{max} , ovvero $F_{0,max}$ e $a_{g,max}$, rispettivamente;
7. individuazione degli spettri caratterizzati da valori di F_0 e a_g ($F_{0,k}$ e $a_{g,k}$) tali che (Figura 5):

$$(a_{g,k} \cdot F_{0,k}) > a_{g,max} \cdot (F_{0,max} - 0.5) \quad (3)$$

8. definizione di un primo gruppo di spettri di risposta composto dallo spettro massimo e dagli spettri che soddisfano contemporaneamente le condizioni descritte ai punti 3, 5 e 7 (Figura 6).

Una volta definito il primo gruppo, caratterizzato da n spettri, il secondo gruppo è stato determinato applicando la procedura sopra descritta a tutti gli spettri non inclusi nel primo

gruppo (8948- n), e così via fino ad esaurimento di tutti gli spettri di risposta.

Attraverso questa procedura si sono individuati 40 gruppi a ciascuno dei quali è necessario associare una forma spettrale di riferimento. Il numero di spettri appartenenti a ciascun gruppo è mostrato in Tabella 1. Si nota come alcuni gruppi (ad es. i gruppi 13, 37 e 38) contengano un numero limitato di punti, corrispondenti a forme spettrali che, in base ai criteri di zonazione utilizzati in questo lavoro, richiedono la definizione di uno spettro di riferimento diverso da quello degli altri gruppi e, quindi, la selezione di accelerogrammi ad hoc.

La Figura 7 mostra la distribuzione geografica dei gruppi omogenei di spettri di risposta ciascuno identificato da un diverso colore. La sovrapposizione di questi risultati con la zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004) mette in evidenza una buona corrispondenza geografica tra le mappe.

Non sorprende quindi osservare (Figura 8) che la mappa di mesozonazione segue abbastanza bene la distribuzione spaziale dei valori della

Tabella 1 - Numero di nodi del reticolo di riferimento appartenenti a ciascun gruppo

Gruppo	n° punti	Gruppo	n° punti	Gruppo	n° punti
1	786	15	220	29	49
2	80	16	324	30	147
3	673	17	109	31	105
4	373	18	97	32	296
5	752	19	252	33	15
6	106	20	69	34	90
7	436	21	266	35	47
8	791	22	161	36	233
9	242	23	10	37	4
10	315	24	81	38	5
11	784	25	147	39	33
12	78	26	155	40	127
13	1	27	17		
14	206	28	266		

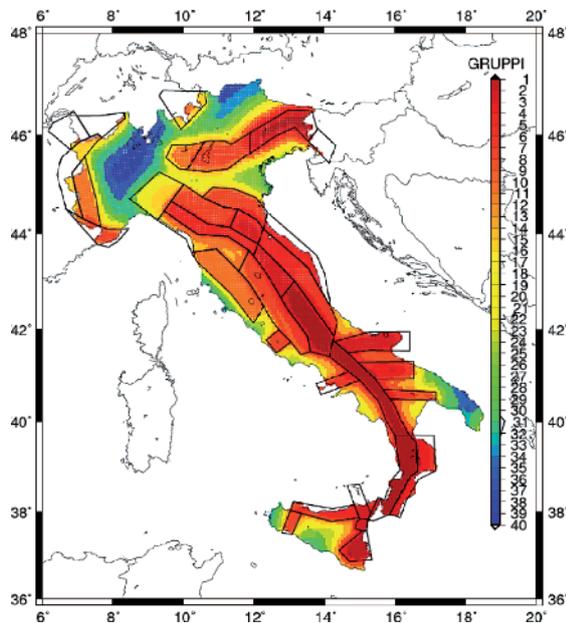


Figura 7
Mesozonazione del territorio italiano: distribuzione geografica dei gruppi omogenei di spettri di risposta definiti per il periodo di ritorno di 475 anni. La numerazione corrisponde all'ordine con cui i gruppi sono stati identificati, a partire da quello con le ordinate spettrali maggiori. La mesozonazione del territorio nazionale è sovrapposta alla zonazione sismogenetica ZS9 (Meletti e Valensise, 2004) utilizzata da INGV per la redazione della mappa di pericolosità sismica (<http://esse1.mi.ingv.it/>).

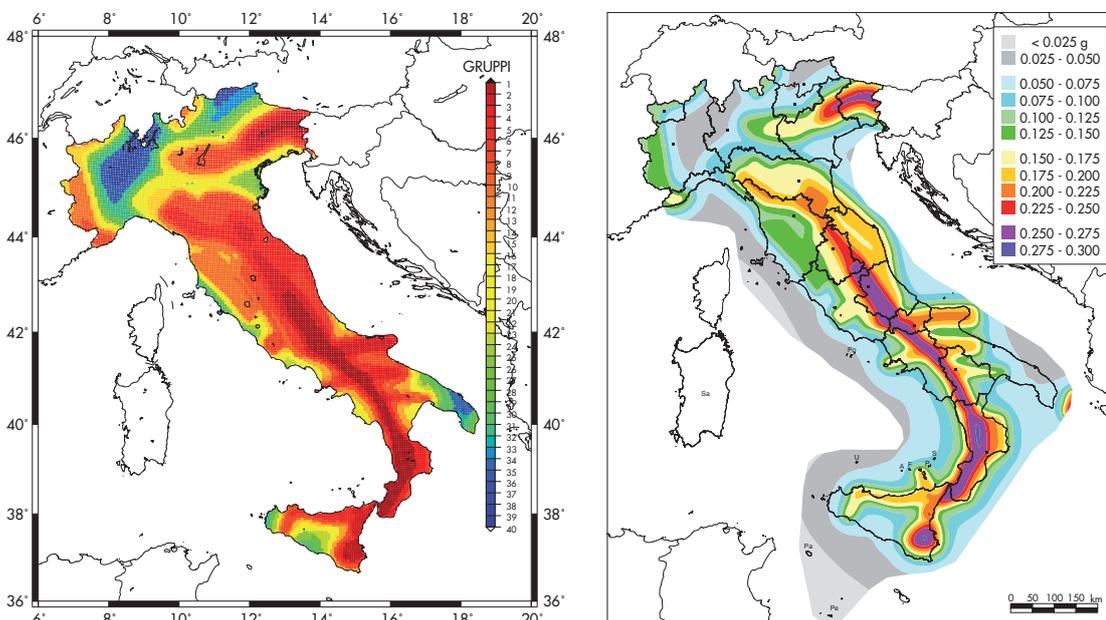


Figura 8
Confronto tra a) i risultati della mesozonazione del territorio italiano per il periodo di ritorno di 475 anni e b) la mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale per lo stesso periodo di ritorno espressa in termini di accelerazione massima del terreno (Gruppo di Lavoro MPS, 2004).

mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale riferita al periodo di ritorno di 475 anni espressa in termini di accelerazione orizzontale massima su suolo rigido e superficie topografica orizzontale (GdL MPS, 2004).

2.2 Definizione degli spettri di riferimento

Per ognuno dei 40 gruppi omogenei in cui sono stati suddivisi gli 8948 spettri di risposta è stato quindi individuato uno spettro di riferimento che è stato utilizzato in seguito per la selezione e scalatura lineare degli accelerogrammi naturali. Lo spettro di riferimento che deve rappresentare al meglio le caratteristiche e l'ampiezza delle forme spettrali presenti all'interno di ogni singolo gruppo omogeneo, è stato scelto tra quelli appartenenti al gruppo stesso. La scelta è stata effettuata sulla base dei seguenti passi:

1. calcolo dello spettro medio del gruppo, S_{med} :

$$S_{med}(T_i) = \frac{\sum_{k=1}^n S_k(T_i)}{n} \quad (4)$$

dove n rappresenta il numero di spettri del gruppo composto dagli spettri S_k ;

2. calcolo della deviazione spettrale media δ di ogni spettro del gruppo, S_k , rispetto a S_{med} :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{S_k(T_i) - S_{med}(T_i)}{S_{med}(T_i)} \right)^2} \quad (5)$$

3. lo spettro caratterizzato dal δ minore è scelto come spettro di riferimento del gruppo.

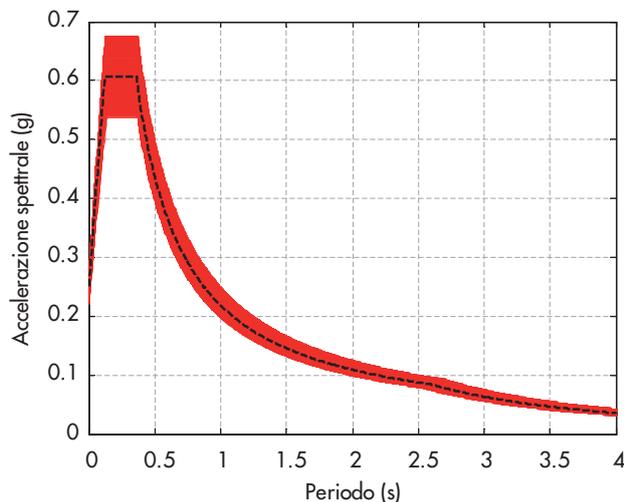
La Figura 9 riporta, a titolo di esempio, gli spettri appartenenti al gruppo 1, mettendo in evidenza lo spettro di riferimento definito con la procedura sopra descritta.

3. Selezione degli accelerogrammi naturali

La selezione degli accelerogrammi naturali è stata effettuata utilizzando il codice di calcolo ASCONA (Automated Selection of COmpatible Natural Accelerograms) descritto in dettaglio in Corigliano et al (2012). Il programma si avvale di una estesa banca dati accelerometrica composta da segnali naturali registrati su roccia affiorante provenienti da banche dati "strong-motion" accreditate tra cui la banca dati europea European Strong-motion Database (<http://www.isesd.hi.is/>), quella mondiale PEER-NGA database (<http://peer.berkeley.edu/nga/>), quella giapponese K-Net database (<http://www.k-net.bosai.go.jp/>) e quella italiana ITACA (<http://itaca.mi.ingv.it/ItacaNet/>). Il programma ASCONA è basato sulla determinazione del gruppo di accelerogrammi che meglio soddisfa i requisiti imposti dall'utente. L'algoritmo genera in modo sequenziale un numero elevato di combinazioni di accelerogrammi naturali che rispettano opportuni criteri di selezione, ne calcola lo spettro di risposta medio e lo confronta con lo spettro di riferimento (in accelerazione oppure in spostamento) calcolandone lo scarto medio, lo scarto negativo massimo, la deviazione spettrale media e la deviazione spettrale massima.

ASCONA richiede che siano stabiliti i criteri di selezione, ovvero il numero di accelerogrammi da includere nel gruppo (k), gli intervalli di variazione di magnitudo e distanza epicentrale, i valori massimo e minimo dei fattori di scala da applicare ai singoli accelerogrammi, lo spettro di riferimento per la verifica della spettro-compatibilità, l'ordinata spettrale rispetto a cui scalare gli accelerogrammi, l'intervallo di periodi rispetto a cui deve essere operato il controllo della spettro-compatibilità, il valore massimo

Figura 9
Identificazione dello spettro di riferimento (linea spessa tratteggiata) del gruppo 1.



dello scarto negativo tra lo spettro medio ottenuto dagli accelerogrammi selezionati e lo spettro di riferimento (affinché la verifica della spettro-compatibilità sia considerata soddisfatta), il valore massimo accettabile della deviazione δ tra ogni singolo segnale e lo spettro di riferimento. Il motivo principale per cui in ASCONA e, di conseguenza, in SEISM-HOME è utilizzata la distanza epicentrale è che metrica della distanza è riportata nella maggior parte delle banche dati accelerometriche da cui sono tratte le registrazioni (ad es. ITACA) ed è calcolabile molto semplicemente (note le coordinate della stazione e dell'epicentro).

ASCONA impone una serie di vincoli alla selezione delle registrazioni accelerometriche che consentono di evitare che nello stesso gruppo di accelerogrammi siano presenti due componenti della stessa registrazione e storie temporali registrate durante lo stesso terremoto, in modo da escludere registrazioni tra loro fortemente correlate. Si osserva come in realtà questo vincolo potrebbe essere rimosso e sostituito con una verifica a posteriori circa l'assenza di correlazione tra le registrazioni selezionate. Il programma consente inoltre di effettuare la selezione verificando la spettro-compatibilità sia con spettri di risposta in accelerazione che in spostamento. La Figura 10 illustra in modo schematico l'algoritmo implementato da ASCONA. La selezione degli accelerogrammi naturali è stata effettuata per ciascuno dei 40 spettri di riferimento dei 40 gruppi omogenei identificati per il periodo di ritorno 475 anni. L'intervallo per la verifica della spettro-compatibilità è stato assunto pari a $0.15\text{ s} \div 2\text{ s}$, mentre il numero di accelerogrammi da includere in un gruppo è

stato fissato pari a 7, in accordo alle NTC08. Per ciascuna selezione si sono impostati intervalli di valori di magnitudo e distanza epicentrale definiti a partire dai risultati della disaggregazione della pericolosità sismica al sito (Barani et al., 2009). In particolare, poiché tali risultati si riferiscono alla disaggregazione per l'accelerazione di picco orizzontale e poiché i risultati della disaggregazione variano a seconda del periodo strutturale considerato (ad es. Iervolino et al., 2011a), tali valori corrispondenti alla PGA sono stati utilizzati come limiti inferiori per la selezione (si rimanda in proposito all'approfondimento riportato in appendice). Si osserva come gli accelerogrammi selezionati siano utilizzabili per analisi di strutture e sistemi geotecnici il cui periodo fondamentale sia non superiore ad 1 s (conseguenza dell'intervallo di periodi specificato dalle norme per la spettro-compatibilità, ovvero 0.15-2 s). L'utilizzabilità di tali registrazioni per strutture con periodi maggiori deve essere verificata adeguatamente caso per caso (direttamente e/o facendo riferimento alle informazioni riportate nelle banche dati da cui sono stati tratti i segnali), anche al fine di accertarsi che non vi sia rumore nei segnali in corrispondenza dei periodi strutturali di interesse.

Gli accelerogrammi sono stati scalati linearmente imponendo che la loro accelerazione di picco in valore assoluto fosse pari al valore di a_g dello spettro di riferimento oppure imponendo che l'ordinata spettrale in corrispondenza di T_c^* fosse pari a quella dello spettro di riferimento. Il periodo spettrale a cui è stata effettuata la scalatura è stato scelto in modo indipendente per ciascun gruppo omogeneo in modo da ottenere

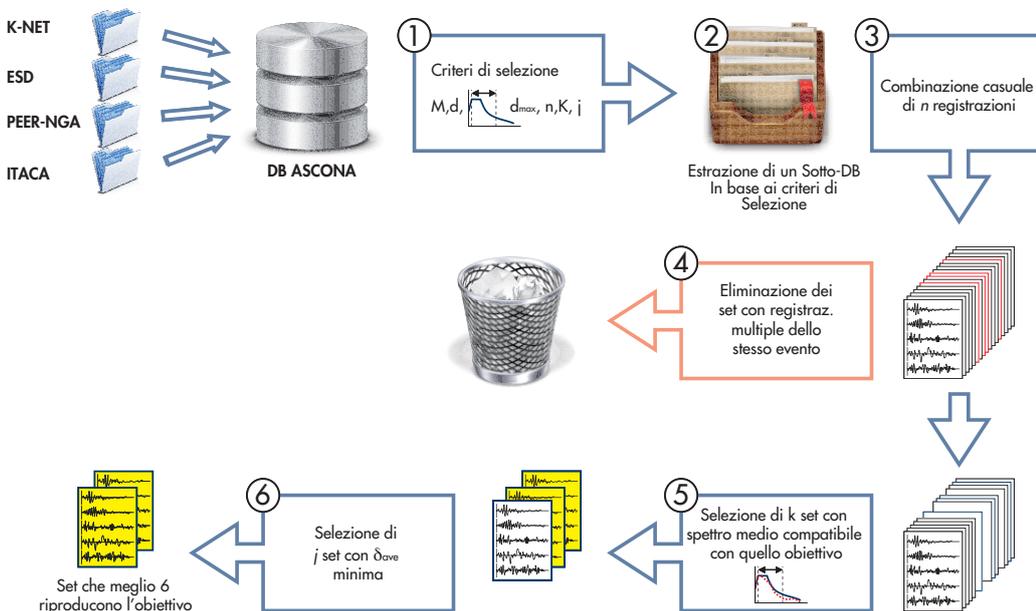


Figura 10 Diagramma di flusso dell'algoritmo implementato in ASCONA (Corigliano et al., 2012).

selezioni soddisfacenti dei segnali.

Un esempio dei risultati ottenuti per la selezione di accelerogrammi spettro-compatibili con lo spettro di riferimento del gruppo 11 è riportato nelle figure seguenti. In particolare, la Figura 11 mostra gli accelerogrammi selezionati (con scaturitura al valore di a_g), mentre la Figura 12 riporta gli spettri di risposta associati a ciascun accelerogramma e lo spettro di risposta medio. Si osserva come gli spettri degli accelerogrammi selezionati mostrino una certa variabilità rispetto allo spettro di riferimento. Qualora si

volesse limitare tale variabilità, sarebbe possibile aumentare in modo significativo i fattori di scala (come suggerito per esempio in Iervolino et al., 2009b), con la conseguenza di perdere la causalità tra l'evento sismico e il corrispondente segnale accelerometrico, rischiando quindi di ottenere accelerogrammi incoerenti per quanto riguarda il contenuto in frequenza e altre caratteristiche sismologiche. Infine la Figura 13 mostra il risultato della verifica della spettro-compatibilità, riportando sia un confronto tra lo spettro medio e lo spettro di riferimento (Figura

Figura 11
Gruppo di 7 accelerogrammi (componenti orizzontali) spettro compatibili, in media, con lo spettro di riferimento del gruppo 11. Per ciascuna registrazione sono riportati la magnitudo (M) dell'evento, la distanza epicentrale (d) alla quale è avvenuta la registrazione e il fattore di scala (SF).

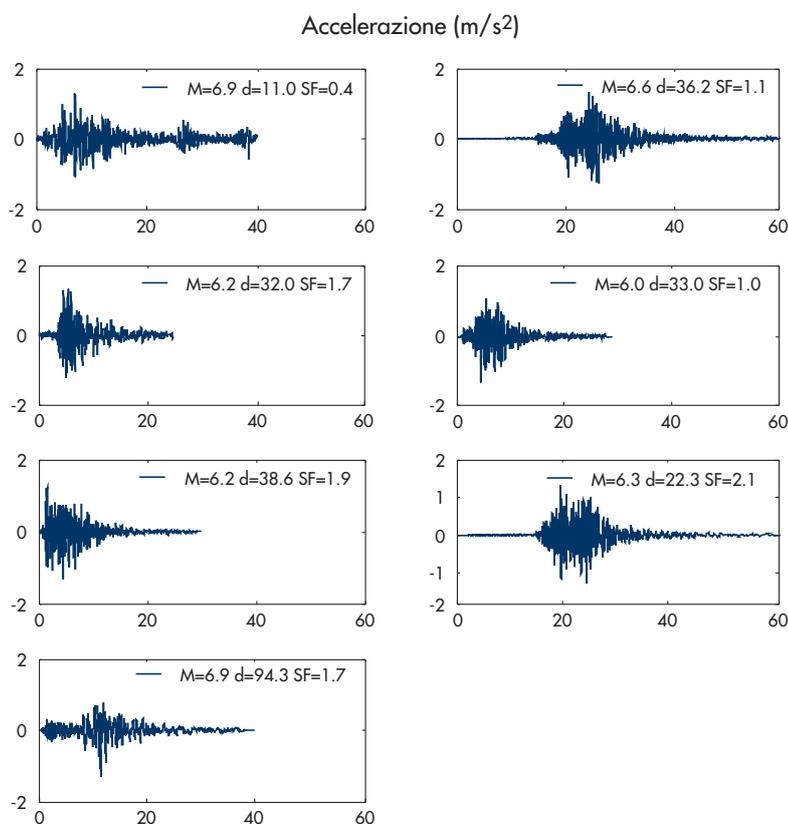
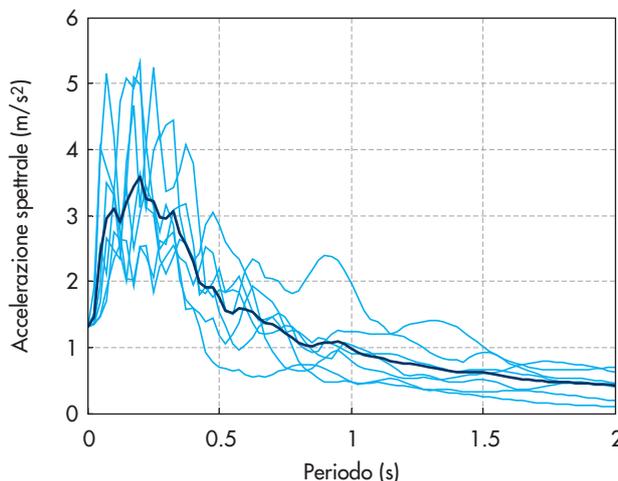


Figura 12
Spettri di risposta dei singoli accelerogrammi selezionati per lo spettro di riferimento del gruppo 11 (righe sottili blu) e spettro medio (riga spessa nera).



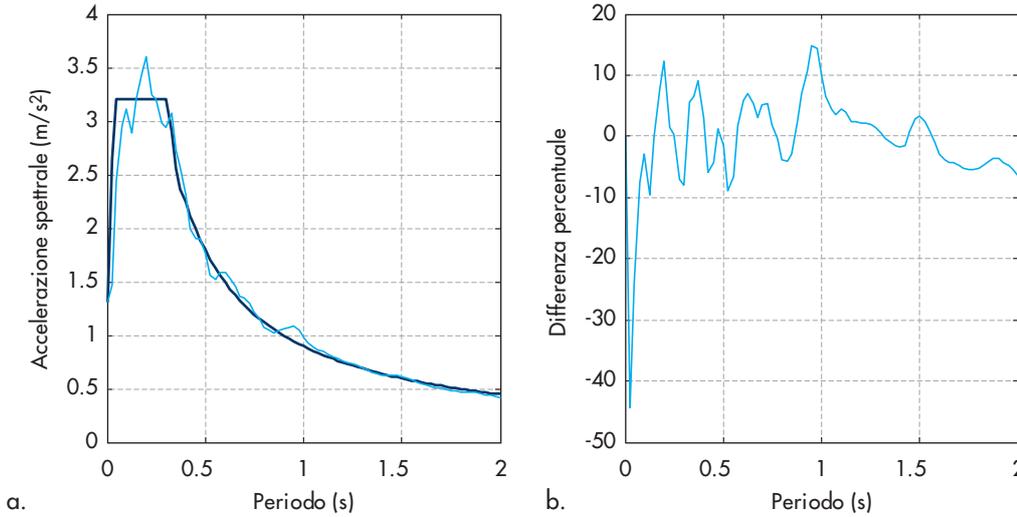


Figura 13
 a) Confronto tra lo spettro medio dei 7 accelerogrammi selezionati per lo spettro di riferimento del gruppo 11 (linea sottile blu) e lo spettro di riferimento (linea spessa nera).
 b) Valori della differenza percentuale tra i due spettri. Si osserva che la spettro-compatibilità è stata verificata nell'intervallo di periodi 0.15-2 s.

13a), sia l'andamento dei valori dello scarto tra i due spettri in funzione del periodo strutturale (Figura 13b). A tale selezione corrispondono un valore dello scarto percentuale medio (tra lo spettro medio del gruppo di 7 accelerogrammi e lo spettro di riferimento) pari a 4.43%, uno scarto negativo massimo di 9.53%, una deviazione spettrale media di 0.054 e una deviazione spettrale massima (riferita allo spettro di risposta del singolo accelerogramma rispetto allo spettro di riferimento) di 0.689.

La Tabella 4 riporta il numero di accelerogrammi selezionati da ognuna delle banche dati utilizzate per costruire la banca dati di ASCONA e il numero di eventi sismici distinti a cui tali registrazioni corrispondono. Si osserva come il processo di selezione abbia portato automaticamente a una preponderanza di eventi e registrazioni provenienti dalle banche dati italiana ed europea. Questo appare confermare come la somiglianza del contesto sismotettonico regionale si rifletta in una maggiore corrispondenza delle forme spettrali. L'elenco degli eventi sismici le cui registrazioni sono state utilizzate nelle selezioni è riportato in Tabella 3, dove sono indicate le date e le magnitudo di ognuno di essi.

La Tabella 4 sintetizza, per ciascun gruppo di

spettri, i valori (minimo, massimo e medio) dei fattori di scala utilizzati per la selezione rispetto allo spettro di riferimento, degli scarti percentuali (valore massimo dello scarto negativo e valore medio) e delle deviazioni spettrali (media e massima). La Figura 14 riporta invece l'istogramma di frequenza dei valori dei fattori di scala utilizzati per tutte le selezioni effettuate rispetto agli spettri di riferimento. Si osserva come i fattori di scala siano sufficientemente prossimi all'unità, con valori compresi tra 0.34 e 3.14 (con un fattore di scala medio pari a 1.19). Lo scarto percentuale negativo massimo varia tra 5.02 e 9.87 (ovviamente sempre inferiore al 10% per garantire la spettro-compatibilità secondo la normativa), mentre il valore medio di tale scarto varia tra 4.03 e 10.33. Quest'ultimo valore risulta in alcuni casi anche superiore al 10% perché le norme non pongono alcun limite allo scarto in eccesso rispetto allo spettro di riferimento. Si nota come, tuttavia, il valore medio dello scarto sia ragionevolmente contenuto. La deviazione spettrale media varia tra 0.054 e 0.132, valori confrontabili con quelli riportati in altri studi (ad es. Iervolino et al., 2010), mentre la deviazione spettrale massima risulta in ogni caso relativamente contenuta, variando tra 0.457 e 0.847.

Tabella 2 - Suddivisione degli accelerogrammi selezionati e dei corrispondenti eventi sismici sulla base della banca dati di provenienza

Banca dati	Accelerogrammi	Eventi sismici distinti
ITACA	15	6
ESD	18	12
K-NET	1	1
NGA	24	6
Totale	58	25

Tabella 3 - Eventi sismici le cui registrazioni sono state selezionate, in ordine cronologico e con l'indicazione delle corrispondenti date e magnitudo

Data	M _w	Evento sismico	Data	M _w	Evento sismico
09/02/71	6.61	San Fernando (California, U.S.A.)	04/01/94	5.17	Stretto di Gibilterra
16/09/77	5.1	Friuli	17/01/94	6.69	Northridge (California, U.S.A.)
15/04/78	6	Golfo di Patti	26/09/97	6	Umbria-Marche
16/09/78	6.87	Tabas (Iran)	03/10/97	5.3	replica di Umbria-Marche
15/04/79	6.68	Montenegro	06/10/97	5.4	replica di Umbria-Marche
24/05/79	6.2	replica di Montenegro	14/10/97	5.6	Umbria-Marche (terza scossa principale)
06/08/79	5.74	Coyote Lake (California, U.S.A.)	03/04/98	5.1	replica di Umbria-Marche
19/09/79	5.8	Val Nerina	17/08/99	7.4	Kocaeli (Turchia)
23/11/80	6.9	Irpinia	07/09/99	5.9	Atene (Grecia)
24/04/84	6.19	Morgan Hill (California, U.S.A.)	20/03/05	6.6	Kyushu (Giappone)
18/10/89	6.93	Loma Prieta (California, U.S.A.)	06/04/09	6.3	L'Aquila (scossa principale)
05/05/90	5.71	Potenza	09/04/09	5.4	replica di L'Aquila (Gran Sasso)
28/06/92	6.46	Big Bear (California, U.S.A.)			

Tabella 4 - Statistiche dei parametri relativi alla selezione e scalatura degli accelerogrammi per lo spettro di riferimento di ogni gruppo

Gruppo	Fattore di scala ASCONA			Scarto percentuale		Deviazione spettrale (δ)	
	min	max	medio	medio	negativo max	media	massima
1	0.42	2.74	1.52	9.47	9.75	0.11	0.717
2	0.38	3.14	1.59	4.04	7.62	0.054	0.847
3	0.42	2.02	1.21	9.92	8.84	0.132	0.761
4	0.61	2.65	1.6	5.89	9.75	0.07	0.669
5	0.39	2.71	1.37	7.8	8.35	0.111	0.734
6	0.34	2.92	1.48	9.34	8.91	0.119	0.637
7	0.49	2.41	1.37	5.15	8.84	0.065	0.695
8	0.37	2.69	1.64	6.17	5.8	0.086	0.583
9	0.75	2.76	1.95	6.59	6.27	0.092	0.614
10	0.63	2.15	1.57	6.49	9.52	0.078	0.506
11	0.4	2.14	1.43	4.43	9.53	0.054	0.689
12	0.48	2.29	1.41	4.86	9.85	0.057	0.719
13	0.43	2.41	1.56	8.12	9.62	0.103	0.54
14	0.6	2.23	1.58	6.39	8.4	0.088	0.583
15	0.52	2.25	1.39	6.3	8.19	0.077	0.558
16	0.69	1.76	1.15	9.03	9.45	0.123	0.689
17	0.37	1.78	1.1	4.85	9.85	0.057	0.719
18	0.61	2.44	1.73	6.64	9.25	0.084	0.522
19	0.42	1.65	0.94	5.16	8.27	0.071	0.539
20	0.51	2.25	1.38	9.67	9.05	0.119	0.465
21	0.6	1.61	0.97	10.33	9.46	0.122	0.576
22	0.69	1.64	1.2	6.86	7.9	0.088	0.516
23	0.58	1.98	1.31	5.37	5.02	0.076	0.543
24	0.92	1.94	1.42	6.04	8.32	0.081	0.522
25	0.73	1.76	1.1	8.03	8.92	0.094	0.483
26	0.57	1.49	1.07	5.92	8.46	0.077	0.567
27	0.6	1.35	1.03	5.4	9.85	0.066	0.524
28	0.66	1.27	0.81	8.23	8.37	0.104	0.471
29	0.77	1.35	1.04	5.21	5.61	0.077	0.545
30	0.5	1.7	0.93	5.61	9.85	0.075	0.515
31	0.68	1.42	0.94	4.03	8.46	0.062	0.582
32	0.41	1.06	0.74	5.3	9.48	0.066	0.562
33	0.45	1.25	0.85	6.57	5.58	0.089	0.553
34	0.46	1.32	0.82	8.11	9.57	0.102	0.643
35	0.4	0.98	0.75	6.38	8.85	0.075	0.457
36	0.46	0.87	0.66	7.89	9.06	0.102	0.649
37	0.69	1.18	0.87	5.85	9.87	0.072	0.531
38	0.54	0.93	0.71	4.86	7.06	0.061	0.56
39	0.37	1.26	0.79	6.22	9.18	0.076	0.537
40	0.42	1.19	0.62	7.8	7.92	0.093	0.473

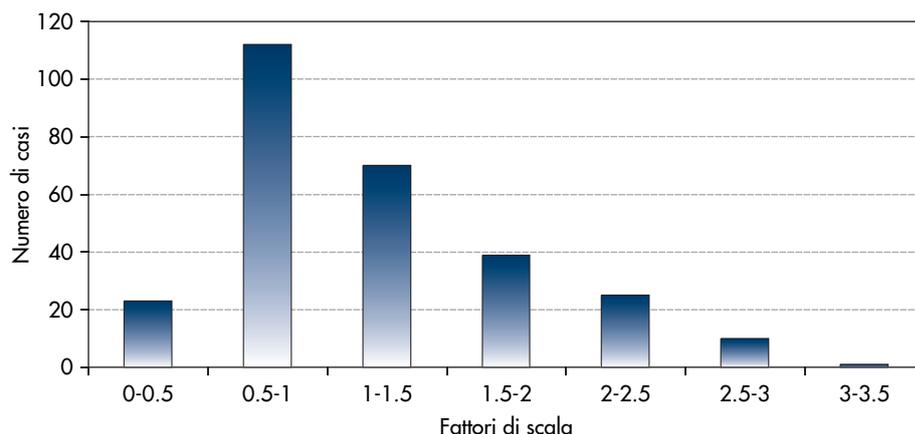


Figura 14
Istogramma di frequenza dei valori dei fattori di scala utilizzati per la selezione rispetto agli spettri di riferimento di ciascun gruppo.

4. Scalatura lineare degli accelerogrammi

Per ogni gruppo identificato, si sono selezionati 7 accelerogrammi spettro-compatibili con lo spettro di riferimento, come descritto nei paragrafi precedenti. Questi segnali sono stati quindi scalati linearmente, come descritto nel seguito, per renderli spettro-compatibili con ciascuno spettro del gruppo. La spettro-compatibilità è stata imposta in accordo alle prescrizioni delle NTC08 per gli accelerogrammi artificiali e cioè controllando che nell'intervallo di periodi $0.15\text{ s} \div 2\text{ s}$, lo spettro medio dei diversi accelerogrammi non abbia uno scarto in difetto superiore al 10% rispetto allo spettro di risposta considerato.

Lo spettro medio degli accelerogrammi compatibili con ciascuno spettro di un generico gruppo è stato ottenuto moltiplicando lo spettro medio degli accelerogrammi selezionati rispetto allo spettro di riferimento del gruppo in esame, per due fattori di scala, SF1 e SF2. SF1 è il fattore di scala necessario per passare dallo spettro di riferimento allo spettro considerato, ovvero il rapporto tra lo spettro in esame e lo spettro di riferimento relativamente all'ordinata spettrale rispetto alla quale sono stati scalati gli accelerogrammi in ASCONA. Poiché le forme spettrali, per quanto simili, non sono le stesse per tutti i nodi appartenenti ad un gruppo omogeneo, nella maggior parte dei gruppi l'applicazione del solo fattore SF1 non ha permesso di ottenere selezioni di segnali spettro-compatibili per tutti gli spettri. Pertanto è stato introdotto un fattore di scala aggiuntivo (SF2) per gli spettri che non verificavano la spettro-compatibilità con il solo fattore SF1.

Tenendo conto che il requisito di spettro-compatibilità riportato nelle NTC08 per gli accelerogrammi artificiali richiede solamente che lo scarto massimo negativo sia minore del 10% in un prefissato intervallo di periodi, il fattore di scala aggiuntivo, SF2, è stato definito in modo da garantire che il massimo scarto negativo fosse

pari al 10%. Si osserva come i valori utilizzati del fattore di scala SF2 siano molto vicini all'unità, per cui le ordinate degli spettri di risposta non sono state modificate in modo significativo.

5. Applicativo Web-gis di Seism-home

I risultati di questo studio relativi al periodo di ritorno di 475 anni sono stati organizzati in un applicativo WEB-GIS di facile e rapida fruizione e resi disponibili in rete all'indirizzo www.eucentre.it/seismhome.html.

SEISM-HOME (SElection of Input Strong-Motion for HOMogeneous MEsozones) consente di ottenere l'input sismico in termini di gruppi di 7 accelerogrammi spettro-compatibili con lo spettro di risposta in accelerazione prescritto dalle NTC08 per un sito qualsiasi del territorio nazionale. Il sito può essere selezionato in base al nome del Comune, alle coordinate geografiche (latitudine e longitudine) o semplicemente selezionandolo direttamente in modo interattivo da una mappa geografica dell'Italia.

L'applicazione individua il nodo della griglia di riferimento associata all'Allegato B delle NTC08 più vicino al sito di interesse e quindi il gruppo spettrale di appartenenza, determina lo spettro di risposta in accelerazione (componente orizzontale) previsto dalle NTC08 per quel nodo e per il periodo di ritorno di 475 anni e restituisce un gruppo di 7 registrazioni accelerometriche scalate e corrette, che sono spettro-compatibili con lo spettro di risposta per il sito di interesse. SEISM-HOME fornisce inoltre una tabella di sintesi delle principali caratteristiche sismologiche (ad es. magnitudo, distanza epicentrale, fattore di scala applicato, banca dati accelerometrica di appartenenza e codice di identificazione) delle registrazioni restituite. L'input sismico così definito è pronto per essere direttamente impiegato nelle analisi dinamiche di strutture e sistemi geotecnici.

6. Conclusioni

In questo articolo è stata illustrata una nuova strategia per la definizione dell'azione sismica da utilizzare per analisi dinamiche non lineari di strutture e/o sistemi geotecnici ubicati in un sito qualsiasi del territorio italiano. L'input sismico è rappresentato da registrazioni accelerometriche naturali spettro-compatibili con gli spettri di risposta prescritti dalle NTC08. Secondo la normativa italiana e la letteratura tecnica internazionale più avanzata, per le analisi dinamiche non lineari l'uso di accelerogrammi reali è preferibile rispetto ad accelerogrammi artificiali, ibridi e sintetici. In particolare, in caso di analisi dinamiche di sistemi geotecnici, le NTC08 non consentono l'utilizzo di accelerogrammi artificiali.

L'input sismico in termini di registrazioni accelerometriche è stato definito a partire dai risultati dello studio di pericolosità sismica condotto sul territorio nazionale dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (<http://esse1.mi.ingv.it/>) e recepito dalle NTC08. Il lavoro è stato svolto per il periodo di ritorno di 475 anni, che corrisponde ad una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni con riferimento a siti rocciosi affioranti (tipo A) e superficie topografica orizzontale.

Ai fini della selezione degli accelerogrammi, il territorio nazionale è stato suddiviso in aree omogenee dal punto di vista delle forme spettrali prescritte dalle NTC08 (mesozonazione), attraverso una metodologia sviluppata ad hoc. Per ciascuna di queste aree omogenee corrispondenti ad un gruppo specifico di spettri di risposta, è stato definito uno spettro di riferimento e sono stati selezionati, mediante il codice di calcolo ASCONA (Corigliano et al, 2012) 7 accelerogrammi reali, registrati su roccia, spettro-compatibili secondo la definizione delle NTC08 per gli accelerogrammi artificiali con lo spettro di riferimento di ciascun gruppo.

Per ciascun gruppo di spettri di risposta, gli accelerogrammi selezionati per lo spettro di riferimento sono stati scalati linearmente, consentendo così di ottenere delle registrazioni reali spettro-compatibili con ogni spettro del gruppo. In particolare, sono stati adottati due fattori di scala, il primo necessario per passare dallo spettro di riferimento agli spettri individuali e il secondo utilizzato per il soddisfacimento della spettro-compatibilità (solo quando non verificata dopo l'applicazione del primo fattore di scala), ovvero imponendo che il massimo scarto negativo non superi il limite del 10% indicato dalle norme. Nonostante tali operazioni, i fattori di scala finali, ottenuti come prodotto tra il fattore di scala utilizzato nella selezione rispetto allo spettro di riferimento e i due appena descritti, sono risultati contenuti, cioè compresi

per tutti i 40 gruppi nell'intervallo $0.31 \div 3.50$. Questa è una diretta conseguenza sia delle soglie per i fattori di scala imposte in ASCONA, sia dei criteri adottati per la definizione dei gruppi omogenei di spettri nonché la scelta degli spettri di riferimento per ciascun gruppo.

La bontà dell'adattamento tra gli spettri medi degli accelerogrammi spettro-compatibili e gli spettri delle NTC08 è stata controllata per tutti gli 8948 nodi considerati del reticolo nazionale mediante opportuni parametri, tra cui la deviazione spettrale media (compresa tra 0.04 e 0.24), la deviazione spettrale massima (compresa tra 0.35 e 0.96) e lo scarto medio in valore assoluto (compreso tra 3.5% e 21.3%). Si è inoltre controllato il rapporto tra i valori di a_g delle coppie di spettri (risultato compreso tra 0.9 e 1.6), per evitare una sovrastima eccessiva delle accelerazioni di picco su roccia e per rispettare anche le prescrizioni dell'Eurocodice 8 Parte 1.

I risultati ottenuti, relativi al periodo di ritorno di 475 anni sono disponibili sul sito www.eucentre.it/seismhome.html, da cui è possibile scaricare, per un punto qualsiasi del territorio italiano, un gruppo di 7 accelerogrammi reali, registrati su roccia, che soddisfano i requisiti di spettro-compatibilità prescritti dalle NTC08 e dalla Circolare esplicativa (Circ NTC08, 2009). L'input sismico è così immediatamente fruibile e può essere utilizzato direttamente nelle analisi ingegneristiche senza quindi necessità di applicare ulteriori correzioni.

La metodologia sviluppata per il periodo di ritorno di 475 anni è in corso di estensione allo scopo di definire l'input sismico per tutti i periodi di ritorno di interesse per le analisi ingegneristiche e per i diversi stati limite prescritti dalle NTC08. Inoltre, considerato che gli accelerogrammi reali utilizzati per definire l'input sismico sono stati selezionati riferendosi a condizioni di suolo rigido (suolo categoria A secondo la classificazione delle NTC08), è in fase di realizzazione una procedura semplificata, ma al tempo stesso rigorosa, che consenta di ottenere gruppi di accelerogrammi spettro-compatibili per differenti categorie litostratigrafiche a partire da registrazioni accelerometriche naturali su roccia affiorante. Uno degli sviluppi futuri del lavoro sarà quello di fornire, per ogni sito italiano, insiemi di accelerogrammi spettro-compatibili per diverse categorie di suolo, non rendendo quindi più necessario effettuare analisi di risposta sismica locale.

7. Ringraziamenti

Questo lavoro è stato sviluppato nell'ambito del progetto esecutivo 2009-2012 della Fondazione Eucentre E5/2 "Livelli di conoscenza e fat-

tori di confidenza per gli edifici e per il patrimonio culturale in muratura”, finanziato dal Dipartimento della Protezione Civile, e del progetto “Definizione del Terremoto di Progetto nei territori toscani della Garfagnana, Lunigiana, Mugello, Val di Sieve e Montagna Fiorentina” finanziato dalla Regione Toscana. Gli autori affiliati ad Eucentre sono grati di entrambi que-

sti contributi. Gli autori desiderano inoltre esprimere un particolare ringraziamento allo staff ICT di Eucentre ed in particolare all’Ing. Andrea Bianchi per l’assistenza fornita nello sviluppo dell’applicativo WEB SEISM-HOME contenente i risultati dello studio e a tre revisori anonimi che hanno contribuito a migliorare la descrizione del lavoro svolto.

Bibliografia

- Barani S., Spallarossa D., Bazzurro P. (2009) - Disaggregation of Probabilistic Ground Motion Hazard in Italy, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 99, No. 5, pp. 2638-2661.
- Circ. NTC (2009) - Circolare, n. 617, 2 febbraio 2009, del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti approvata dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici - Istruzioni per l’applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 14 gennaio 2008.
- Corigliano M., Lai C.G., Rota M., Strobbia C. (2012) - ASCONA: Automated Selection of COmpatibile Natural Accelerograms. In stampa su *Earthquake Spectra*.
- EN 1998-1 (2005) - Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.
- GdL MPS (2004) - Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall’Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003, Rapporto conclusivo per il dipartimento di Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, 65 pp. +5 appendici. Website: <http://zonesismiche.mi.ingv.it/elaborazioni/>.
- Iervolino I., Maddaloni G., Cosenza E. (2008) - Eurocode 8 compliant real record sets for seismic analysis of structures, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 12, pp. 54-90.
- Iervolino I., Cosenza E., Galasso C. (2009) - Spettri, accelerogrammi e le nuove norme tecniche per le costruzioni, *Progettazione Sismica*, No. 1, pp. 33-50.

- Iervolino I., Galasso C., Cosenza E. (2010) - REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 8, pp. 339-362.
- Iervolino I., Chioccarelli E., Convertito V. (2011a) - Engineering design earthquakes from multimodal hazard disaggregation. *Soil Dyn Earthquake Eng* 31(9): 1212-1231.
- Iervolino I, Galasso C, Paolucci R, Pacor F (2011b) - Engineering ground motion record selection in the Italian ACcelerometric Archive. *Bull Earthq Eng* 9: 1761-1778.
- Lai C.G., Foti S., Rota M. (2009) - Input Sismico e Stabilità Geotecnica dei Siti di Costruzione, IUSS Press. Collana Manuali di Progettazione Antisismica, Vol. 6, pp. 312. Testo di riferimento per l’applicazione delle Norme Tecniche 14/01/2008.
- Meletti C., Valensise G. (2004) - Zonazione Sismogenetica ZS9 - App. 2 al Rapporto Conclusivo, Appendice 2 al documento “Redazione della Mappa di Pericolosità Sismica prevista dall’Ordinanza PCM del 20 marzo 2003, n. 3274, All. 1 - Rapporto Conclusivo, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, <http://zonesismiche.mi.ingv.it/>.
- Newmark N. (1965) - Effects of earthquakes on dams and embankments, *Geotechnique*, Vol. 15, No. 2, pp. 139-160.
- NTC (2008) - Norme tecniche per le costruzioni, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto Ministeriale del 14 gennaio 2008, Supplemento ordinario alla G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008.

APPENDICE

Approfondimento sulla selezione di gruppi di accelerogrammi spettro-compatibili e caratteristiche degli eventi che controllano la pericolosità sismica al sito

Come è descritto nel testo, la selezione degli accelerogrammi deve essere coerente anche con il contesto sismo-tettonico e sismo-genetico regionale.

Ci si potrebbe attendere che il rispetto del vincolo di spettro-compatibilità porti di per sé ad una selezione coerente con le caratteristiche che dominano la pericolosità al sito, visto che il riferimento per la rappresentazione della pericolosità è proprio lo spettro di risposta elastico in accelerazione.

In realtà, questo potrebbe essere il caso se si

trattasse di un set di accelerogrammi selezionato, senza scalatura, da una banca dati di registrazioni ipoteticamente infinita e se lo spettro di risposta fosse derivato da uno studio di scenario che considerasse una specifica legge di attenuazione. Purtroppo invece il database, per quanto ampio, è comunque limitato e solo l’occorrenza di ulteriori terremoti nel futuro potrà ampliarlo adeguatamente. Inoltre:

- Lo spettro di risposta di normativa, rispetto al quale viene imposta la spettro-compatibilità, è ottenuto a partire da quello ricavato nello studio di pericolosità sismica nazionale (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>) imponendo una forma predefinita tramite un’approssimazione ai minimi quadrati;

- Lo spettro di risposta ottenuto dallo studio di pericolosità è il risultato, per ognuna delle ordinate spettrali considerate, di una procedura ad albero logico con 16 rami di cui viene utilizzato il 50° percentile (mediana);
- Gli spettri di risposta a pericolosità uniforme sono il risultato di analisi che prendono in considerazione tutti i possibili eventi che possono essere risentiti al sito, ciascuno dei quali, quindi, caratterizzato da una diversa coppia magnitudo-distanza. La disaggregazione fornisce le coppie dominanti per i diversi valori di periodo di vibrazione, che ovviamente sono in generale diverse da periodo a periodo;
- Gli accelerogrammi reali non possono in generale essere spettro-compatibili con uno spettro di risposta non derivato da uno specifico scenario deterministico, ma da un processo affetto da "imperfezioni" quali quelle descritte sommariamente nei punti precedenti. Per questo motivo si utilizzano gruppi di accelerogrammi che siano spettro-compatibili in media e si ammette la loro scalatura;
- Gli spettri di risposta dei singoli accelerogrammi reali che compongono il set selezionato per rispettare in media i requisiti di spettro-compatibilità non sono a loro volta, in generale, spettro-compatibili, ma possono essere inclusi nella selezione proprio al fine di compensare il difetto di spettro-compatibilità degli altri segnali selezionati. Inoltre, il requisito di spettro-compatibilità è basato sullo scarto in difetto delle ordinate spettrali medie, mentre non sono posti vincoli allo scarto in eccesso;
- Lo spettro di risposta elastico di un accelero-

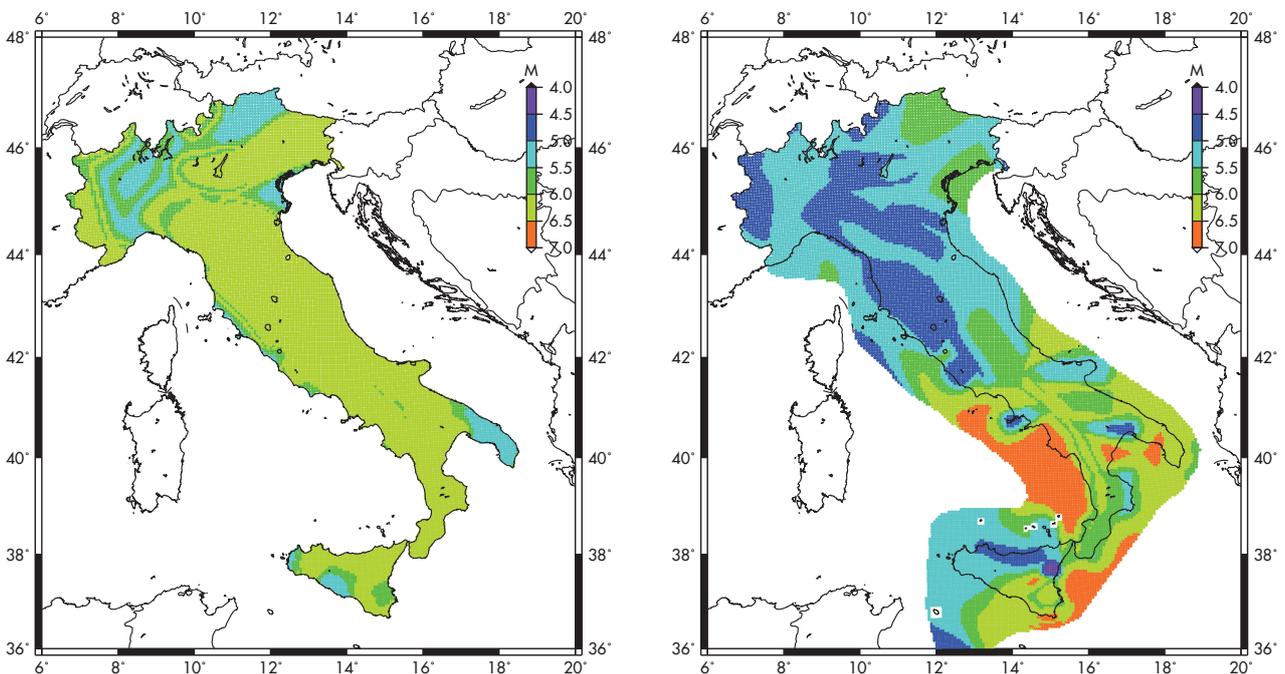
gramma reale scalato linearmente è anch'esso scalato linearmente in ampiezza, perdendo dunque parte del legame causale con le caratteristiche originali dell'evento di cui è stata effettuata la registrazione e della posizione della stazione di registrazione rispetto alla sorgente.

Gli aspetti elencati brevemente in precedenza rendono quindi molto meno scontata una diretta corrispondenza tra le caratteristiche degli eventi che governano alcuni aspetti della pericolosità e i corrispondenti parametri relativi alle registrazioni selezionate e scalate. Infatti, il criterio di spettro-compatibilità per la selezione di accelerogrammi naturali non garantisce che le registrazioni corrispondano, non solo alla disaggregazione della pericolosità al sito, ma nemmeno a coppie di magnitudo e distanza a cui corrispondano gli spettri di cui lo spettro a pericolosità uniforme è un involuppo.

Tuttavia, in questo caso, la discreta corrispondenza trovata, almeno qualitativamente, tra la distribuzione spaziale dei valori di accelerazione massima del terreno e le zone omogenee dal punto di vista delle forme spettrali (mesozonazione) potrebbe suggerire l'idea di approfondire comunque un confronto tra i valori di magnitudo degli accelerogrammi selezionati e quelli derivanti dalla disaggregazione dello studio di pericolosità (per la PGA).

Il confronto tra la magnitudo derivante dagli studi di disaggregazione delle analisi probabilistiche di pericolosità sismica e la magnitudo degli eventi che hanno generato le registrazioni selezionate è riportato in Figura 15.

Figura 15
Confronto tra i valori di magnitudo minimi delle registrazioni selezionate in SEISMHOME (a sinistra) e (a destra) i valori di magnitudo ottenuti dalla disaggregazione in Barani et al. (2009).



Infatti, la definizione degli intervalli di magnitudo e distanza da utilizzare nella selezione sono stati definiti a partire dallo studio di disaggregazione di Barani *et al.* (2009) per l'accelerazione massima del terreno (a_g). Tali valori sono stati utilizzati come limite inferiore degli intervalli di magnitudo e distanza imposti in ASCONA per la selezione degli accelerogrammi. Ciò è stato fatto considerando che i valori di disaggregazione variano al variare del periodo strutturale considerato e che più di un singolo evento di scenario può controllare la pericolosità al sito (si veda anche Iervolino *et al.*, 2011a). Il limite superiore è stato impostato in modo da consentire la selezione di un set di 7 accelerogrammi. In ogni caso il valore massimo di magnitudo impostato è 7.4 (valore di magnitudo massimo presente nel catalogo di terremoti CPTI04).

Pertanto, le magnitudo utilizzate sono generalmente più alte di quelle derivanti dallo studio di disaggregazione per l'accelerazione massima

del terreno (Barani *et al.*, 2009). In ogni caso i valori di magnitudo associati a ciascun sismogramma sono esplicitati nei files di informazione associati a ciascuna selezione. In questo modo l'utente può giudicare la bontà della selezione e decidere se utilizzare o meno gli accelerogrammi proposti.

Da quanto esposto fin qui, sembrerebbe esserci un'incongruenza di fondo tra il requisito normativo di spettro-compatibilità per la selezione degli accelerogrammi e il vincolo che questi rispettino il contesto sismo-tettonico e sismogenetico regionale. Tuttavia, se quest'ultimo vincolo fosse interpretato semplicemente come vincolo alla selezione di registrazioni di eventi generati da sorgenti sismiche con caratteristiche compatibili con quelle della regione di interesse (ad esempio, tipi di meccanismo di fagliazione con limitazione della magnitudo massima), la questione si porrebbe in termini molto più conciliabili.