Definizione dell'input sismico nei territori toscani della Lunigiana e Garfagnana

Carlo G. Lai,* Claudio Strobbia,** Andrea Dall'Ara***

Sommario

L'esecuzione di analisi dinamiche non-lineari per la valutazione della risposta sismica di strutture, stabilità co-sismica di versanti naturali e per il calcolo della risposta sismica locale, richiede una precisa definizione dell'input sismico, cioè una descrizione dello scuotimento indotto in una serie di punti della superficie libera del terreno o in profondità dall'azione dei terremoti. Essa è usualmente definita mediante storie temporali delle tre componenti del moto sismico espresse alternativamente in termini di accelerazione, velocità o spostamento. Questo articolo illustra i risultati di uno studio finalizzato alla definizione dell'azione sismica di progetto in corrispondenza dei principali centri abitati dei territori della Lunigiana e della Garfagnana in Toscana. Il lavoro è stato svolto in accordo alle prescrizioni dell'OPCM n° 3431 del 3/5/2005 che prevede la necessità di definire fino a tre stati limite di riferimento (stato limite di danno lieve, danno severo e di collasso) a cui vengono associati periodi di ritorno dell'azione sismica rispettivamente di 72, 475 e 2475 anni. Lo studio è consistito in una prima fase nella quale è stata eseguita una analisi di pericolosità sismica multi-sito, di tipo probabilistico seguendo il classico approccio di *Cornell-McGuire*. Sono stati calcolati gli spettri di risposta dell'accelerazione orizzontale a pericolosità uniforme (spettri *isoprobabili*) su suolo di tipo rigido per i tre suddetti periodi di ritorno. L'accelerazione spettrale di ancoraggio calcolata a T=0 relativa al periodo di ritorno dei 475 anni è stata trovata coerente a quella determinata dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nell'ambito del progetto per la redazione della mappa di pericolosità sismica nazionale ai sensi dell'OPCM n° 3274 del 20/3/2003. Successivamente, dopo aver registrato una sostanziale invarianza della forma spettrale degli spettri di risposta nei territori oggetto di studio, è stata eseguita una analisi di deaggregazione dei risultati dello studio probabilistico di pericolosità sismica. Questo ha permesso l'identificazione di una serie di scenari deterministici che governano la pericolosità i quali hanno consentito di selezionare accelerogrammi reali soddisfacenti alle caratteristiche di spettro-compatibilità prescritte dalla normativa europea per la definizione dell'input sismico.

Parole chiave: Terremoto di progetto, Pericolosità sismica, Spettro di risposta, Deaggregazione, Input sismico, Normativa sismica, Toscana.

Introduzione

Il presente lavoro si colloca nell'ambito del progetto denominato "VEL" (*Valutazione degli Effetti Locali*) sostenuto dalla Regione Toscana, il quale prevede come prodotto finale la microzonazione sismica dei principali centri urbani della Lunigiana e della Garfagnana. Il progetto ha quindi l'obiettivo di definire, all'interno di ambiti territoriali a scala sub-comunale (frazioni e centri), le aree a comportamento omogeneo sotto il profilo della risposta sismica locale, e definire i possibili effetti di tale comportamento sui principali centri urbani, sulle reti di servizio e sulle infrastrutture di comunicazione e fornire agli enti locali informazioni e parametri utili alla progettazione edilizia e pianificazione urbanistica.

Se per la macrozonazione sismica di un territorio può essere sufficiente definire il livello di pericolosità sismica del sito in termini di accelerazione orizzontale di picco (a_{max}), per l'esecuzione di analisi dinamiche è necessario descrivere l'azione sismica in modo più approfondito per esempio attraverso uno spettro di risposta isoprobabile. Per le analisi dinamiche la normativa italiana /1,2,3,28/ fornisce degli spettri di risposta di riferimento che possono essere utilizzati qualora non sia disponibile uno spettro probabilistico determinato attraverso uno studio specifico di pericolosità sismica nel sito di interesse.

La rappresentazione dell'azione sismica cambia quando è necessario eseguire analisi non lineari (o lineari equivalenti) di risposta sismica locale, di stabilità sismica di versanti e per le analisi dinamiche non lineari delle strutture. In questi casi l'input si-

* Primo Ricercatore, Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (EUCENTRE), Pavia
e-mail: carlo.lai@eucentre.it
** Ricercatore, Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (EUCENTRE), Pavia
e-mail: claudio.strobbia@eucentre.it
*** Studente di Dottorato, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie, Politecnico di Torino
e-mail: andrea.dallara@polito.it

smico deve essere definito in termini di storie temporali dello scuotimento, tipicamente mediante accelerogrammi. Esistono diversi approcci alla scelta degli accelerogrammi per le analisi dinamiche:

- accelerogrammi artificiali generati mediante algoritmi di tipo puramente stocastico /4/ con il vincolo di essere spettro-compatibili ad uno spettro di risposta obiettivo;
- accelerogrammi artificiali generati mediante approcci di tipo stocastico ma compatibili con alcuni vincoli sismogenetici come ad esempio magnitudo e distanza epicentrale /5,6/;
- accelerogrammi sintetici generati mediante complessi modelli matematici della sorgente sismica e del fenomeno propagatorio /7,8/. La generazione di accelerogrammi sintetici richiede una dettagliata conoscenza di dati sismologici e geofisici ed è difficile simulare in modo realistico le componenti ad alta frequenza;
- accelerogrammi reali selezionati da banche dati di registrazioni relative a terremoti naturali come per esempio lo *European Strong Motion Database* (ESD)[1], il *Pacific Earthquake Engineering Research Centre* (PEER)[2], il *Consortium of Organization for Strong Motion Observation Systems* (COSMOS)[3]. Tali accelerogrammi reali vengono tipicamente selezionati sulla base di appositi vincoli geologici e sismogenetici regionali;
- accelerogrammi artificiali generati mediante procedure di tipo ibrido ottenuti a partire da registrazioni reali opportunamente modificate al fine di soddisfare il requisito della spettro-compatibilità con uno spettro di risposta obiettivo per esempio quello probabilistico /9,10/.

Per le analisi di risposta sismica locale e più in generale per problemi di geotecnica sismica è preferibile l'impiego di accelerogrammi naturali in quanto più realistici dal punto di vista del contenuto in frequenza e del numero di cicli, della corretta correlazione temporale tra le componenti orizzontale e verticale dello scuotimento, del contenuto energetico in relazione ai parametri sismogenetici /11,12,13/.

In questo studio gli accelerogrammi necessari alla definizione dell'input sismico per le analisi dinamiche sono stati selezionati da banche dati accelerometriche *strong motion*. La selezione degli accelerogrammi è stata eseguita imponendo il vincolo della loro spettro-compatibilità, in media, allo spettro di risposta probabilistico determinato nello studio di pericolosità e ciò in ottemperanza alle prescrizioni dell'Eurocodice 8 Parte 1.

Il metodo seguito per la definizione completa dell'input sismico è articolato in diverse fasi la prima delle quali prevede, come già menzionato, una valutazione della pericolosità sismica con il metodo probabilistico finalizzata alla determinazione, per diversi periodi di ritorno, degli spettri di risposta in accelerazione su suolo di tipo rigido.

I dati di partenza impiegati nello studio sono il catalogo parametrico dei terremoti italiani CPTI-04 /14/ e la zonazione sismogenetica ZS9 /15,16/ messi recentemente a punto dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) nell'ambito del progetto di redazione della nuova mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale /17/.

La valutazione della pericolosità sismica è stata eseguita utilizzando l'approccio standard di *Cornell-McGuire* /18,19/ mediante il quale la *superficie di pericolosità* (grafico che illustra la variabilità dell'accelerazione spettrale in funzione del periodo dell'oscillatore semplice e della frequenza annuale di eccedenza) è determinata integrando i contributi alla pericolosità delle diverse zone sismogenetiche afferenti al sito oggetto di studio (supposto ubicato su roccia affiorante), noti i tassi di occorrenza di ciascuna ed impiegando opportune leggi di attenuazione del moto sismico.

Successivamente, dalla superficie di pericolosità sismica sono stati estratti gli spettri di risposta isoprobabili per i periodi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni che sono i periodi di ritorno associati dall'OPCM 3431 [2005] all'azione sismica di progetto per lo stato limite di danno lieve, di danno severo e di collasso rispettivamente /3/. Questo calcolo è stato eseguito per ogni punto di un maglia spaziale collocata nei più importanti centro urbani dei territori della Lunigiana e della Garfagnana in Toscana.

Gli spettri di risposta probabilistici ottenuti dall'analisi riflettono i contributi di diverse zone sismogenetiche (considerate simultaneamente attive) e ciò in dipendenza della posizione geografica del sito e della specifica accelerazione spettrale considerata. Poiché gli accelerogrammi naturali sono registrazioni dello scuotimento di eventi sismici deterministici caratterizzati da ben definiti valori di magnitudo e distanza epicentrale, al fine di selezionare gli accelerogrammi naturali è quindi necessario associare alle ordinate dello spettro di risposta probabilistico uno o più scenari di terremoto deterministici. È stata quindi implementata una procedura di *deaggregazione* la quale assolve esattamente a questa funzione consentendo di determinare i valori della coppia magnitudo-distanza epicentrale (M, d) che contribuiscono in senso probabilistico (a meno di uno scarto[4]), al valore di una prefissata accelerazione spettrale (per es. a_{max}) per il sito di riferimento. Una volta identificata la coppia (M, d), si è proceduto alla selezione degli accelerogrammi naturali avendo prima stabilito una tolleranza per i campi di variazione dei valori di magnitudo e distanze epicentrali ottenuti dalle analisi di deaggregazione.

La selezione degli accelerogrammi naturali dalle banche dati accelerometriche è stata eseguita con riferimento unicamente a registrazioni effettuate su sito rigido. Considerando la variabilità degli spettri di risposta dei singoli accelerogrammi selezionati, sono stati individuati gruppi di 7 terne di accelerogrammi il cui spettro fosse compatibile, in media, allo spettro probabilistico di riferimento.

La dimensione del gruppo di accelerogrammi da utilizzarsi nelle analisi, ne condiziona i tempi di esecuzione e la distribuzione statistica dei risultati. La scelta di considerare per ciascun gruppo di accelerogrammi reali selezionati (per i periodi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni) un numero di 7 terne accelerometriche consente di rappresentare in modo adeguato la variabilità dell'input sismico e nel contempo di stabilizzare la media dei risultati delle analisi come specificato nella normativa sismica europea /11/ la quale ammette di poter fare riferimento ai risultati medi delle analisi dinamiche anziché a quelli massimi se il numero di accelerogrammi utilizzati è maggiore di 7.

La selezione dei gruppi di 7 terne di accelerogrammi reali spettro-compatibili è stata effettuata utilizzando un codice di calcolo appositamente messo a punto che, a partire dalle registrazioni scaricate dalle banche dati, combina automaticamente gli accelerogrammi identificando i gruppi il cui spettro medio si adatti sufficientemente bene allo spettro probabilistico risultante dalle analisi di pericolosità sismica. Il programma considera tutte le possibili combinazioni ($> 10^8$) di gruppi di 7 accelerogrammi naturali appartenenti ad una famiglia precedentemente selezionata e confronta lo spettro di risposta medio con quello obiettivo. Tra tutte le combinazioni possibili viene scelta quella con scarto negativo e scarto medio minori.

Il gruppo di 7 terne di accelerogrammi naturali selezionati per il periodo di ritorno di 475 anni è stato utilizzato per una simulazione numerica di risposta sismica locale 1D eseguita su un sito prova con stratigrafia e profilo di velocità delle onde trasversali assegnati.

Analisi probabilistica di pericolosità sismica (Approccio di Cornell-McGuire*)*

Il metodo seguito per la valutazione della pericolosità sismica con l'approccio probabilistico è quello standard di *Cornell-McGuire* /18,19/ mediante il quale sono state determinate mappe di a_{max} sui territori della Lunigiana e della Garfagnana e spettri di risposta isoprobabili riferiti ai periodi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni. La metodologia prevede l'implementazione dei seguenti passi:

– Identificazione e caratterizzazione delle sorgenti sismiche potenzialmente in grado di produrre scuotimenti significativi al sito. Assegnando probabilità uniformemente distribuita ad ogni sorgente, gli eventi sismici hanno uguale probabilità di verificarsi all'interno della stessa zona.
– Definizione del processo di accadimento temporale degli eventi sismici. Per caratterizzare la sismicità di ogni sorgente sismica si utilizzano le relazioni di ricorrenza frequenza-magnitudo, che specificano il tasso medio di eccedenza per ogni classe di magnitudo.
– Determinazione attraverso le relazioni di attenuazione del valore del parametro di scuotimento (in questo caso l'accelerazione spettrale) al sito per ogni possibile coppia magnitudo-distanza (M, d) che può essere individuata da ognuna delle sorgenti sismogenetiche afferenti al sito.
– Determinazione della probabilità che al sito di interesse e in un certo intervallo di tempo venga superato un prefissato valore di intensità dello scuotimento sismico (misurato in questo caso dall'accelerazione spettrale) a causa dell'accadimento di terremoti in ciascuna delle zone sismogenetiche afferenti al sito. Il calcolo prevede quindi l'integrazione delle distribuzioni di probabilità di magnitudo, ottenute dalle leggi di ricorrenza frequenza-magnitudo, valide per ognuna delle zone sismogenetiche afferenti al sito, e di distanza che sono funzione della dimensione della zona sismogenetica e della sua posizione rispetto al sito di interesse. Nel calcolo sono automaticamente prese in conto le incertezze relative all'ubicazione e all'intensità degli eventi nonché quelle relative alle capacità predittive delle relazioni di attenuazione.

L'analisi di pericolosità sismica determina il numero annuo di eventi che produce un valore del parametro di scuotimento prescelto (per es. a_{max} oppure una ordinata qualsiasi della accelerazione spettrale) superiore ad una determinata soglia z prefissata. Questo numero di eventi all'anno ν è la frequenza annuale di eccedenza. L'inverso di ν è in prima approssimazione il periodo di ritorno[5].

Nell'esecuzione dell'analisi di pericolosità si è cercato, ove possibile, di impiegare i dati e i metodi utilizzati dall'INGV nella redazione della Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale /17/. Il calcolo è stato tuttavia condotto in modo semplificato, utilizzando un albero logico con un numero inferiore di rami. Tuttavia, oltre al valore di a_{max} sono state calcolate le accelerazioni spettrali corrispondenti a diversi valori del periodo. Come relazioni di attenuazione sono state utilizzate quelle di SABETTA e PUGLIESE [1996] e di AMBRASEYES *et al.* [1996] /5,20/. I tassi di sismicità sono stati calcolati utilizzando le relazioni frequenza-magnitudo di Gutenberg-Richter troncate superiormente. Come dati di partenza forniti

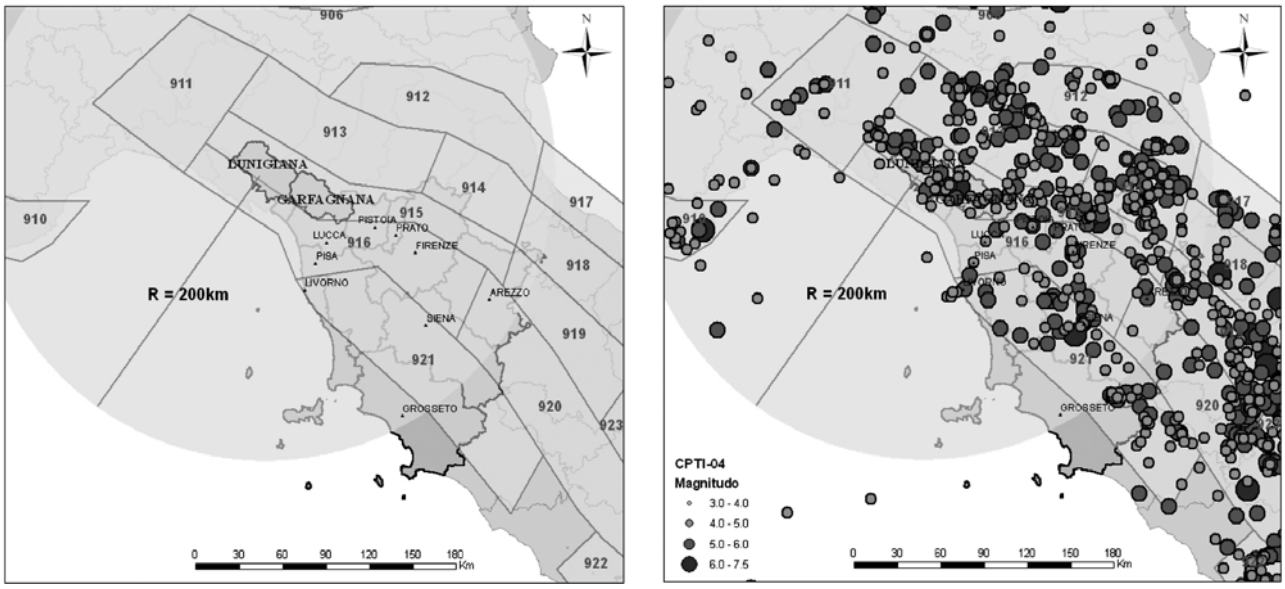

Fig. 1 – Inquadramento dell'area interessata dallo studio (a sinistra) e distribuzione degli epicentri dei terremoti (a destra). Eventi contenuti nel catalogo CPTI-04. Finestra temporale dal 217 a.C. al 2002 d.C. /14/. Sovrapposizione sulla mappa degli epicentri della zonazione sismogenetica ZS9 /15,16/.

Fig. 1 – General layout of the area of study (left) and distribution of earthquake epicenters (right). Events included in the catalogue CPTI-04. Temporal window from 217 B.C. to 2002 A.C. /14/. Overlapping of the seismogenic zoning map ZS9 /15,16/ with the map of the epicenters.

dall'INGV sono stati impiegati il catalogo parametrico dei terremoti italiani CPTI-04 e la zonazione sismogenetica ZS9 /17/.

Ai fini di questo studio dal catalogo CPTI-04 sono stati estratti gli eventi sismici contenuti nelle zone sismogenetiche che afferiscono, anche solo in parte, in una finestra circolare centrata sui centri abitati della Lunigiana e Garfagnana e avente un raggio di 200 km. La figura 1 illustra la mappa con gli epicentri dei terremoti e la zona di interesse, mentre la figura 2 mostra le zone sismogenetiche considerate.

Le classi di magnitudo e i periodi di completezza considerati sono gli stessi utilizzati dall'INGV nella redazione della Mappa di Pericolosità Sismica Nazionale /17/. La sismicità di una porzione di territorio è descritta in termini probabilistici dalla relazione frequenza-magnitudo di *Gutenberg-Richter* /21/ che fornisce il tasso medio annuale di accadimento λ_M di eventi sismici aventi magnitudo maggiore o uguale a M_W secondo l'espressione:

$$\text{Log}\,\lambda_{Mw} = a - b \cdot M_W \qquad (1)$$

dove i parametri *a* e *b* rappresentano rispettivamente la sismicità totale della regione a cui è riferita l'Eq. (1) (10^a definisce infatti il tasso di accadimento annuale medio di terremoti aventi magnitudo maggiore o uguale a zero) e la frequenza relativa di accadimento dei terremoti più forti (e quindi più sporadici) rispetto a quelli più deboli (e quindi più frequenti). Tali parametri sono determinati attraverso una procedura statistica di regressione con il metodo dei *minimi quadrati* nel piano semi-logaritmico log λ_{Mw}–M_W. Dal catalogo dei terremoti CPTI-04/14/ e facendo riferimento ai periodi di completezza sopra menzionati sono stati calcolati i tassi di accadimento cumulativi annuali per i diver-

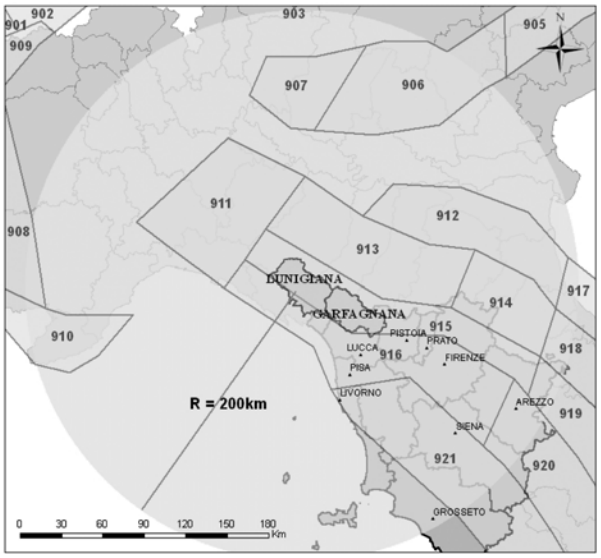

Fig. 2 – Posizione dei territori della *Lunigiana* e della *Garfagnana* rispetto alla nuova zonazione sismogenetica ZS9 (modificata da INGV /23/).

Fig. 2 – Positioning of the territories of Lunigiana and Garfagnana with respect to the new seismogenic zoning ZS9 (modified from INGV /23/).

si intervalli di magnitudo e per le zone sismogenetiche che afferiscono all'area di interesse. I valori ottenuti per questi tassi di accadimento sono in accordo a quelli determinati dallo studio INGV /17/[6].

L'analisi probabilistica di pericolosità sismica con il metodo di *Cornell–McGuire* /18,19/ è stata effettuata con il codice di calcolo EZ-FRISK /22/. Il software utilizza come dati di input oltre alle elaborazioni del catalogo dei terremoti, le geometrie delle sorgenti sismogenetiche e le relazioni di attenuazione attraverso le quali si vuole determinare il livello di scuotimento atteso al sito di interesse. Le sorgenti sismogenetiche possono essere sia a sviluppo lineico (come nel caso di faglie) oppure sorgenti di tipo areale (come nel caso in esame). Il software contiene al suo interno un'ampia banca dati di relazioni di attenuazione, tra le quali anche quella di AMBRASEYES *et al.* [1996] e SABETTA e PUGLIESE [1996] /20,5/.

Risultati delle analisi

Gli studi di pericolosità sismica più recenti effettuati dall'INGV nei territori della *Lunigiana* e della *Garfagnana* definiscono essenzialmente la distribuzione geografica dei valori di a_{max} riferiti ad un periodo di ritorno di 475 anni /17,23/. Un altro possibile riferimento sono gli spettri di risposta prescritti dalla normativa italiana /3,28/ ed europea /11,12/, il cui impiego tuttavia, può essere eccessivamente cautelativo come sarà mostrato nel seguito.

Poiché la selezione degli accelerogrammi reali per le analisi in *Lunigiana* e *Garfagnana* è stata condotta mediante deaggregazione dei risultati dello studio di pericolosità sismica con il vincolo che lo spettro medio deterministico soddisfi i requisiti della spettro-compatibilità con quello di riferimento, si è quindi preferito ripetere lo studio di pericolosità a scala regionale concentrandosi dapprima su una griglia di punti ubicati sulle sedi municipali dei comuni della *Garfagnana* e della *Lunigiana*, e poi su una griglia regolare di punti con passo spaziale 0,05°, calcolando gli spettri di risposta isoprobabili per i tempi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni.

Scopo principale di questa fase è stato valutare in modo accurato la variabilità spaziale degli spettri di risposta per stabilire la necessità o meno di selezionare insiemi di accelerogrammi diversi per diverse porzioni dei territori della *Lunigiana* e della *Garfagnana*. Nel contempo, i risultati delle analisi espressi in termini di a_{max} sono stati confrontati con quelli ottenuti dall'INGV /17,23/.

Sono stati determinati per i territori della *Lunigiana* e della *Garfagnana*, i valori di a_{max} e gli spettri di risposta probabilistici a pericolosità uniforme con probabilità di eccedenza del 50%, 10% e 2% in 50 anni (corrispondenti rispettivamente ai periodi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni) su una griglia spaziale con passo spaziale 0,05° sia in Latitudine che in Longitudine. Le figure 3, 4 e 5 mostrano le mappe dei valori di a_{max} ottenuti.

I risultati delle analisi per le mappe di a_{max} riferite al periodo di ritorno di 475 anni sono stati confrontati con la mappa di pericolosità sismica redatta dall'INGV /17/ e con il successivo studio di affinamento condotto sempre da INGV /23/ per la Regione Toscana, verificando in entrambi i casi un buon accordo sia dei valori di a_{max} che delle sue variazioni spaziali con scostamenti variabili da un minimo del 2% al comune di *Fivizzano* fino ad un massimo del 13% in località *Fosdinovo*, entrambe in provincia di *Massa Carrara* /24/.

Verranno ora illustrati i risultati ottenuti a *Fivizzano*, un comune significativo dal punto della sismicità storica e dei valori di a_{max} calcolati. In figura 6 sono mostrate le curve di pericolosità per

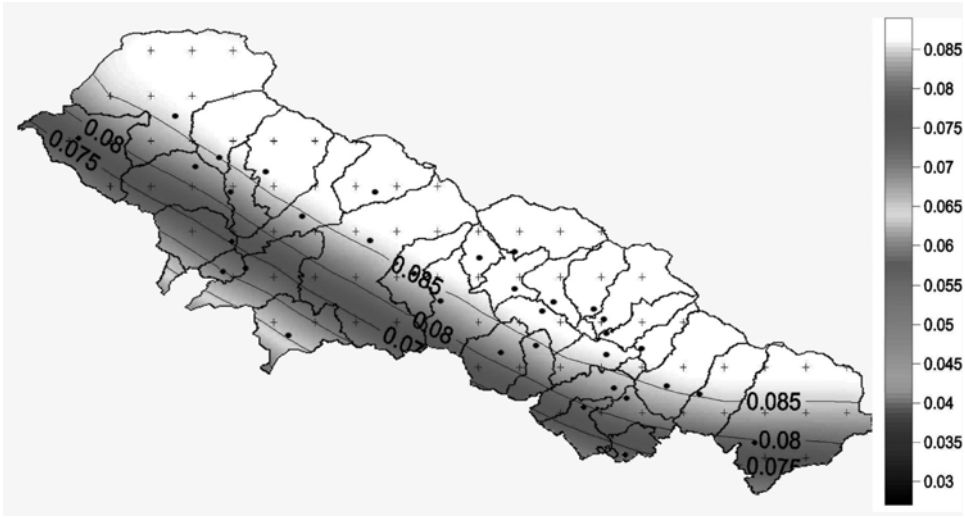

Fig. 3 – Mappa dei valori di a_{max} (g) con probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni (periodo di ritorno di 72 anni) per i territori della *Lunigiana* e della *Garfagnana* calcolati su una griglia spaziale con passo 0,05°.
Fig. 3 – Map of PGA (g) having 50% probability of exceedance in 50 years (return period of 72 years) for the territories of Lunigiana and Garfagnana computed on a 0.05 degrees step spatial grid.

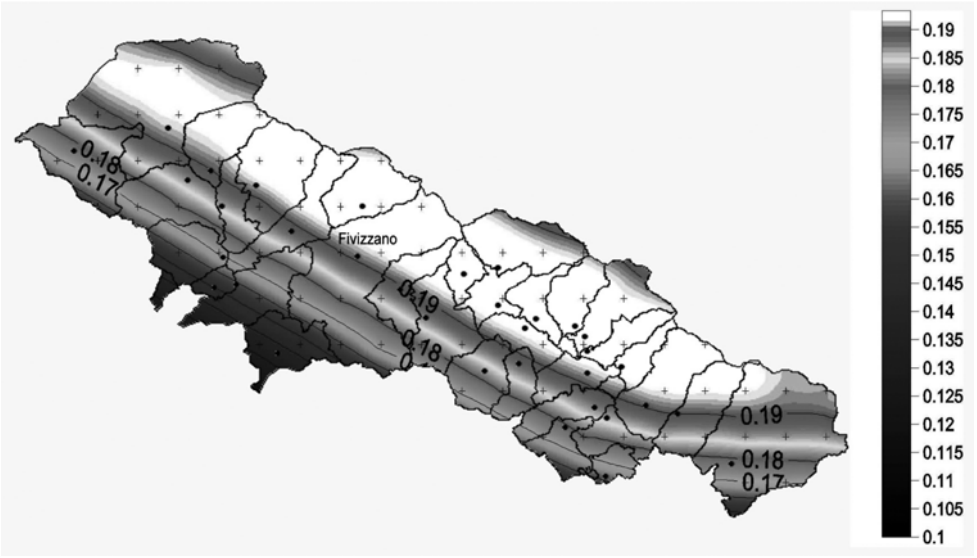

Fig. 4 – Mappa dei valori di a_{max} (g) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (periodo di ritorno di 475 anni) per i territori della *Lunigiana* e della *Garfagnana* calcolati su una griglia spaziale con passo 0,05°.
Fig. 4 – Map of PGA (g) having 10% probability of exceedance in 50 years (return period of 475 years) for the territories of Lunigiana and Garfagnana computed on a 0.05 degrees step spatial grid.

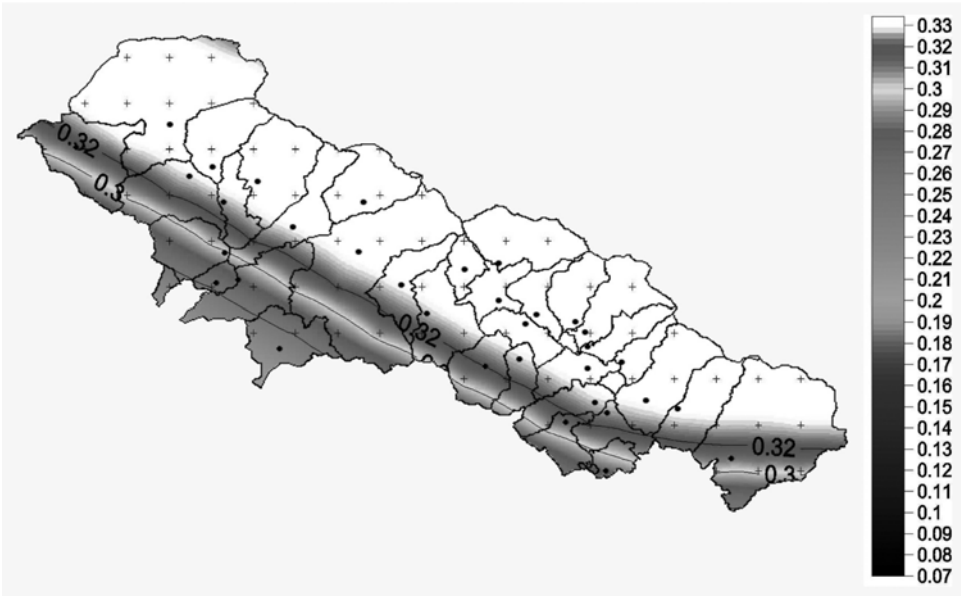

Fig. 5 – Mappa dei valori di a_{max} (g) con probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni (periodo di ritorno di 2475 anni) per i territori della *Lunigiana* e della *Garfagnana* calcolati su una griglia spaziale con passo 0,05°.
Fig. 5 – Map of PGA (g) having 2% probability of exceedance in 50 years (return period of 2475 years) for the territories of Lunigiana and Garfagnana computed on a 0.05 degrees step spatial grid.

l'accelerazione spettrale a T=0 (a_{max}) riferite al periodo di ritorno dei 475 anni e per condizioni di sito rigido.

Per lo stesso sito sono state anche calcolate le accelerazioni spettrali per diversi valori del periodo e della probabilità annuale di eccedenza ottenendo così la *superficie di pericolosità sismica* mostrata in figura 7 dalla quale è stato possibile determinare gli spettri di risposta a pericolosità uniforme per i periodi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni illustrati in figura 8 e che corrispondono alle probabilità di eccedenza di 0,50, 0,10 e 0,02 in 50 anni. I relativi valori di a_{max} (per condizioni di sito rigido) sono rispettivamente pari a 0,086g, 0,191g e 0,332g /24/.

Il calcolo dei valori di a_{max} per i periodi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni e dei corrispondenti spettri di risposta isoprobabili (in accelerazione) è stato eseguito anche per tutti i principali centri abitati della *Lunigiana* e della *Garfagnana*. In figura 9 sono illustrati gli spettri di risposta (componente orizzontale) riferiti al periodo di ritorno di 475 anni per tutti i comuni di *Lunigiana* e *Garfagnana*. Dal confronto appare evidente che lo spettro di risposta calcolato per *Fivizzano* è caratterizzato da accelerazioni spettrali tra le più elevate. Solo alcuni centri della *Garfagnana* sono caratterizzati da valori maggiori. Inoltre le forme spettrali risultano molto simili, fatto non sorprendente in considerazione della limitata estensione geografica del territorio dove è stato concentrato lo studio rispetto alle dimensioni delle zone sismogenetiche. La similitudine delle forme spettrali è messa in maggiore evidenza rappresentando gli spettri di risposta normalizzati ri-

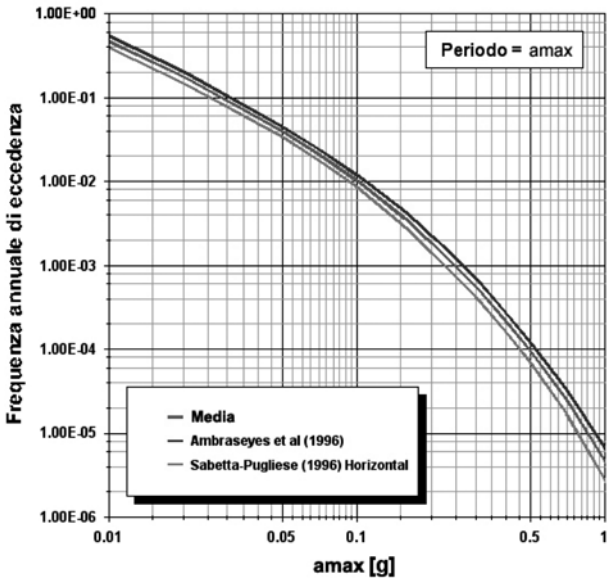

Fig. 6 – Curve di pericolosità sismica per il sito di *Fivizzano* ottenute con le leggi di attenuazione di AMBRASEYS *et al.* [1996] e di SABETTA e PUGLIESE [1996] per condizioni di sito rigido /20,5/.
Fig. 6 – Seismic hazard curves calculated at Fivizzano site using AMBRASEYS et al. *[1996] and SABETTA and PUGLIESE [1996] attenuation relations for stiff ground conditions /20,5/.*

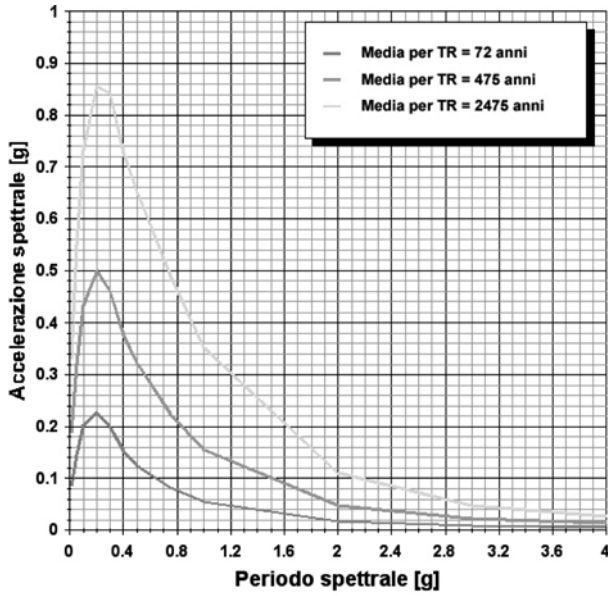

Fig. 8 – Spettri di risposta isoprobabili per i periodi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni su suolo di tipo rigido per il comune di *Fivizzano*.
Fig. 8 – Uniform hazard spectra for stiff soils at Fivizzano municipality for return periods of 72, 475 and 2475 years.

spetto al valore di a_{max} come illustrato nella figura 10.

Pertanto, a fronte di una debole variabilità spaziale osservata nelle forme degli spettri di risposta relativi al periodo di ritorno dei 475 anni, si è deciso di adottare per i territori della *Lunigiana* e *Garfagnana* e ai fini del processo di deaggregazione, un unico spettro di risposta scalato al valore locale di a_{max}.

Lo spettro probabilistico relativo al periodo di ritorno dei 475 anni (per suolo di tipo rigido) calcolato per il comune di *Fivizzano* (classificato come Zona Sismica 2) è stato confrontato in figura 11a con lo spettro di risposta elastico fornito dalla normativa sismica italiana /3/ per un suolo di categoria '*A*'. Nella

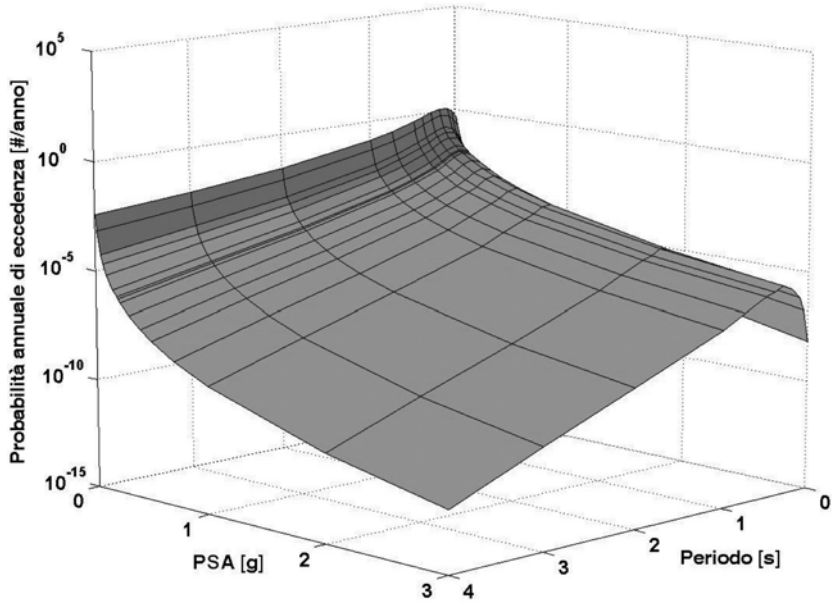

Fig. 7 – Superficie di pericolosità sismica per il sito di *Fivizzano*. Sulla superficie sono state indicate tre intersezioni con i piani relativi alle probabilità di eccedenza di 1/72, 1/475 e 1/2475 che rappresentano tre distinti spettri di risposta isoprobabili.
Fig. 7 – Seismic hazard surface calculated at Fivizzano site. Over the surface are illustrated the three intersections with the planes relative to the probability of exceedance of 1/72, 1/475 and 1/2475 which represent three different uniform hazard spectra.

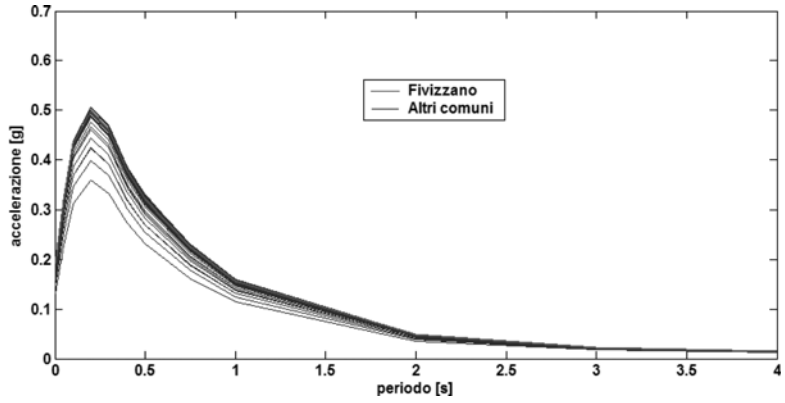

Fig. 9 – Spettri di risposta isoprobabili (componente orizzontale) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni per tutti i principali centri abitati della *Lunigiana* e della *Garfagnana* per condizioni di sito rigido.
Fig. 9 – Uniform hazard spectra for stiff soils (horizontal component) with 10% probability of exceedance in 50 years for the major urban centres of Lunigiana and Garfagnana territories.

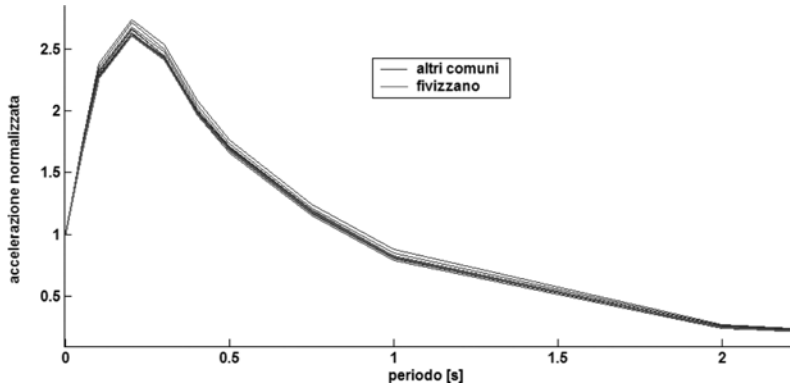

Fig. 10 – Spettri di risposta isoprobabili (componente orizzontale) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni per tutti i principali centri abitati della *Lunigiana* e della *Garfagnana* normalizzati allo stesso valore di a_{max} per condizioni di sito rigido.
Fig. 10 – Uniform hazard spectra for stiff soils (horizontal component) with 10% probability of exceedance in 50 years for the major urban centres of Lunigiana and Garfagnana territories normalized to the same value of PGA.

figura 11b il confronto è stato fatto normalizzando i due spettri allo stesso valore di a_{max} (0,25g).

Le ordinate dello spettro di normativa sono significativamente maggiori delle ordinate dello spettro probabilistico ancorando ciascuno degli spettri al proprio valore di a_{max}. Tuttavia, se gli spettri vengono ancorati allo stesso valore di a_{max} le ordinate spettrali diventano invece comparabili, soprattutto ai bassi periodi. Gli alti periodi sono comunque caratterizzati da una certa preponderanza delle ordinate spettrali della normativa rispetto a quelle dello spettro probabilistico. Ciò è dovuto al fatto, peraltro atteso, che lo spettro di normativa tende ad essere maggiormente cautelativo.

La figura 12 illustra gli spettri di risposta isoprobabili con probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni (periodo di ritorno di 72 anni) calcolati per tutti i centri abitati della *Lunigiana* e della *Garfagnana*. Anche in questo caso lo spettro di risposta di *Fivizzano* presenta accelerazioni spettrali mediamente più elevate se confrontate con quelle relative agli altri centri abitati, mentre il comune che pre-

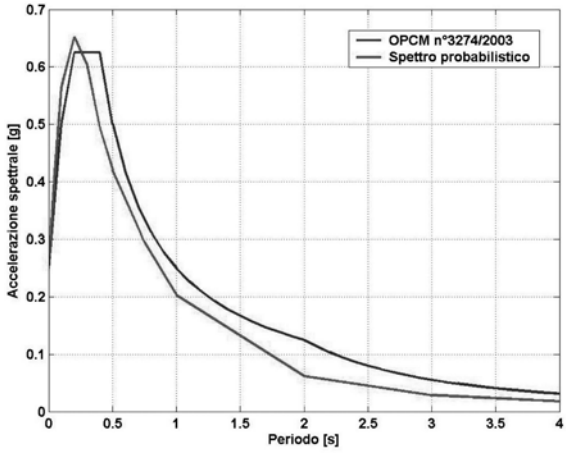

Fig. 11 – Confronto tra lo spettro isoprobabile scalato al valore di a_{max} di 0,25g calcolato per il comune di *Fivizzano* e lo spettro di risposta elastico fornito dalla normativa italiana per la zona sismica II, categoria di suolo 'A' /3/.
Fig. 11 – Comparison between the uniform hazard spectrum at Fivizzano site scaled to a PGA value of 0.25g and the elastic response spectrum prescribed by the Italian seismic code for seismic zone II and soil category 'A' /3/.

senta le ordinate spettrali minori è quello di *Fosdinovo* come si è verificato per lo spettro di risposta dei 475 anni. Dalla figura 12 si può inoltre notare come la forma spettrale nei diversi centri abitati tende ad essere ancora più simile del caso degli spettri di risposta dei 475 anni.

Sono stati infine calcolati, per tutti centri abitati della *Lunigiana* e della *Garfagnana*, gli spettri di risposta isoprobabili con probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni. I risultati del calcolo sono mostrati dalla figura 13. Si noti anche in questo caso l'invarianza della forma spettrale.

Deaggregazione degli spettri di risposta probabilistici

Per operare la selezione degli accelerogrammi naturali è necessaria una adeguata conoscenza della pericolosità sismica al sito di interesse, al fine di determinare i valori delle coppie magnitudo (M) e distanza epicentrale (d) che dominano il terremoto di scenario. Questi dati (M, d) sono ben specificati quando lo studio di pericolosità è eseguito con il metodo *deterministico*, mentre devono essere ottenuti da una analisi di *deaggregazione* /21/ se, come nel nostro caso, lo studio è condotto con il metodo *probabilistico*. La deaggregazione è un'operazione che consente di separare i diversi contributi alla pericolosità sismica individuando, per un prefissato tasso di eccedenza annuale del parametro di scuotimento considerato, quale sorgente sismica (definita dalla coppia M, d) ha la maggiore probabilità di contribuire alla pericolosità del sito di riferimento.

Considerando la scarsa variabilità spaziale degli spettri di risposta, si considera come sito di riferimento rispetto al quale eseguire la deaggregazione, il comune di *Fivizzano*. Come sopra menzionato, lo spettro probabilistico riflette i contributi di sorgenti

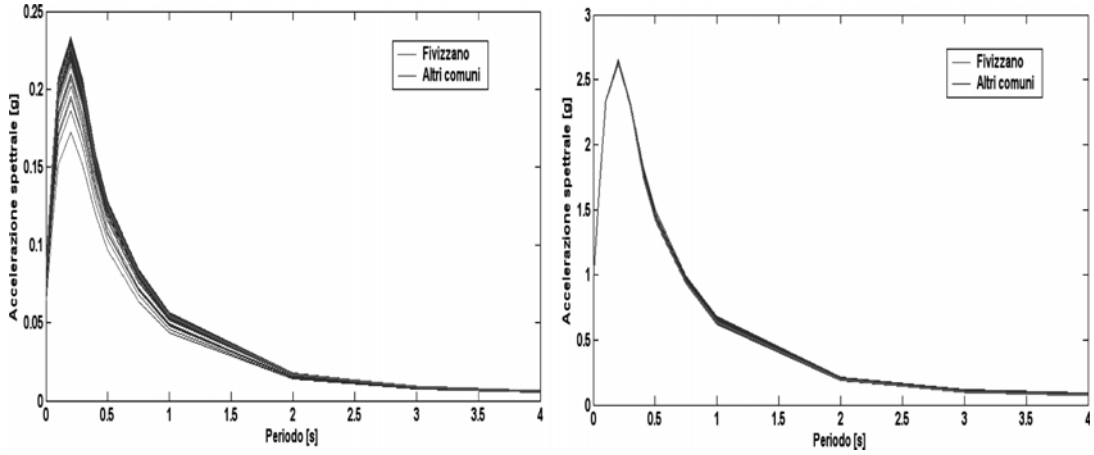

Fig. 12 – Spettri di risposta isoprobabili (componente orizzontale) con probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni per tutti i principali centri abitati della *Lunigiana* e della *Garfagnana* (a sinistra). Spettri normalizzati al valore di a_{max} (a destra).
Fig. 12 – Uniform hazard spectra (horizontal component) with 50% probability of exceedance in 50 years for the major urban centres of Lunigiana and Garfagnana territories (left). Spectra scaled to the corresponding value of PGA (right).

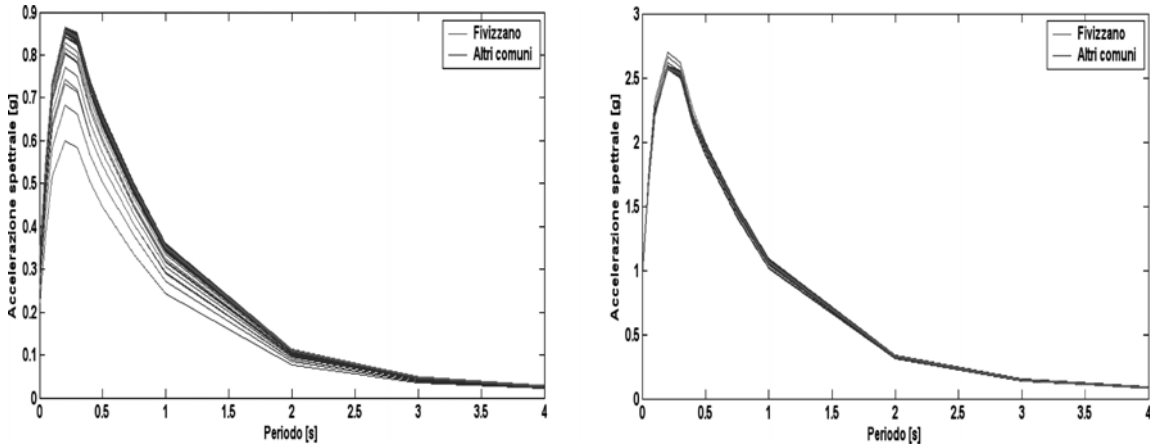

Fig. 13 – Spettri di risposta isoprobabili (componente orizzontale) con probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni per tutti i principali centri abitati della *Lunigiana* e della *Garfagnana* (a sinistra). Spettri normalizzati al valore di a_{max} (a destra).
Fig. 13 – Uniform hazard spectra (horizontal component) with 2% probability of exceedance in 50 years for the major urban centres of Lunigiana and Garfagnana territories (left). Spectra scaled to the corresponding value of PGA (right).

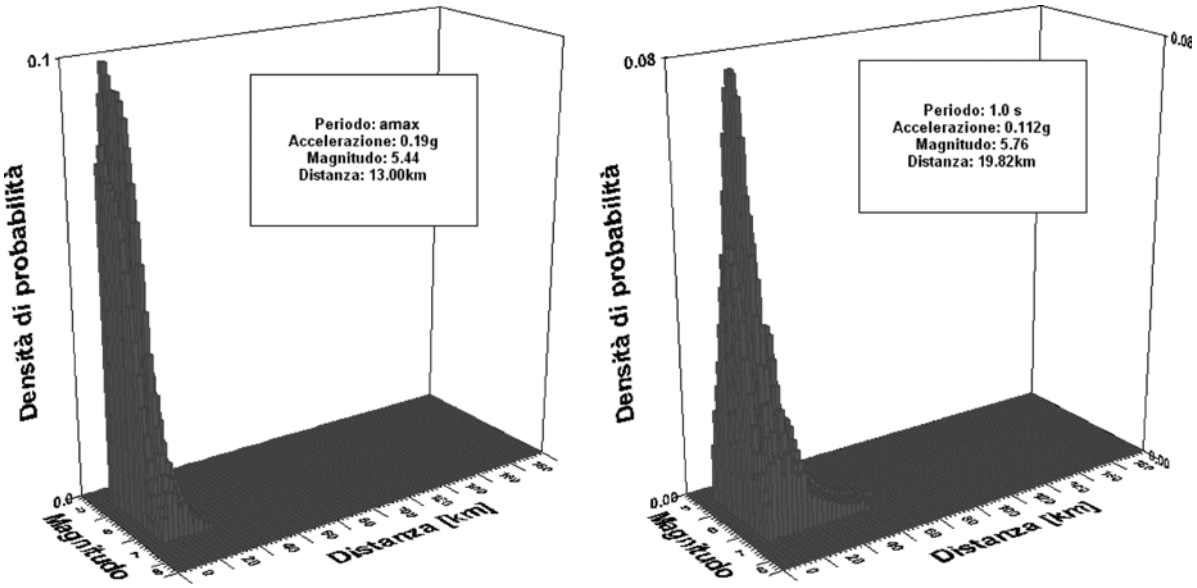

Fig. 14 – Risultati deaggregazione al sito di *Fivizzano* per a_{max} (a sinistra) e per l'accelerazione spettrale a T = 1 sec (a destra). Periodo di ritorno dello scenario di riferimento: 475 anni.
Fig. 14 – Results of deaggregation at Fivizzano site for PGA (left) and for spectral acceleration at T=1 sec (right). Return period for the reference scenario: 475 years.

sismiche caratterizzate da diversi valori delle coppie (M, d). Per *Fivizzano* la deaggregazione su a_{max} per il periodo di ritorno di 475 anni fornisce lo scenario $M=5,4$ e $d=13$ *km* il quale è adeguato a riprodurre bene la porzione dello spettro di risposta a basso periodo (vedi Fig. 8). Per periodi più lunghi (per esempio T=1 sec) la deaggregazione fornisce uno scenario differente ($M=5,8$ $d=20km$). Nella figura 14 sono riportati i risultati della deaggregazione condotta a *Fivizzano* per valori dell'accelerazione spettrale corrispondenti a T=0 (a_{max}) e a T=1sec per un periodo di ritorno pari a 475 anni.

In generale pertanto, al fine di identificare le coppie (M, d) più importanti che contribuiscono alla definizione dello spettro di risposta probabilistico, è necessario eseguire la deaggregazione per valori dell'accelerazione spettrale corrispondenti ad una gamma sufficientemente ampia di periodi. L'ampiezza della gamma è, in ultima analisi, funzione della forma dello spettro di risposta e quindi dalle caratteristiche sismogenetiche e di attenuazione regionali.

Criteri di selezione degli accelerogrammi naturali: vincoli sismogenetici, caratteristiche geologiche del sito e spettro-compatibilità

I risultati ottenuti dalle analisi di deaggregazione condotte per il sito di *Fivizzano* per valori delle accelerazioni spettrali corrispondenti a diversi valori del periodo strutturale T per i tempi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni rivelano scenari deterministici moderatamente eterogenei e quindi caratterizzati da una variabilità delle coppie (M, d) limitata. Pertanto alla luce di questi risultati si è optato di effettuare la selezione degli accelerogrammi naturali utilizzando i parametri sismogenetici (M, d) ottenuti dalla deaggregazione su a_{max} imponendo su di essi una prefissata tolleranza. Inoltre, ai fini del soddisfacimento del requisito della spettro-compatibilità è stata anche imposta una tolleranza sullo scarto tra lo spettro di risposta medio calcolato dagli accelerogrammi selezionati e quello ottenuto dall'analisi probabilistica.

Nel processo di selezione è stata anche considerata la qualità delle registrazioni (eventuali troncamenti all'inizio o alla fine del segnale, durata della porzione pseudo-stazionaria, ecc.). Tuttavia il primo criterio impiegato nella selezione degli accelerogrammi è stato quello relativo alle caratteristiche geologiche del sito di installazione della stazione accelerometrica in quanto sono stati selezionati solo accelerogrammi registrati da stazioni poste su sito roccioso affiorante e quindi assunti non influenzati da eventuali fenomeni di amplificazione sismica locale.

Il soddisfacimento della compatibilità degli accelerogrammi selezionati con i parametri sismogenetici di magnitudo e distanza epicentrale desunti dalle analisi di deaggregazione è un requisito fondamentale per la definizione dell'azione sismica di progetto. Tuttavia l'effetto prodotto dalla magnitudo sulle forme spettrali è maggiore di quello determinato dalla distanza epicentrale, pertanto nella selezione degli accelerogrammi naturali si sono adottate tolleranze minori per la magnitudo e mag-

giori per la distanza. Quest'ultima ha un effetto particolarmente rilevante sulle ampiezze ma considerata l'elevata variabilità del picco di accelerazione anche a parità di M ed d, è consuetudine operare una scalatura lineare degli accelerogrammi. L'imposizione di una soglia massima a tale fattore di scala può essere assunto come un ulteriore criterio per la selezione delle registrazioni. I meccanismi focali o di sorgente a causa delle incertezze derivanti dalla definizione del cinematismo di rottura nel territorio oggetto di studio /23/ e dagli effetti che essi hanno sulle caratteristiche dello scuotimento, sono stati considerati secondari in questo studio nella selezione degli accelerogrammi naturali.

Il numero di registrazioni disponibili varia in funzione dell'ampiezza delle finestre di ricerca impiegate. L'adozione di tolleranze basse (ad esempio 0,2 unità sulla magnitudo) porterebbe ad individuare un numero esiguo di registrazioni di adeguata qualità, anche attingendo a numerose banche dati accelerometriche, e risulterebbe molto difficile selezionare gruppo di accelerogrammi spettro-compatibili. Se invece si impongono tolleranze meno restrittive sui parametri sismogenetici M ed d, il numero di registrazioni disponibili diventa considerevole ed aumentano le possibilità di individuare un insieme di segnali che sia in media spettro compatibile. Dall'insieme complessivo degli accelerogrammi selezionati dalle banche dati accelerometriche sono state scelte solo le registrazioni di migliore qualità (per es. sono state escluse le registrazioni in cui una porzione significativa della parte iniziale o finale del segnale fosse troncata) individuando un gruppo di 62 terne di segnali.

Il numero di possibili combinazioni di 62 accelerogrammi presi a gruppi di 7 è dato dal coefficiente binomiale $C_{62,7}$ ed è superiore a $5 \cdot 10^8$. La selezione di un gruppo di 7 accelerogrammi spettro-compatibili (in media) allo spettro probabilistico comporta l'implementazione dei seguenti passi:

1 selezione di 7 accelerogrammi di primo tentativo e scalatura al valore di a_{max} desunto dall'analisi probabilistica di pericolosità sismica per il periodo di ritorno considerato;
2 calcolo per ciascuno dei 7 accelerogrammi dello spettro di risposta in accelerazione e determinazione dello spettro di risposta medio;
3 calcolo dello scarto esistente tra le ordinate dello spettro di risposta medio e quelle dello spettro obiettivo (probabilistico) all'interno di un prefissato campo di periodi;
4 esecuzione di test per la verifica che lo scarto esistente tra lo spettro medio e lo spettro obiettivo sia inferiore (o uguale) allo scarto ammissibile all'interno di un prefissato campo di periodi;
5 individuazione, nel caso il test al punto precedente non sia superato, di quegli accelerogrammi tra i 7 selezionati al punto 1, ritenuti maggiormente responsabili dello scarto tra lo spettro medio e lo spettro obiettivo e sostituzione con altri accelerogrammi appartenenti al gruppo delle 62 terne di segnali sopra menzionati;
6 ripetizione della procedura dal punto 2 al punto 4 fino a convergenza o comunque fino al raggiungimento di un adattamento tra i due spettri soddisfacente nell'intervallo di periodi considerato.

Tale procedimento è particolarmente oneroso se eseguito manualmente e in ogni caso non garantisce la convergenza e la possibilità di individuare le migliori combinazioni di segnali. È stata pertanto messa a punto una procedura automatica di selezione ed elaborazione delle registrazioni basata sul metodo *Monte Carlo* che esplora automaticamente lo spazio delle combinazioni di accelerogrammi individuando le migliori fra tutte quelle possibili. L'algoritmo genera in modo sequenziale un numero molto elevato (superiore al milione) di combinazioni. Per ciascuna di esse viene calcolato lo spettro di risposta medio nonché il suo adattamento allo spettro obiettivo, quest'ultimo valutato mediante lo scarto quadratico medio e il massimo scarto in difetto. Vengono quindi memorizzate le combinazioni migliori di accelerogrammi (e cioè quelle che rispettano determinate soglie di adattamento) tra le quali vengono scelti visualmente i gruppi ritenuti migliori.

Il metodo di calcolo messo a punto ha anche consentito di valutare sull'insieme di accelerogrammi che soddisfano i vincoli sismogenetici di magnitudo e distanza epicentrale, l'effetto prodotto dalle variazioni delle tolleranze sui parametri M ed d sulla bontà dell'adattamento dello spettro medio sullo spettro obiettivo. Si sono infatti valutate le caratteristiche della distribuzione statistica dello scarto tra lo spettro medio e quello obiettivo dei gruppi di accelerogrammi selezionati con tolleranze su M ed d variabili.

A titolo di esempio si riportano i risultati della pre-elaborazione automatica eseguita su un gruppo di accelerogrammi contenente eventi selezionati impiegando finestre di ricerca via via più ampie. Sono stati inclusi eventi che, tra le diverse stime di magnitudo M_b, M_W, M_S, M_L, avessero un valore minore o uguale a 6,0. Quindi sono stati generati $5 \cdot 10^6$ combinazioni di gruppi, calcolando per ciascuno di essi i parametri di adattamento precedentemente descritti. La figura 15 illustra la distribuzione dello scarto massimo in difetto (il parametro impiegato dall'Eurocodice 8 per definire la spettro-compatibilità) risultante dall'analisi avendo considerato come spettro obiettivo, lo spettro probabilistico di *Fivizzano* avente periodo di ritorno di 475 anni. La distribuzione ottenuta è asimmetrica, con *moda* superiore al 60% e una coda che si estende verso valori inferiori al 15%.

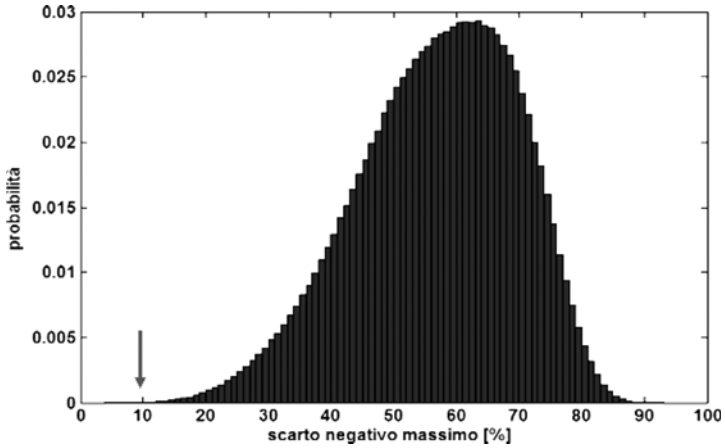

Fig. 15 – Distribuzione di probabilità dello scarto negativo massimo percentuale tra lo spettro di risposta medio e lo spettro probabilistico per il sito di *Fivizzano* con periodo di ritorno di 475 anni. Risultato ottenuto dall'analisi dell'adattamento di $5 \cdot 10^6$ combinazioni di gruppi di 7 accelerogrammi generati in modo casuale da un insieme di 62 terne di segnali selezionate da banche dati accelerometriche.

Fig. 15 – Probability distribution of the maximum negative misfit (percentage wise) between the mean response spectrum and the probabilistic spectrum at Fivizzano site for a return period of 475 years. The result was obtained from a fitting process of $5 \cdot 10^6$ combinations of randomly-generated groups of 7 accelerograms from a set of 62 triplets of records selected from strong motion databases.

Accelerogrammi naturali selezionati per il terremoto di progetto con probabilità di eccedenza del 10%, 50% e 2% in 50 anni

Per le verifiche geotecnico-sismiche e strutturali al terremoto di progetto avente probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, è necessario riferirsi allo spettro di risposta probabilistico dei 475 anni e selezionare con i criteri esposti nella sezione precedente il *miglior gruppo* di 7 accelerogrammi reali che minimizza lo scarto tra il corrispondente spettro di risposta medio e lo spettro probabilistico.

In figura 16 sono riportati gli accelerogrammi selezionati (componente orizzontale) per il terremoto di progetto avente probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni mentre in figura 17 è illustrato il confronto tra lo spettro medio dei 7 accelerogrammi e lo spettro probabilistico per il sito di *Fivizzano* riferito alla stessa probabilità di eccedenza.

Il gruppo di accelerogrammi reali selezionati per riprodurre lo spettro di risposta probabilistico a pericolosità uniforme con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni contiene la registrazione di un evento relativamente forte e distante ($M = 6{,}3$, $d = 21$ *km*) poiché le accelerazioni spettrali di lungo periodo dello spettro di risposta probabilistico sono governate da sorgenti sismiche lontane di elevata magnitudo /21/.

In figura 18 sono illustrati gli spettri di risposta dei singoli accelerogrammi mostrati in figura 16 sovrapposti allo spettro medio. Tutti gli spettri sono stati ancorati allo stesso valore di a_{max} desunto dall'analisi probabilistica di pericolosità sismica per il periodo di ritorno di 475 anni. Dalla figura si possono notare i diversi contributi che i singoli accelerogrammi forniscono in termini di accelerazioni spettrali al variare del periodo strutturale senza peraltro sovrastimare troppo le ordinate dello spettro probabilistico e quindi evitando una domanda sismica eccessiva a terreni e strutture nelle analisi dinamiche.

Con una procedura analoga a quella svolta per la definizione dell'azione sismica di progetto dei 475 anni è stata eseguita la deaggregazione dello spettro probabilistico per i periodi di ritorno di 72 e 2475 per il sito di *Fivizzano* (vedi Fig. 8), anni che corrispondono a terremoti di scenario aventi probabilità di eccedenza rispettivamente del 50% e del 2% in 50 anni. Dai risultati ottenuti e applicando la metodologia di selezione illustrata nella sezione precedente, è stato possibile individuare due gruppi "*ottimi*" di 7 accelerogrammi soddisfacenti i vincoli di spettro-compatibilità imposti dall'Eurocodice /11,12/. Nelle figure 19 e 20 sono illustrati i due gruppi di 7 accelerogrammi reali (componente orizzontale) selezionati per i periodi di ritorno di 72 e 2475 anni mentre in figura 21 è riportato il confronto tra lo spettro di risposta medio e i corrispondenti spettri probabilistici.

La figura 19 evidenzia che per riprodurre adeguatamente lo spettro probabilistico con periodo di ritorno di 72 anni è necessario includere accelerogrammi riferiti ad eventi di magnitudo non superiore a 5,7. Ciò è coerente con il fatto che la forma degli spettri probabilistici aventi probabilità di eccedenza elevata (in questo caso 50% in 50 anni) è controllata da sorgenti sismiche relativamente vicine e di moderata magnitudo /21/. Per quel che concerne invece gli accelerogrammi relativi al periodo di ritorno di 2475 anni (vedi

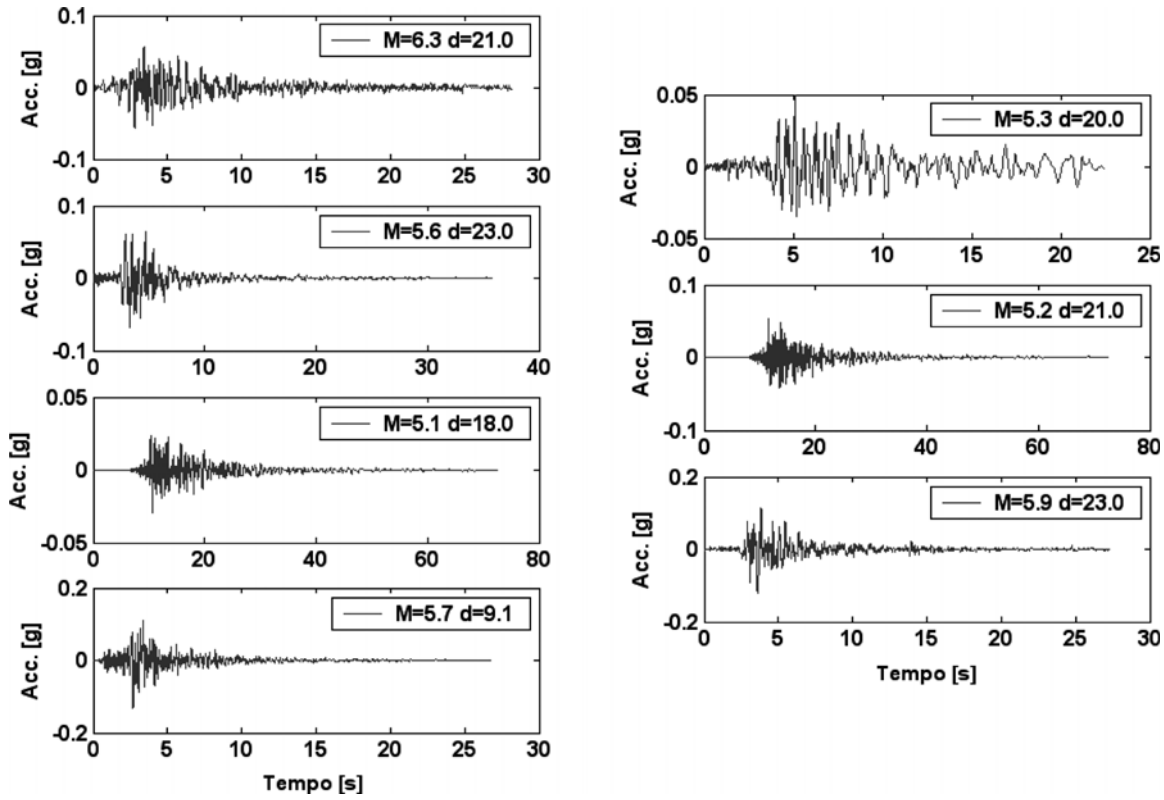

Fig. 16 – Gruppo di 7 accelerogrammi (componente orizzontale) naturali selezionati con il criterio di riprodurre al meglio lo spettro di risposta probabilistico con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (PR = 475 anni) per il sito di *Fivizzano*.
Fig. 16 – Group of 7 real accelerograms (horizontal component) selected with the criterion of best reproducing the probabilistic response spectrum with 10% probability of exceedance in 50 years (return period of 475 years) for Fivizzano site.

Fig. 20), la selezione del *miglior gruppo* di 7 accelerogrammi non è stata agevole. La figura 21 (a destra) mostra per il sito di *Fivizzano* e in corrispondenza del periodo strutturale T=1 sec uno scarto negativo massimo rispetto allo spettro probabilistico del 12,03%. Tale scarto, che supera del 2,03% la soglia imposta dalla normativa europea /11/, può essere ridotto al di sotto della soglia del 10% mediante scalatura degli accelerogrammi di figura 20 al valore a_{max} di ancoraggio raccomandato nel prossimo paragrafo per il Comune di *Fivizzano* per il periodo di ritorno di 2475 anni.

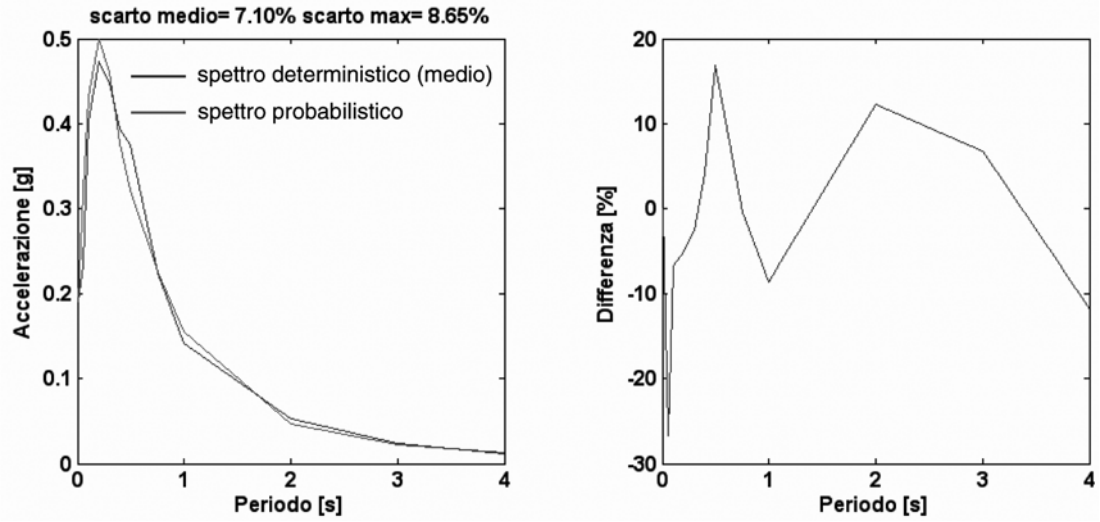

Fig. 17 – Confronto tra lo spettro di risposta medio corrispondente al gruppo di 7 accelerogrammi naturali mostrati in fig. 16 e lo spettro di risposta probabilistico con periodo di ritorno di 475 anni per il sito di *Fivizzano*.
Fig. 17 – Comparison at Fivizzano site between the mean response spectrum corresponding to the group of 7 real accelerograms shown in Fig. 16 and the probabilistic spectrum with 475 year return period.

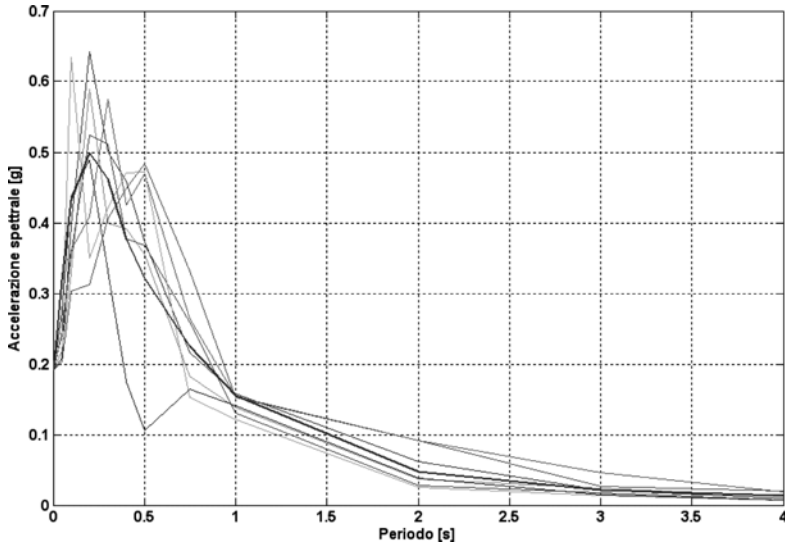

Fig. 18 – Spettri di risposta degli accelerogrammi naturali di fig. 16 ancorati allo stesso valore di a_{max} desunto dall'analisi probabilistica di pericolosità sismica per il periodo di ritorno di 475 anni. Sovrapposizione dei grafici con lo spettro di risposta medio.
Fig. 18 – Response spectra of real accelerograms of Fig. 16 anchored to the same value of PGA computed from probabilistic seismic hazard study for 475 return period. Overlapping of the graphs with the mean response spectrum.

Definizione dei valori a_{max} di ancoraggio degli spettri di risposta per i comuni della Lunigiana e della Garfagnana per i periodi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni

La normativa sismica italiana /1,2,3/ stabiliva che il valore di a_{max} determinato attraverso studi specifici non può differire di più del 20% rispetto al valore di ancoraggio fornito dalla normativa stessa per le zone sismiche I e II. Per le altre zone sismiche le differenze non possono essere superiori a 0,05g. I valori a_{max} di ancoraggio prescritti dalla normativa italiana per la zona II e per i periodi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni sono rispettivamente di 0,10g, 0,25g, 0,375g.

Alla luce dei risultati ottenuti nello studio probabilistico di pericolosità sismica ed illustrati nei

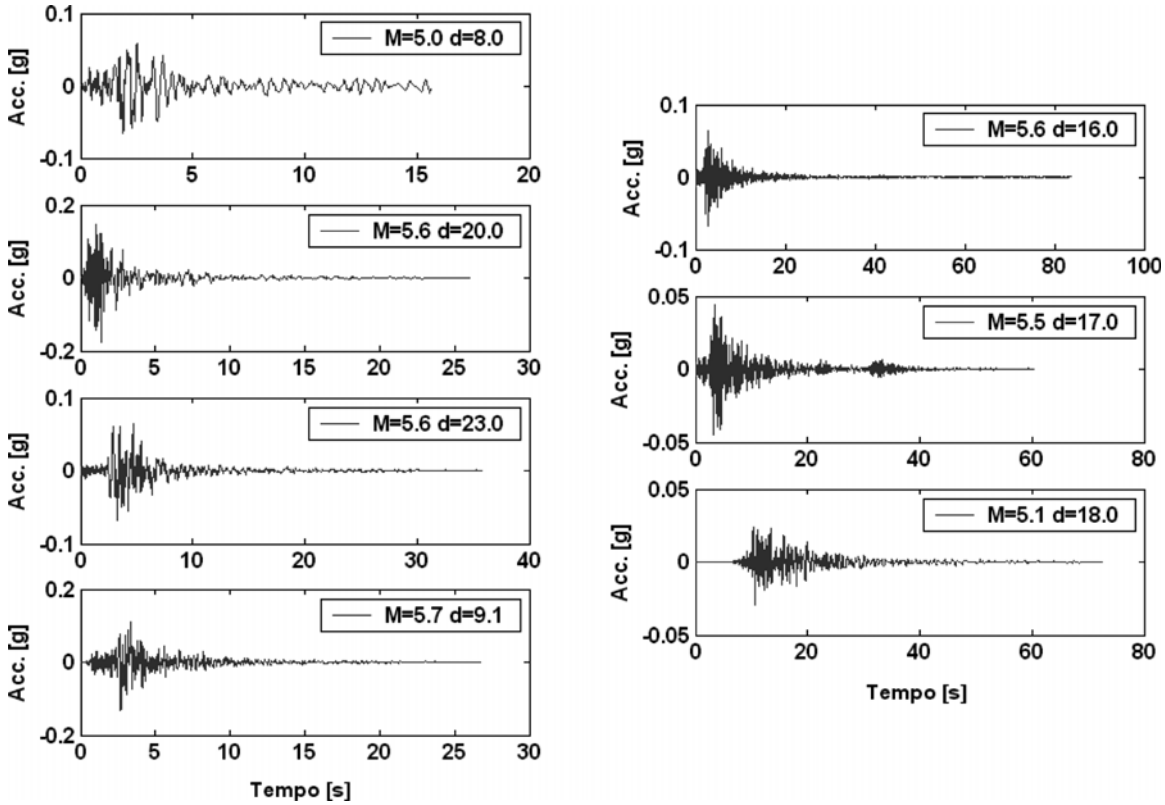

Fig. 19 – Gruppo di 7 accelerogrammi (componente orizzontale) naturali selezionati con il criterio di riprodurre al meglio lo spettro di risposta probabilistico con probabilità di eccedenza del 50% in 50 anni (PR = 72 anni) per il sito di *Fivizzano*.
Fig. 19 – Group of 7 real accelerograms (horizontal component) selected with the criterion of best reproducing the probabilistic response spectrum with 50% probability of exceedance in 50 years (return period of 72 years) for Fivizzano site.

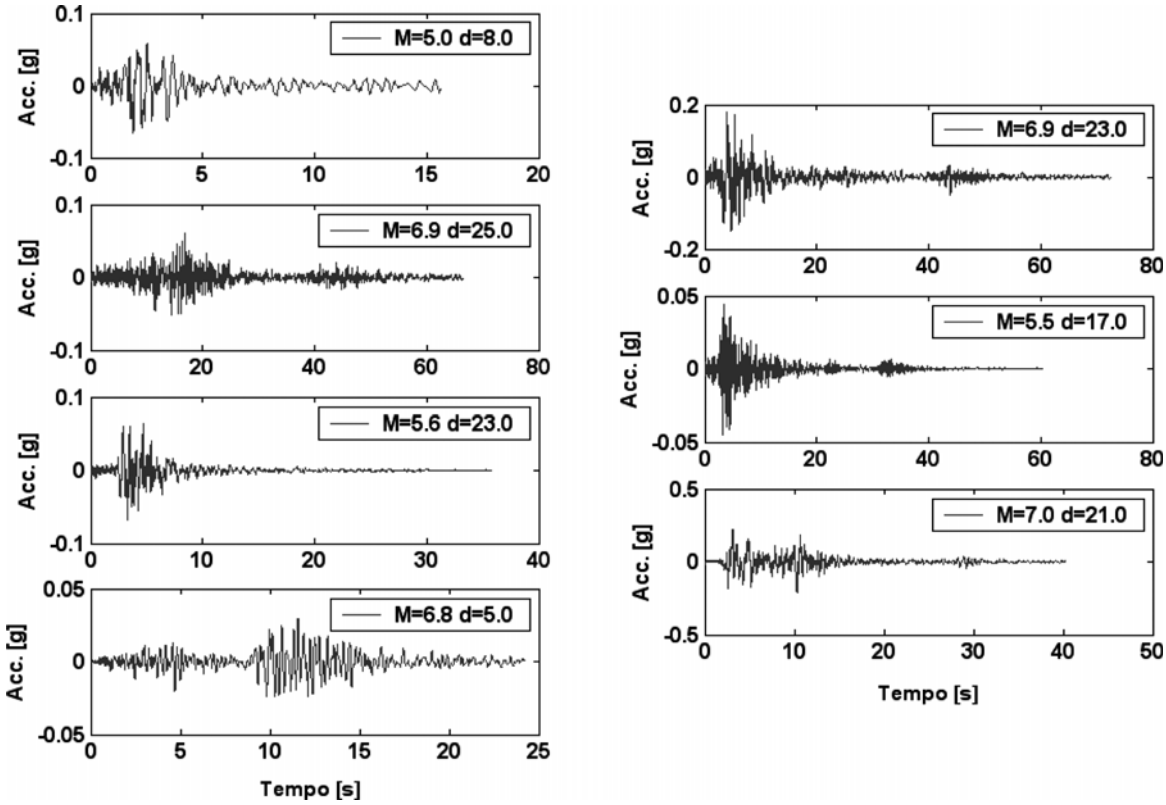

Fig. 20 – Gruppo di 7 accelerogrammi (componente orizzontale) naturali selezionati con il criterio di riprodurre al meglio lo spettro di risposta probabilistico con probabilità di eccedenza del 2% in 50 anni (PR = 2475 anni) per il sito di *Fivizzano*.
Fig. 20 – Group of 7 real accelerograms (horizontal component) selected with the criterion of best reproducing the probabilistic response spectrum with 2% probability of exceedance in 50 years (return period of 2475 years) for Fivizzano site.

paragrafi precedenti, si raccomanda pertanto di adottare per il periodo di ritorno di 475 anni, un valore di a_{max} pari a 0,20g per tutti quei comuni della *Lunigiana* e della *Garfagnana* il cui valore di a_{max} predetto dal presente studio è strettamente inferiore a 0,20g, mentre per tutti gli altri comuni si propone invece l'adozione di un valore di a_{max} pari a 0,25 g. Per quel che concerne l'azione sismica di

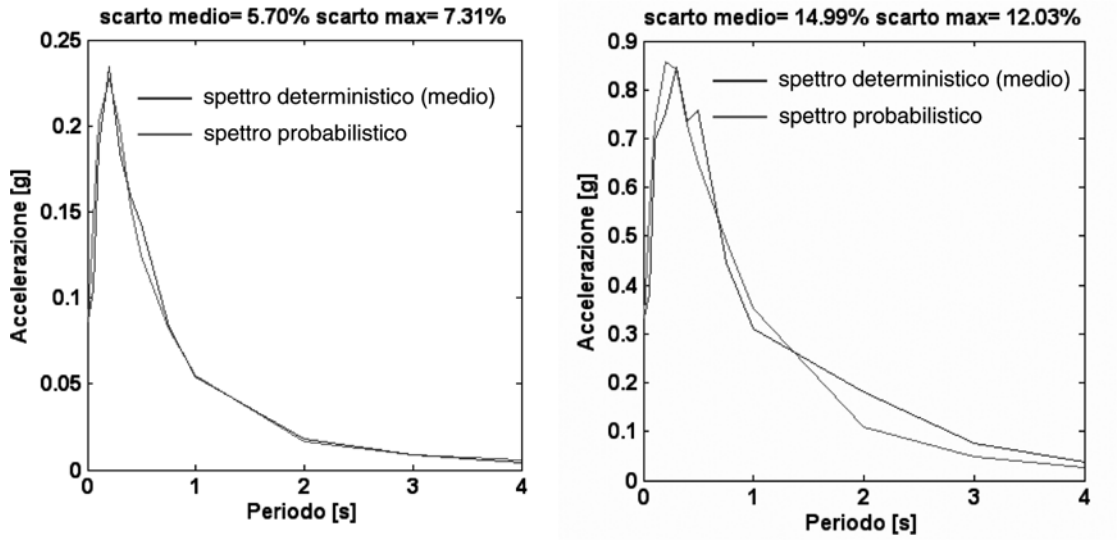

Fig. 21 – Confronto tra lo spettro di risposta medio corrispondente al gruppo di 7 accelerogrammi naturali mostrati in fig. 19 (a sinistra) e in fig. 20 (a destra) e i relativi spettri di risposta probabilistici riferiti ai periodi di ritorno di 72 anni (a sinistra) e 2475 anni (a destra) per il sito di *Fivizzano*.
Fig. 21 – Comparison between the mean response spectrum corresponding to the group of 7 real accelerograms shown in Fig. 19 (left) and in Fig. 20 (right) and the related probabilistic spectra referred to 72 (left) and 2475 (right) year return period for Fivizzano site.

Tab. I – Valori del parametro di scuotimento a_{max} (g) raccomandati nel presente studio per i comuni della *Lunigiana* per i periodi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni.
Tab. I – Values of ground motion parameter a_{max} (g) (PGA) recommended by the present study for the municipalities of Lunigiana territory for return periods of 72, 475 and 2475 years.

	LUNIGIANA		
Comune	a_{max} **(g)**		
	72 anni	**475 anni**	**2475 anni**
Aulla	0.10	0.20	0.35
Bagnone	0.10	0.25	0.35
Casola in L.na	0.10	0.25	0.35
Comano	0.10	0.25	0.35
Filattiera	0.10	0.25	0.35
Fivizzano	0.10	0.25	0.35
Fosdinovo	0.10	0.20	0.35
Licciana Nardi	0.10	0.25	0.35
Mulazzo	0.10	0.20	0.35
Podenzana	0.10	0.20	0.35
Pontremoli	0.10	0.25	0.35
Tresana	0.10	0.20	0.35
Villafranca in L.na	0.10	0.25	0.35
Zeri	0.10	0.20	0.35

Tab. II – Valori del parametro di scuotimento a_{max} (g) raccomandati nel presente studio per i comuni della *Garfagnana* per i periodi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni.
Tab. II – Values of ground motion parameter a_{max} (g) (PGA) recommended by the present study for the municipalities of Garfagnana territory for return periods of 72, 475 and 2475 years.

GARFAGNANA			
Comune	a_{max} **(g)**		
	72 anni	**475 anni**	**2475 anni**
Bagni di Lucca	0 .10	0.25	0.35
Barga	0.10	0.25	0.35
Camporgiano	0.10	0.25	0.35
Castelnuovo G.na	0.10	0.25	0.35
Castiglione G.na	0.10	0.25	0.35
Careggine	0.10	0.20	0.35
Coreglia Antelminelli	0.10	0.25	0.35
Fabbriche di Vallico	0.10	0.20	0.35
Fosciandora	0.10	0.25	0.35
Gallicano	0.10	0.20	0.35
Giuncugnano	0.10	0.25	0.35
Molazzana	0.10	0.20	0.35
Minacciano	0.10	0.25	0.35
Piazza al Serchio	0.10	0.25	0.35
Pieve Fosciana	0.10	0.25	0.35
S.Romano G.na	0.10	0.25	0.35
Sillano	0.10	0.25	0.35
Vagli Sotto	0.10	0.20	0.35
Vergemoli	0.10	0.20	0.35
Villa Collemandina	0.10	0.25	0.35

progetto per i periodi di ritorno dei 72 e dei 2475 anni si raccomanda invece di adottare un valore costante di a_{max} pari rispettivamente a 0,10g e 0,35g valido per tutti i comuni della *Lunigiana* e della *Garfagnana*. Nelle tabelle I e II sono riportati per ogni comune di questi territori i valori di a_{max} raccomandati in questo studio per i tre periodi di ritorno sopra menzionati.

Caratteristiche delle registrazioni selezionate

I tre gruppi di 7 accelerogrammi che si raccomanda di adottare come input sismico nei territori della *Lunigiana* e della *Garfagnana* per i periodi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni soddisfano, in media, ai requisiti di spettro-compatibilità prescritti dalla normativa sismica europea /11/ prendendo a riferimento

Tab. III – Caratteristiche sismologiche dei 7 accelerogrammi raccomandati nel presente studio per i comuni della *Lunigiana* e della *Garfagnana* per il periodo di ritorno di 72 anni.
Tab. III – Seismological features of the 7 accelerograms recommended by the present study for the municipalities of Lunigiana and Garfagnana territories for the return period of 72 year.

Cod.	Nome	Dist. [km]	Data	M_b	M_L	M_S	M_W
268Y	El Asnam - Nord (Algeria)	8	22/10/1980	5.0	4.5	4.26	
359Y	Umbria	16	29/04/1984	5.1	5.4	5.38	5.6
363X	Umbria	20	29/04/1984	5.1	5.4	5.38	5.6
385X	Lazio Abruzzo	17	11/05/1984	5.2	5.1	5.27	5.5
642	Umbro-Marchigiano	23	14/10/1997	5.3	5.5	5.60	5.6
855X	Umbro-Marchigiano	18	05/04/1998	4.7	5.1	4.40	
	Coyote Lake (USA)	9	08/06/1979		5.7	5.60	5.7

Tab. IV – Caratteristiche sismologiche dei 7 accelerogrammi raccomandati nel presente studio per i comuni della *Lunigiana* e della *Garfagnana* per il periodo di ritorno di 475 anni.
Tab. IV – Seismological features of the 7 accelerograms recommended by the present study for the municipalities of Lunigiana and Garfagnana territories for the return period of 475 year.

Cod.	Nome	Dist. [km]	Data	M_b	M_L	M_S	M_W
232X	Montenegro (Serbia)	21	24/05/1979	5.7	6.2	6.34	
280Y	El Asnam - Nord (Algeria)	20	30/10/1980	5.3	4.6	4.71	
642Y	Umbro-Marchigiano	23	14/10/1997	5.3	5.5	5.60	5.6
854X	Umbro-Marchigiano	21	03/04/1998	5.1	5.2	4.80	5.1
855X	Umbro-Marchigiano	18	05/04/1998	4.7	5.1	4.40	
1314X	Atene (Grecia)	23	07/09/1999	5.8		5.60	5.9
	Coyote Lake (USA)	9	08/06/1979		5.7	5.60	5.70

Tab. V – Caratteristiche sismologiche dei 7 accelerogrammi raccomandati nel presente studio per i comuni della *Lunigiana* e della *Garfagnana* per il periodo di ritorno di 2475 anni.
Tab. V – Seismological features of the 7 accelerograms recommended by the present study for the municipalities of Lunigiana and Garfagnana territories for the return period of 2475 year.

Cod.	Nome	Dist. [km]	Data	M_b	M_L	M_S	M_W
198Y	Montenegro (Serbia)	21	15/04/1979	6.1		7.04	
268Y	El Asnam - Nord (Algeria)	8	22/10/1980	5.0	4.5	4.26	
287Y	Campano Lucano	23	23/11/1980	6.0	6.6	6.87	6.5
292X	Campano Lucano	25	23/11/1980	6.0	6.6	6.87	6.5
385X	Lazio Abruzzo	17	11/05/1984	5.2	5.1	5.27	5.5
471X	Vrancea (Romania)	5	30/05/1990	6.4	6.6	6.78	
642	Umbro-Marchigiano	23	14/10/1997	5.3	5.5	5.60	5.6

come spettro obiettivo lo spettro probabilistico al sito di *Fivizzano* per i corrispondenti periodi di ritorno (vedi Fig. 8). L'applicazione della stessa azione sismica (scalata al valore locale di a_{max}) a tutti i comuni della *Lunigiana* e della *Garfagnana* è giustificata dalla sostanziale invarianza della forma spettrale rilevata in questi territori da questo studio. Prima di essere utilizzati, i tre gruppi di 7 accelerogrammi e i relativi spettri di risposta dovranno essere preventivamente scalati al valore locale di a_{max} per il periodo di ritorno di interesse. Nelle tabelle III, IV e V sono riportate le caratteristiche sismologiche più importanti dei tre gruppi di accelerogrammi.

Applicazione dei risultati alla valutazione della risposta sismica locale

Al fine di valutare l'effetto della variabilità dell'input sulle analisi di risposta sismica locale, i 7 accelerogrammi raccomandati per il periodo di ritorno dei 475 anni sono stati utilizzati in una simulazione di risposta sismica locale 1D eseguita con il programma SHAKE91 /25,26/. Il profilo adottato per l'andamento della velocità delle onde trasversali V_S con la profondità è illustrato in figura 22. I segnali di ingresso adottati corrispondono come appena menzionato agli accelerogrammi illustrati in

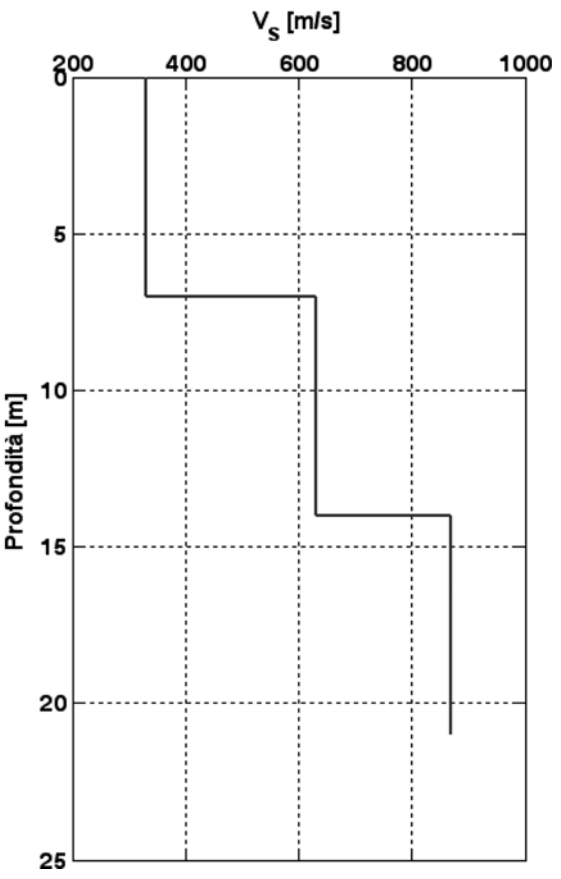

Fig. 22 – Profilo di V_S adottato per la simulazione della risposta sismica locale 1D eseguita utilizzando il gruppo di 7 accelerogrammi corrispondenti a PR=475 anni (vedi Fig. 16).
Fig. 22 – V_S profile adopted for the simulation of 1D local site response analysis performed using the group of 7 accelerograms corresponding to 475 year return period (see Fig. 16).

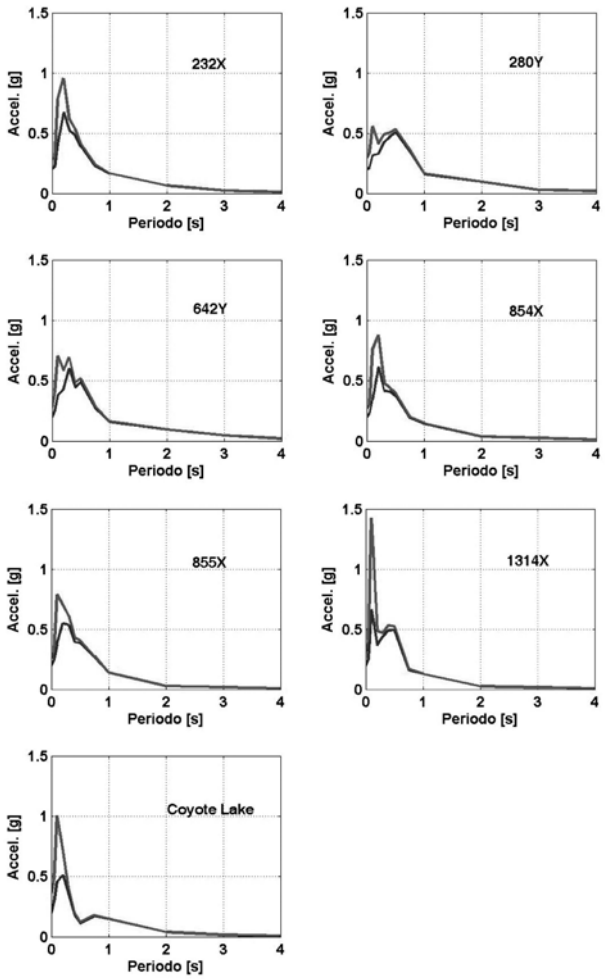

Fig. 23 – Confronto tra gli spettri di risposta ottenuti dai 7 accelerogrammi di figura 16 (registrati su roccia affiorante) e i corrispondenti spettri calcolati con gli accelerogrammi modificati dagli effetti di amplificazione stratigrafica prodotti dal profilo V_S di fig. 22.
Fig. 23 – Comparison between the response spectra obtained from the 7 accelerograms of figure 16 (recorded on outcropping rock) and the corresponding spectra computed using the accelerograms modified by the effects of stratigraphic amplification produced by the V_S profile of Fig. 22.

figura 16. Essi sono stati tutti scalati allo stesso valore di a_{max} pari a 0,20g. La figura 23 illustra il confronto tra gli spettri di risposta degli accelerogrammi in ingresso (registrati su roccia affiorante) e quelli modificati dall'effetto di filtro prodotto dalla coltre di terreno soffice sovrapposta al substrato. Il confronto tra i valori *medi* delle ordinate spettrali è illustrato in figura 24.

Considerazioni conclusive

Nel presente studio è stato definito l'input sismico da impiegare per le analisi di risposta sismica locale e per le verifiche geotecnico sismiche nei territori della *Lunigiana* e della *Garfagnana* in Toscana.

Tra le varie opzioni si è scelto di utilizzare accelerogrammi reali selezionati da banche dati accelerometriche *strong-motion* accreditate a livello internazionale. Essi sono da preferire agli accelerogrammi artificiali e sintetici soprattutto nelle applicazioni di geotecnica sismica in quanto quelli "naturali" rappresentano in modo più realistico le caratteristiche dello scuotimento atteso sia per quel che concerne il contenuto energetico e la durata in relazione ai parametri sismogenetici, sia per la corretta correlazione temporale tra le componenti del moto. La superiorità degli accelerogrammi naturali rispetto a quelli artificiali nella soluzione di problemi di geotecnica sismica è d'altra parte richiamata anche dalla normativa tecnica e dalla letteratura sismica internazionale /11,12,27,28/.

Sono stati selezionati gruppi di accelerogrammi reali che, oltre a riflettere le caratteristiche dello scuotimento atteso, soddisfino in media, i requisiti

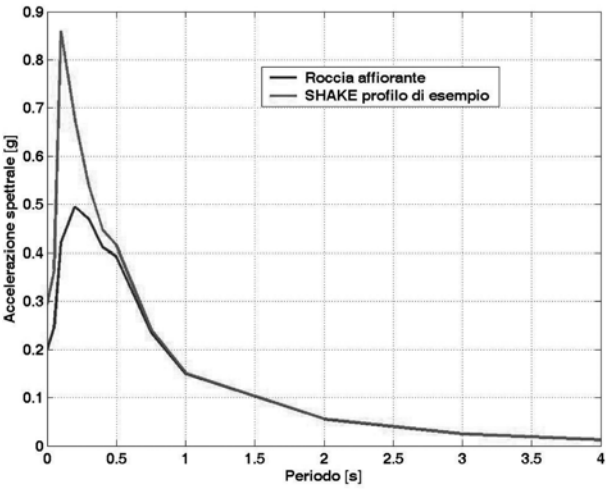

Fig. 24 – Confronto tra gli spettri di risposta *medi* ottenuti dai 7 accelerogrammi di fig. 16 (registrati su roccia affiorante) e quelli calcolati tenendo conto degli effetti di amplificazione stratigrafica prodotti dal profilo V_S di fig. 22.
Fig. 24 – Comparison between the mean response spectra obtained from the 7 accelerograms of Fig. 16 (recorded on outcropping rock) and the corresponding spectra computed by taking into account the effects of stratigraphic amplification produced by the V_S profile of Fig. 22.

di spettro-compatibilità prescritti dalla normativa sismica europea rispetto ad uno spettro obiettivo costituito in questo caso dallo spettro probabilistico appositamente calcolato. Per i periodi di ritorno di 72, 475 e 2475 anni, sono state selezionate 7 terne accelerometriche che alcune normative sismiche considerano essere la soglia minima di registrazioni da utilizzare per poter fare riferimento ai risultati medi anziché a quelli massimi delle analisi dinamiche eseguite (geotecniche o strutturali).

La procedura di selezione degli accelerogrammi soddisfacenti (con una certa tolleranza) ai vincoli sismogenetici stabiliti dalle analisi di deaggregazione, è stata condotta mediante un algoritmo appositamente predisposto e implementato in un codice di calcolo. I segnali selezionati sono sottoposti ad un controllo finale eseguito manualmente. L'unica correzione apportata rispetto ai segnali originali è una scalatura lineare delle ampiezze (mantenendo il fattore di scalatura inferiore ad una soglia prestabilita) al valore locale di a_{max}. Inoltre la spettro-compatibilità nei confronti dello spettro probabilistico viene soddisfatta in accordo alle prescrizioni stabilite dall'Eurocodice 8 Parte 1.

Lo studio probabilistico di pericolosità sismica condotto sui territori della *Lunigiana* e della *Garfagnana* per il periodo di ritorno dei 475 anni ha fornito valori di a_{max} variabili tra circa 0,15 g e 0,22g. Tali valori sono risultati congruenti a quelli ottenuti in studi analoghi recentemente eseguiti /17,23/. Ai fini della macrozonazione sismica del territorio, per il periodo di ritorno dei 475 anni, si raccomanda di adottare due possibili valori di a_{max} a cui ancorare lo spettro di risposta, distinguendo i comuni in cui il valore di 0,20g non viene superato da quelli in cui risulta inferiore. Ai primi si suggerisce di adottare per a_{max} il valore di 0,20g mentre ai secondi di 0,25g. Per quel che concerne l'azione sismica per i periodi di ritorno di 72 e 2475 anni, si propone di adottare un unico valore di ancoraggio dello spettro di risposta valido per tutti i comuni dei territori. I valori raccomandati sono 0,10g per il periodo di ritorno di 72 anni e 0,35g per il periodo di ritorno di 2475 anni. Pertanto gli accelerogrammi da utilizzare per le analisi dinamiche dovranno essere scalati ai rispettivi valori di a_{max} in relazione al comune di interesse e al periodo di ritorno di riferimento.

Per ultimo, come esempio di applicazione pratica dei risultati dello studio, è stata eseguita una analisi di risposta sismica locale 1D, lineare equivalente utilizzando il codice di calcolo SHAKE91. Per il profilo di velocità delle onde sismiche trasversali impiegato, i risultati ottenuti hanno mostrato una variabilità dell'amplificazione sismica congruente con le caratteristiche dei segnali prescritti all'affioramento.

Ringraziamenti

Questo articolo si basa sul lavoro svolto nell'ambito di una convenzione sottoscritta da EUCENTRE con il Servizio Sismico della Regione Toscana. Gli autori desiderano esprimere un sincero ringraziamento all'Arch. Maurizio Ferrini, dirigente del Servizio Sismico, per il suo sostegno e costante incoraggiamento.

Note

1 http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/
2 http://peer.berkeley.edu/smcat/
3 http://db.cosmos-eq.org/
4 Nel processo di *deaggregazione* ci si dovrebbe più correttamente riferire alla terna (M,d, ε) anziché alla coppia (M,d).
5 In realtà il periodo di ritorno è leggermente diverso a seconda che si consideri una rappresentazione *continua* o *discreta* della corrispondente distribuzione di probabilità che qui è stata assunta di tipo *Poissoniano*.
6 Non è stato possibile utilizzare direttamente i tassi di sismicità calcolati da INGV nello studio /17/ in quanto il parametro {*a*} della relazione di *Gutenberg-Richter* non era disponibile.

Bibliografia

[1] NTC (2005) – *Norme Tecniche per le Costruzioni. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti*. Decreto Ministeriale del 14-9-2005. Supplemento ordinario alla GU n. 222 del 23-9-2005.

[2] OPCM 3274 (2003) – *Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003*. "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica". GU n. 72 del 8-5-2003.

[3] OPCM 3431 (2005) – *Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3431 del 3 Maggio 2005*. "Ulteriori Modifiche ed integrazioni all'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003". GU n. 236 del 10-05-2005.

[4] GASPARINI D., VANMARCKE E. (1976) – *SIMQKE – A program for artificial motion generation, user's manual and documentation*. Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology.

[5] SABETTA F., PUGLIESE A. (1996) – *Estimation of Response Spectra and Simulation of Nonstationary Earthquake Ground Motions*. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. LXXXVI, n. 2, pp. 337-352.

[6] BOORE D.M. (2002) – *SMSIM – Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: version 2.19. A Revision of OFR 96–80–A. U.S*. Geological Survey, 56 pp.

[7] HISADA Y., BIELAK J. (2003) – *A Theoretical Method for Computing Near-Fault Ground Motions in Layered Half-Spaces Considering Static Offset due to Surface Faulting*. With Physical Interpretation of Fling Step and Rupture Directivity. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. XCIII, n. 3, pp. 1154-1168.

[8] HALLDORSSON B., PAPAGEORGIOU A. S. (2004) – *Region specific ground motion simulations using the specific barrier model*. Draft user manual for SGMSv5.

[9] SILVA W.J., LEE K. (1987) – *WES RASCAL code for synthesizing earthquake ground motions, State-of-the-Art for Assessing Earthquake Hazards in the United States, Report 24. U.S*. Army Engineers Waterways Experiment Station, Misc. Paper S-73-1.

[10] ABRAHAMSON N.A. (1998) – *Non-stationary spectral matching program RSPMATCH*, PG&E Internal Report.

[11] EN 1998-1 (2004) – *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 229 pp.

[12] EN 1998-5 (2004) – *Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects*. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, 44 pp.

[13] BOMMER J.J., ACEVEDO A.B. (2004) – *The use of real accelerograms as input to dynamic analysis*, Journal of Earthquake Engineering, 8, 1, pp. 43-91.

[14] GdL CPTI (2004) – *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani. Versione 2004*. Gruppo di Lavoro CPTI, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, INGV, Bologna, http://emidius.mi.ingv.it/CPTI/.

[15] MELETTI C., PATACCA E., SCANDONE P. (2000) – *Construction of a Seismotectonic Model: the Case of Italy*. Pure and Applied Geophysics, 157, pp. 11-35.

[16] 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, Rapporto disponibile presso il sito Internet: http://zonesismiche.mi.ingv.it/.

[17] GdL MPS (2004) – *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, Rapporto disponibile presso il sito Internet: http://zonesismiche.mi.ingv.it/.

[18] CORNELL C.A. (1968) – *Engineering Seismic Risk Analysis*. Bulletin of the Seismological Society of America, vol. LVIII, n. 5, pp. 1583-1606.

[19] MCGUIRE R.K. (1976) – *FORTRAN computer program for seismic risk analysis*. USGS Open-File Report 76-67, United States Geological Survey.

[20] AMBRASEYS N.N., SIMPSON K.A., BOMMER J.J. (1996) – *Prediction of Horizontal Response Spectra in Europe, Earthq*. Engg. Struct. Dyn., 25, pp. 371-400.

[21] REITER L. (1991) – *Earthquake Hazard Analysis: Issues and Insights*. Columbia University Press, pp. 254.

[22] EZ-FRISK (2005) – *Computer Package for Seismic Hazard Analysis, Spectral Matching and Site Response Analysis*. Risk Engineering Inc. v. 7.01. Boulder, Colorado (USA)

[23] INGV (2004) – *Definizione dello stato delle conoscenze in materia di pericolosità sismica del territorio regionale, con approfondimento su elementi e aree particolari*. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Sezione di Milano. Convenzione con la Regione Toscana. Rapporto tecnico finale a cura di C. Meletti, R. Camassi, M. Stucchi e G. Valensise, pp. 74.

[24] EUCENTRE (2005) – *Elaborazione di Raccomandazioni e di Linee Guida per la Definizione dell'Input Sismico e delle Modellazioni da Adottare nei Territori della Regione Toscana nell'Ambito del Progetto di Ricerca "VEL" ai Sensi della Nuova Normativa Sismica. Parte 1: Definizione dell'Input Sismico*. Convenzione tra Regione Toscana ed Eucentre. Rapporto tecnico finale a cura di C.G. Lai, C. Strobbia e A. Dall'Ara, pp. 58.

[25] SCHNABEL P.B., LYSMER J., SEED H.B. (1972) – *SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites*. Report No. UCB/EERC-72/12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, December, 102 p.
[26] IDRISS I.M., SUN J.I. (1992) – *User's Manual for SHAKE91*. Center for Geotechnical Modeling, Department of Civil Engineering, University of California, Davis.
[27] LEE W.H.K., KANAMORI H., JENNINGS P., KISSLINGER C. (2003) – *International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology*. Part B., Academic Press, pp. 1000.
[28] NTC (2008) – *Norme Tecniche per le Costruzioni*. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, Decreto Ministeriale del 14-1-2008. Supplemento ordinario alla GU n. 29 del 4-2-2008.

Definition of seismic input in Tuscan territories of Lunigiana and Garfagnana

Summary

The implementation of nonlinear dynamic analyses for the evaluation of seismic response of structures, co-seismic stability of natural slopes and for local site response analyses requires the definition of the seismic input. This is a description of ground motion induced at a series of points at the ground surface or at a certain depth by earthquakes. Usually the ground motion is described through the time histories of the three components of motion expressed alternatively in terms of acceleration, velocity or displacement. This article illustrates the results of a study aimed at defining the design seismic action at the main inhabited areas of Lunigiana and Garfagnana territories in Tuscany. The work has been conducted in accordance to the prescriptions of Italian seismic code represented by OPCM n. 3431 of May 3, 2005. According to this code the seismic action must be defined for three reference limit states (light damage limit state, severe damage limit state and collapse limit state) to which are associated the return periods of respectively 72, 475 and 2475 years. In the first phase, the study consisted in performing a multiple-sites, probabilistic seismic hazard assessment using the classical approach of Cornell-McGuire. Uniform hazard horizontal acceleration response spectra have been computed on stiff ground for the above mentioned return periods. The anchorage spectral acceleration computed at T=0 was found to be consistent with that calculated by the Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) in relation to the project for drafting the seismic hazard map of Italy in accordance to OPCM n. 3274 of March 20, 2003. In a subsequent phase, after having noted a substantial invariance of the spectral shapes of the response spectra in the territories under investigation, a deaggregation analysis of the results of the seismic hazard study has been performed. This allowed the identification of a series of deterministic scenarios governing the hazard which have permitted the selection of real accelerograms satisfying the spectrum-compatible requirements prescribed by the European seismic code for the definition of the seismic input.

Keywords: *Design Earthquake, Seismic Hazard, Response Spectrum, Deaggregation, Seismic Input, Seismic Code, Tuscany.*