

# Spettri, accelerogrammi e le nuove norme tecniche per le costruzioni

I. Iervolino<sup>1</sup>, E. Cosenza<sup>2</sup>, C. Galasso<sup>3</sup> ■

## Sommario

Le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) traggono vantaggio dal recente lavoro dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia per ciò che riguarda la valutazione della pericolosità sismica del territorio. Ciò si riflette nella definizione dell'azione sismica sotto forma di spettri elastici in accelerazione dipendenti dal sito e generalmente molto prossimi agli spettri a pericolosità uniforme. La maggiore razionalità rispetto alla vecchia classificazione del territorio in zone garantisce al professionista anche una più semplice selezione dell'input sismico per l'analisi dinamica non lineare delle strutture.

## 1. Introduzione

L'analisi dinamica non lineare è considerata il metodo di simulazione numerica più accurato tra quelli disponibili per valutare il rischio sismico di opere civili. Tuttavia, oltre che una modellazione adatta a cogliere opportunamente il comportamento ciclico degli elementi strutturali, richiede una accurata valutazione della sismicità a cui è soggetto il sito in esame e la conseguente selezione dei segnali sismici da utilizzare nelle analisi. Questo è un punto che può necessitare di competenze sismologiche di base tipicamente extra-curricolari rispetto alla formazione del professionista. Infatti, l'azione di progetto è spesso definita sotto forma di spettro di accelerazione *atteso* in relazione proprio alla pericolosità sismica. Gli accelerogrammi da utilizzare nelle analisi devono poi in qualche modo essere compatibili con esso, oltre che riflettere una serie di altri parametri caratterizzanti il moto al suolo e/o le sorgenti dei terremoti pericolosi per il sito. Solo recentemente le procedure per legare la selezione di accelerogrammi per l'analisi delle strutture alla pericolosità sono state messe a punto in una forma tale da essere facilmente recepibili dalla pratica dell'ingegneria sismica. Infatti, le tradizionali difficoltà

Nel lavoro, dapprima si esaminano brevemente le prescrizioni della norma a proposito della definizione degli spettri di progetto e alla selezione di accelerogrammi, anche rispetto allo stato dell'arte della ricerca sul tema. Successivamente, si valuta la fattibilità di trovare combinazioni di accelerogrammi reali compatibili con gli spettri delle NTC attraverso REXEL, uno strumento software sviluppato allo scopo e disponibile presso <http://www.relus.it>. Con l'aiuto di alcuni esempi e del programma sviluppato, si mostra, infine, come la nuova norma consenta di identificare spesso facilmente e razionalmente l'input sismico.

nel circostanziare con sicurezza tale scelta hanno fatto sì che, in ambito sia professionale sia di ricerca, fossero utilizzati segnali artificiali generati perché avessero esattamente la forma dello spettro di progetto. Questo approccio è, però, stato criticato, perché si è dimostrato che alcuni tipi di accelerogrammi artificiali sono meno opportuni per la rappresentazione del moto al suolo rispetto ai cosiddetti accelerogrammi reali (ottenuti da registrazioni di eventi sismici realmente occorsi). L'elemento di base per la selezione degli accelerogrammi per l'analisi dinamica delle strutture è l'analisi probabilistica della pericolosità sismica per il sito di interesse. A partire da questa si possono definire spettri di riferimento per lo stato limite in esame e anche ricavare, con una procedura detta *disaggregazione* della pericolosità (descritta nel seguito), le caratteristiche del terremoto che più influenzano lo spettro atteso o, più precisamente, la parte di esso di maggiore interesse. In molti casi e soprattutto se si è interessati a parametri di risposta sismica legati agli spostamenti, queste informazioni bastano per definire l'input sismico.

Le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (Min.LL.PP., 2008a), di seguito NTC, traendo vantaggio dal recente lavoro dell'Istituto Nazio-

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

<sup>2</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II - ✉ [cosenza@unina.it](mailto:cosenza@unina.it)

<sup>3</sup> Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II - ✉ [carmine.galasso@unina.it](mailto:carmine.galasso@unina.it)

nale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), commissionato dal Dipartimento della Protezione Civile (DPC) per ciò che riguarda la valutazione della pericolosità del territorio nazionale, consentono la definizione dell'azione sismica in forma di spettri elastici dipendenti dal sito e strettamente legati alla pericolosità stessa. Lo studio INGV fornisce anche alcune informazioni riguardanti la disaggregazione della pericolosità. Si vedrà nel seguito come, sia la disponibilità di questi dati sia la maggiore razionalità rispetto a spettri di progetto basati sulla classificazione sismica in zone, garantiscano una semplice, ma allo stesso tempo accurata, selezione dell'input sismico.

## 2. Pericolosità sismica e classificazione del territorio

Le NTC, ai fini della definizione delle azioni sismiche sulle strutture, superano il concetto della classificazione del territorio in zone. Precedentemente, infatti, l'azione sismica era definita dalle Ordinanze PCM 3274 (2003) e 3431 (2005), prodotte dal DPC, con forme standard dello spettro elastico dipendenti dal tipo di suolo e tutte ancorate alla accelerazione di riferimento ( $a_g$ ). Tale valore era identificato sulla base dell'attribuzione del sito di interesse, ad una di quattro possibili zone sismiche. Con la OPCM 3519 (2006) si assumeva la mappa MPS04 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/>), prodotta dallo INGV per conto del DPC, quale riferimento per la classificazione. In pratica, si raccomandava di classificare uno specifico sito in Zona I, II, III o

Nel lavoro si esaminano dapprima le informazioni ora disponibili sulla pericolosità e le prescrizioni della norma in relazione alla definizione degli spettri di progetto. Successivamente si discutono brevemente le strategie per la selezione di accelerogrammi e le prescrizioni del codice a questo proposito. Infine, si mostra uno strumento software sviluppato per la selezione automatica di combinazioni di accelerogrammi naturali *compatibili* con gli spettri relativi a qualunque sito e per ogni stato limite. Con l'aiuto di alcuni casi applicativi e attraverso il software sviluppato, si dimostra come la nuova norma consenta di identificare più facilmente e spesso immediatamente l'input sismico.

IV a seconda che l'accelerazione massima (o *peak ground acceleration*, PGA) su roccia con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni cadesse negli intervalli indicati in Tabella 1. Ciò aveva diverse conseguenze, prima di tutto faceva sì che lo spettro così ottenuto fosse legato solo indirettamente alla pericolosità sismica. È, infatti, evidente come a un sito per cui la PGA fosse molto vicina al limite inferiore dell'intervallo di competenza fosse attribuito un valore di  $a_g$  al limite incrementato di 0.1 g rispetto a questa. Inoltre, come si vedrà da un semplice esempio, poteva essere che due siti confinanti ma con PGA differenti di alcuni centesimi di g avessero due  $a_g$  differenti di 0.1 g e quindi spettri di riferimento ben diversi. Per attenuare questo effetto, sia la OPCM 3274 che la OPCM 3519 consentivano anche fasce

Tabella 1 - Criteri di classificazione per la determinazione delle azioni sismiche antecedenti le NTC

Zona	Intervallo di pertinenza della PGA (10 in 50 anni) [g]	$a_g$ [g]
I	]0.25, 0.35]	0.35
II	]0.15, 0.25]	0.25
III	]0.05, 0.15]	0.15
IV	$\leq 0.05$	0.05

di tolleranza tali da consentire alle regioni di giostrare intorno alle soglie delle quattro zone.

### 2.1 Curve di pericolosità e spettri a probabilità uniforme

Il Progetto S1 (<http://esse1.mi.ingv.it/>) nell'ambito della Convenzione 2004-2006 tra l'INGV e il Dipartimento della Protezione Civile ha prodotto, per ogni punto di una griglia regolare con passo di circa 5 km nelle due direzioni orizzontali (più di  $16 \times 10^3$

nodi), l'analisi probabilistica di pericolosità sismica per l'Italia poi recepita dalle NTC; si vedano Meletti e Montaldo (2007) e Montaldo e Meletti (2007) per ulteriori dettagli.

I principali prodotti di immediato interesse per l'ingegneria sismica sono le cosiddette *curve di pericolosità* per le accelerazioni spettrali elastiche,  $S_a(T)$ , con T compreso nell'intervallo 0 s ÷ 2 s. In pratica, per undici periodi di oscillazione sono fornite nove ordinate spettrali in accelerazione, ciascuna delle quali

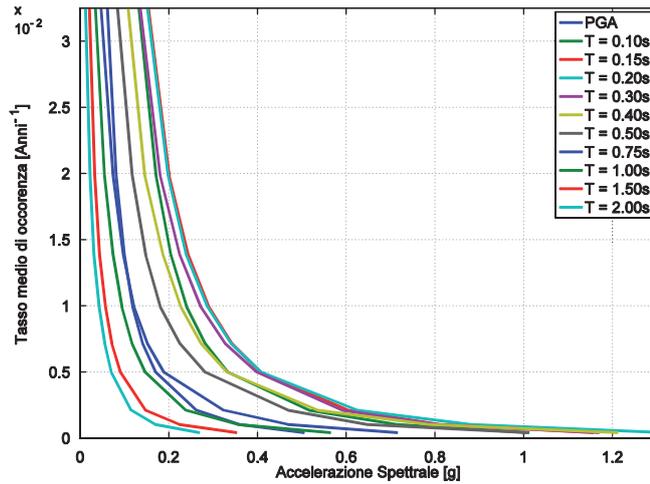


Fig. 1  
Tasso medio di occorrenza delle accelerazioni spettrali per 11 periodi per Sant'Angelo dei Lombardi (dati INGV).

corrisponde ad un *periodo di ritorno*,  $T_R$ , che va da 30 a 2475 anni.  $T_R$  ha un preciso significato probabilistico e deriva dalla modellazione dell'occorrenza dei terremoti come processi stocastici *poissoniani* con *selezione casuale* (Cornell, 1968). Il periodo di ritorno è quell'intervallo che mediamente intercorre tra due terremoti che producono, nel sito in esame, un valore dell'accelerazione spettrale eguale o maggiore di quello considerato. Il suo inverso è il tasso medio di occorrenza del terremoto con tali effetti. Ad esempio, in Figura 1 si riportano le accelerazioni spettrali e i rispettivi tassi, desunti dal sito web del progetto di cui sopra, per il sito di Sant'Angelo dei Lombardi (AV) considerando come coordinate geografiche 15.1784° longitudine e 40.8931° latitudine.

Assegnato il periodo di ritorno è possibile ricavare la probabilità di superamento,  $P_{V_R}$ , di quel particolare valore dell'accelerazione in un periodo temporale qualsiasi,  $V_R$ . Il

legame tra probabilità di superamento in un certo intervallo e periodo di ritorno è dato in Equazione (1). Essa deriva direttamente dalla discussa modellazione poissoniana dell'arrivo degli eventi sismici.

$$P_{V_R} = 1 - e^{-V_R/T_R} \quad (1)$$

Ad esempio, lo studio INGV indica che la PGA su roccia con periodo di ritorno 475 anni in Sant'Angelo dei Lombardi è circa 0.27 g. Dalla Equazione (1) si ricava quindi che la probabilità che in 50 anni la PGA superi 0.27 g è 0.1 (o il 10%), mentre che la superi in 1 anno è circa 0.002. Con questo principio si possono ricavare dal sito le curve di pericolosità in 50 anni di Figura 2. Conseguentemente, è possibile definire i cosiddetti spettri a pericolosità uniforme (SPU). Uno SPU è tale per cui le ordinate hanno tutte la stessa probabilità marginale di essere superate nell'intervallo temporale fissato e che, quindi, si ottengono interse-

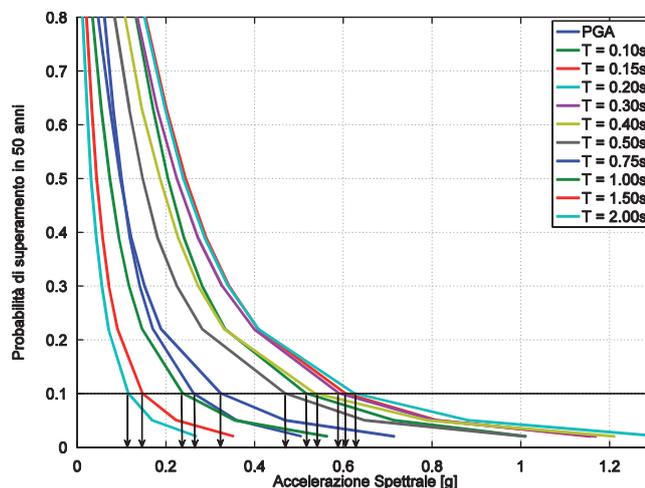
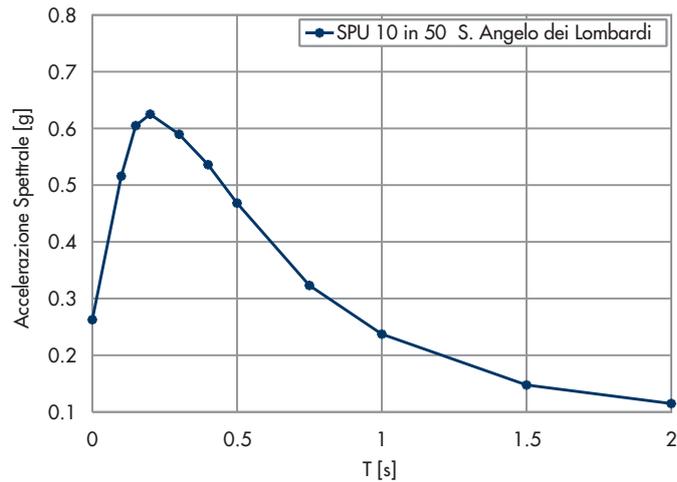


Fig. 2  
Curve di pericolosità in 50 anni secondo lo studio INGV per Sant'Angelo dei Lombardi.

Fig. 3  
Spettro a pericolosità uniforme  
per la probabilità di  
superamento del 10% in 50  
anni per Sant'Angelo dei  
Lombardi.



cando le curve di pericolosità con la probabilità di interesse. Ad esempio, in Figura 3 è riportato lo SPU corrispondente al 10% di probabilità di superamento in 50 anni per Sant'Angelo dei Lombardi, ricavato dalla Figura 2 considerando l'orizzontale passante per 0.1.

### 2.2 Disaggregazione della pericolosità

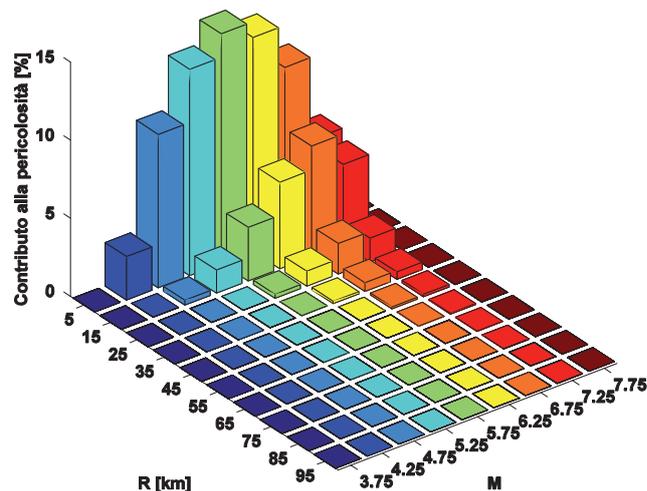
La disaggregazione della pericolosità sismica (Bazzurro e Cornell, 1999) è una procedura con la quale si determinano i parametri del terremoto che maggiormente influenzano la pericolosità sismica a un sito. In pratica, assunto che l'accelerazione superi un determinato valore di interesse, con la disaggregazione si calcola per ciascuna possibile coppia magnitudo (M) e distanza del sito dalla sorgente del terremoto (R), la probabilità che tale superamento sia causato dalla coppia.

Continuando con l'esempio di Sant'Angelo dei Lombardi, in Figura 4 si riporta la disaggregazione della PGA con il 10% di probabi-

lità di superamento in 50 anni su roccia ottenuta dal sito web del progetto S1. La coppia modale che provoca una PGA maggiore di 0.27 g è compresa negli intervalli 5.5 ÷ 6 (centrato su 5.75) per quanto riguarda la magnitudo e 0 km ÷ 10 km per la distanza (centrato su 5 km). Questo vuol dire che, fatto 100 il numero di volte in cui l'accelerazione di picco al sito supera il valore con periodo di ritorno 475 anni, tale coppia è quella che più spesso è causa di tale superamento (circa 15 volte). In prima approssimazione, si potrebbe dire che i valori della coppia di magnitudo e distanza modale rappresentano i valori dei parametri del terremoto che maggiormente influenzano la pericolosità nel sito in esame in termini di PGA. In un certo qual modo, quindi, essi definiscono il terremoto di riferimento.

Il sito web <http://esse1.mi.ingv.it/> fornisce la disaggregazione per tutti i periodi di ritorno della sola PGA su roccia (Spallarossa e Barani, 2007), bisogna però tenere presente che le

Fig. 4  
Disaggregazione della  
pericolosità riferita alla PGA  
con il 10% di probabilità di  
superamento in 50 anni per  
Sant'Angelo dei Lombardi.



ordinate dello spettro a pericolosità uniforme, al variare del periodo proprio della struttura, possono essere dominate da coppie diverse di magnitudo e distanza. Infatti, i terremoti di magnitudo moderata vicini contribuiscono alle ordinate spettrali ai bassi periodi, mentre anche i terremoti più forti e lontani contribuiscono significativamente alla pericolosità nella parte dello spettro dei lunghi periodi e l'entità di tale contributo può non essere facilmente desumibile dalla disaggregazione della sola PGA.

Si consideri, ad esempio, la disaggregazione della pericolosità sismica per PGA su roccia e

per la accelerazione spettrale a 2 s con periodo di ritorno 120 anni per il sito di Ponticelli in Napoli, ottenuta con uno studio ad hoc (Convertito et al., 2008). In Figura 5 si riportano le distribuzioni marginali di magnitudo e distanza, cioè ottenute da una distribuzione congiunta come quella in Figura 4 sommando i contributi di tutte le distanze e di tutte le magnitudo rispettivamente. Si evince come la disaggregazione per la PGA sia dominata da valori di magnitudo e distanza pari a circa 5.8 e 7 km, rispettivamente, mentre alla disaggregazione per l'ordinata spettrale a 2 s contribuiscono anche

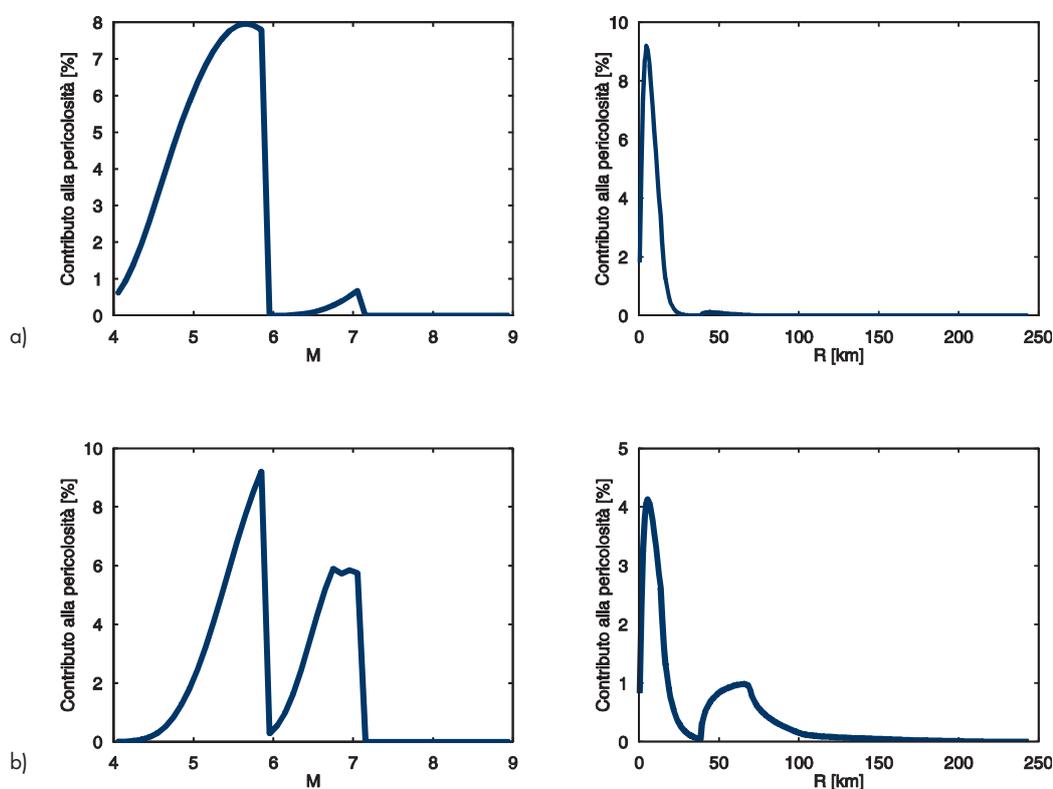


Fig. 5  
Disaggregazione della pericolosità sismica per la località Ponticelli (Napoli) relativa a un periodo di ritorno 120 anni per la PGA, (a), e Sa(2s), (b).

magnitudo vicine a 7 e distanze attorno a 70 km. Tali valori si intravedono anche nella disaggregazione della PGA, sebbene in tal caso diano un contributo molto modesto.

Si noti infine che, oltre a magnitudo e distanza dalla sorgente, lo studio INGV fornisce anche alcune informazioni sulla disaggregazione in termini di *epsilon* ( $\epsilon$ ). Tale parametro misura

quanto lo spettro del terremoto di riferimento deva da quello previsto dalla *legge di attenuazione* per la regione considerata. Si tralascia qui, per semplicità, la discussione su  $\epsilon$  e si rimanda il lettore a Iervolino et al. (2008) per maggiori informazioni e sull'importanza di tale parametro nella valutazione del rischio sismico delle strutture.

### 3. Azione sismica e spettri di riferimento secondo le NTC

Al § 3.2 le NTC stabiliscono il principio per cui le azioni sismiche sulle costruzioni si valutano in relazione alla pericolosità del sito definita in termini di *accelerazione orizzon-*

*tale massima attesa* su suolo A (in pratica si fa finalmente coincidere il valore di ancoraggio dello spettro,  $a_g$ , con la PGA su roccia) e del corrispondente spettro di risposta elastico. Per accelerazione massima attesa s'intende il picco del segnale che ha

una certa probabilità,  $P_{V_R}$ , di essere superato in un periodo di riferimento  $V_R$  (ad esempio molti codici considerano la probabilità del 10% in 50 anni come riferimento per il progetto). Nelle NTC,  $V_R$  è da determinarsi come il prodotto dalla vita nominale della costruzione,  $V_N$ , e del coefficiente d'uso,  $C_U$ . La vita

nominale è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve poter essere usata per lo scopo al quale è destinata. Il valore del coefficiente d'uso dipende dalla gravità delle perdite dovute al raggiungimento di un determinato stato limite e quindi riguarda

Tabella 2 - Valori dei parametri per la definizione del periodo di ritorno

(Stato Limite)	$C_U$	$V_N$ [anni]
81% Operatività (SLO)	0.7 (I. Strutture secondarie)	$\leq 10$ (Opere provvisorie)
63% Danno (SLD)	1.0 (II. Strutture ordinarie)	$\geq 50$ (Opere ordinarie)
10% Salvaguardia della vita (SLV)	1.5 (III. Strutture importanti)	$\geq 100$ (Grandi opere)
5% Prevenzione del Collasso (SLC)	2.0 (IV. Strutture strategiche)	

“l'importanza” della struttura (Tabella 2). Si ricorda che la coppia  $\{P_{V_R}, V_R\}$ , che identifica l'accelerazione massima di riferimento per le azioni, si può sintetizzare nell'unico ente: il già menzionato periodo di ritorno,  $T_R$ . Per definire lo spettro elastico (§ 3.2.3.2) in accelerazione oltre ad  $a_g$  sono necessari altri due parametri:  $F_o$ , cioè il valore del rapporto tra il massimo dello spettro e  $a_g$  per quel sito (amplificazione spettrale) e  $T_c^*$  che rappresenta il periodo finale del ramo piatto dello spettro, che è un parametro importante dal punto di vista della progettazione agli spostamenti (Cosenza, 2007).

L'Allegato B alle NTC fornisce i valori di  $a_g$ ,  $F_o$  e  $T_c^*$ , che sono direttamente derivati dallo studio INGV. In particolare, i valori di amplificazione e del periodo finale del ramo piatto sono ottenuti, per tutti i periodi di ritorno, minimizzando lo scarto tra gli spettri in accelerazione, velocità e spostamento delle NTC e quelli a pericolosità uniforme dello INGV per ciascun nodo del reticolo di riferimento. Il valore di uno qualunque dei parametri descritti per periodi di ritorno non contemplati nell'Allegato B può essere ricavato per interpolazione dei dati forniti mediante la relazione fornita nell'Allegato A.

Lo spettro poi tiene conto di eventuali modificazioni dovute a condizioni locali del sottosuolo, nonché alla morfologia della superficie semplicemente attraverso alcuni coefficienti. Questo perché il DPC, per motivi più di carattere tecnico-amministrativo che scientifico, ha commissionato lo studio INGV per la sola roccia, sebbene sia possibile condurre le

stesse analisi di pericolosità per altre classi di suolo e condizioni topografiche.

A titolo di esempio si riporta il caso dei comuni di Nusco (AV) e Sant'Angelo dei Lombardi (AV), i quali sono confinanti e le cui accelerazioni su roccia che hanno il 10% di probabilità di superamento in 50 anni, secondo lo studio INGV, valgono 0.2416 g e 0.2673 g. Secondo la Tabella 1, non tenendo conto delle possibili fasce di tolleranza, essi sarebbero classificati in Zona II e I rispettivamente. In Figura 6 si riporta la posizione dei due punti sulla mappa di  $a_g$  con periodo di ritorno di 475 anni per la Campania. Sebbene i due siti siano molto vicini e quindi, come è logico, abbiano spettri calcolati secondo le NTC molto simili (Fig. 7), la classificazione in zone avrebbe fatto sì che gli spettri determinati con la OPCM 3274 fossero molto diversi e in particolare quello di Sant'Angelo dei Lombardi fosse significativamente sovradimensionato rispetto alla pericolosità al sito. Dalla stessa Figura 7 si vede che gli spettri delle NTC approssimano bene gli spettri a pericolosità uniforme.

Infine, la Figura 6 mostra anche come il valore massimo nella regione della PGA su roccia, corrispondente ad una probabilità del 10% in 50 anni, sia circa 0.27 g. Tale valore è sensibilmente più basso rispetto al valore di ancoraggio dello spettro di 0.35 g previsto dalla classificazione in zone per una larga parte del territorio campano. Ciò mostra quanto sia generale la maggiore razionalità della valutazione delle azioni secondo i nuovi criteri.

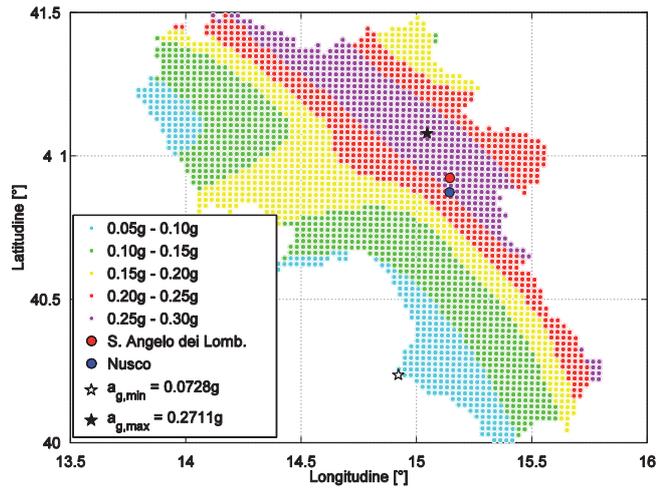


Fig. 6  
Mappa di  $a_g$  con periodo di ritorno 475 anni per la Campania.

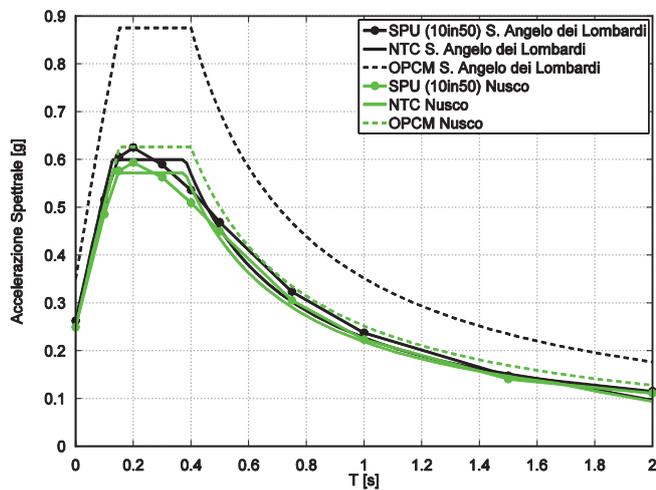


Fig. 7  
Spettri in accelerazione su suolo rigido per Nusco e S. Angelo dei Lombardi.

#### 4. Accelerogrammi per l'analisi dinamica non lineare

Il modo considerato tra i più avanzati della pratica professionale (Iervolino e Manfredi, 2008) per la selezione dell'input e la valutazione sismica della struttura consiste nell'ottenere, da studi sismologici ad hoc o da dati disponibili tipo INGV, l'analisi probabilistica della pericolosità sismica per il sito in esame. A partire da questa si definiscono per uno o più stati limite di interesse gli spettri a pericolosità uniforme. Per ciascuno di questi si selezionano una serie di accelerogrammi che hanno caratteristiche simili (es. in termini di magnitudo e distanza) a quelle provenienti dalla disaggregazione per le ordinate dello spettro di interesse per la struttura in esame, es. quella relativa al periodo fondamentale. Successivamente il professionista *scala* gli accelerogrammi proprio al valore dello spettro di progetto corrispondente al periodo

fondamentale della struttura. Scalare linearmente in ampiezza vuol dire semplicemente moltiplicare gli accelerogrammi per il rapporto tra il valore dello spettro di progetto che si vuole raggiungere e quello dell'accelerogramma prima che lo si scali.

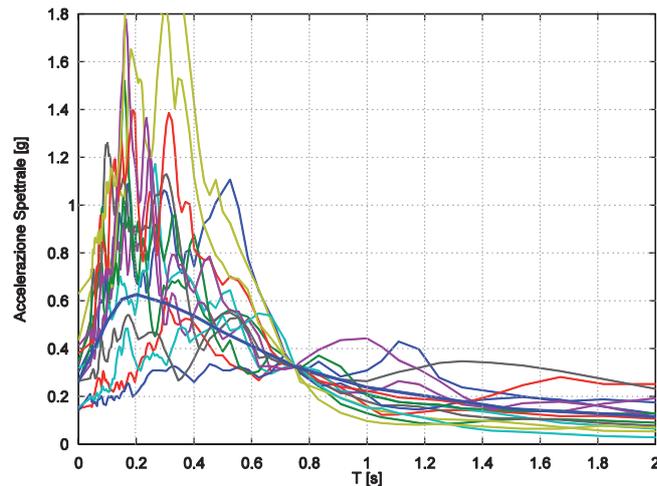
Questa procedura non è strettamente necessaria ma aiuta a far sì che gli spettri dei singoli accelerogrammi siano simili allo spettro di riferimento almeno attorno al periodo di oscillazione fondamentale della struttura (Fig. 8). Ciò aiuta ridurre la variabilità della risposta sismica della struttura da accelerogramma a accelerogramma, il che vuol dire riuscire a valutare il comportamento della struttura condizionato al valore dello spettro di progetto al quel periodo, con minore incertezza a parità di numero di analisi (Iervolino e Cornell, 2005). È stato altresì dimostrato che in molti casi scalare allo spettro di progetto fa sì che non sia necessario selezionare

gli accelerogrammi in relazione a magnitudo e distanza. In pratica, si è visto che, entro certi limiti, la risposta della struttura, una volta scalati gli accelerogrammi, è indipendente da magnitudo e distanza (Iervolino e Cornell, 2004).

A questo punto il professionista esegue le analisi dinamiche non lineari per ciascuno

degli accelerogrammi stabilendo il comportamento sismico dell'opera. Ad esempio, se lo spostamento massimo d'interpiano supera quello considerato di *capacità* per la struttura per la maggioranza degli accelerogrammi, è ragionevole concludere che questa è destinata al collasso per il moto al suolo rappresentato dallo spettro di riferimento.

Fig. 8  
Una combinazione di 14 accelerogrammi scalata per coincidere a  $T = 0.75s$  con lo spettro a pericolosità uniforme 10% in 50 anni di Fig. 3.



Questo approccio è quasi mai recepito esplicitamente delle normative, sebbene queste spesso prescrivano che la selezione degli accelerogrammi debba avvenire sulla base dello spettro di progetto e sui parametri di sorgente del terremoto di progetto. L'Eurocodice 8 (CEN, 2003) e la OPCM 3274, ad esempio, richiedono che l'insieme degli accelerogrammi scelti abbia l'ordinata spettrale media compatibile con lo spettro di progetto in un ampio intervallo di periodi. Allo stesso tempo, si prescrive che essi devono rispecchiare le caratteristiche della sorgente del terremoto che dominano la pericolosità sismica. Tuttavia, non si fa chiaro riferimento alla disaggregazione e d'altra parte lo spettro di progetto (es. nell'OPCM 3274) è legato alla pericolosità attraverso il solo parametro  $a_g$ , come mostrato in precedenza. Quindi il legame tra selezione e pericolosità si potrebbe definire debole o quantomeno non esplicito. È stato discusso (es. Iervolino et al., 2007; Iervolino et al., 2008) come le prescrizioni di questo tipo favoriscano l'utilizzo di accelerogrammi artificiali generati proprio per avere una forma spettrale praticamente coincidente con quella dello spettro. Questo sia perché non sempre è facile avere a disposizione una analisi completa di pericolo-

sità sismica per il sito sia perché non è facile trovare, almeno in principio, combinazioni di accelerogrammi naturali che abbiano l'ordinata spettrale media compatibile con lo spettro di normativa in un largo intervallo di periodi. D'altra parte, l'appropriatezza di questo tipo di segnale per l'analisi dinamica delle opere civili è stata spesso messa in discussione.

#### 4.1 Impiego di accelerogrammi secondo le NTC

Le NTC discutono la analisi dinamica non lineare delle strutture al § 7.3.4.2, riferendosi al § 3.2.3.6 per ciò che riguarda la scelta dei segnali accelerometrici. È ivi consentito l'impiego di accelerogrammi *artificiali, simulati* e provenienti da registrazioni di eventi sismici reali. È esplicitamente indicato come gli accelerogrammi artificiali debbano rispettare vincoli di compatibilità media con lo spettro elastico di riferimento per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente  $\xi$  del 5%. In particolare l'ordinata spettrale media non deve presentare uno scarto in difetto superiore al 10%, rispetto alla corrispondente componente dello spettro elastico di progetto, in alcun punto del maggiore tra

gli intervalli  $0.15 s \div 2.0 s$  e  $0.15 s \div 2T$  (in cui  $T$  è il periodo fondamentale di vibrazione della struttura in campo elastico) per le verifiche agli stati limite ultimi, e  $0.15 s \div 1.5T$ , per le verifiche agli stati limite di esercizio. Nel caso di costruzioni con isolamento sismico, il limite superiore dell'intervallo di coerenza è assunto pari a  $1.2T_{is}$ , essendo  $T_{is}$  il periodo equivalente della struttura isolata, valutato per gli spostamenti del sistema d'isolamento prodotti dallo stato limite in esame. (Tali prescrizioni sono simili a quelle dell'Eurocodice 8 che però si applicano a qualunque dei tre tipi di segnale consentiti). Per quanto riguarda quelli simulati e reali è prudentemente indicato che si qualifichi la scelta in base alle effettive caratteristiche della sorgente, della propagazione e/o dell'evento dominante. Gli accelerogrammi reali possono poi essere scalati per approssimare lo spettro di riferimento.

È opinione degli autori che queste indicazioni suggeriscano la scelta degli accelerogrammi reali a seguito della disaggregazione della pericolosità sismica per poi scalarli per renderli simili o coincidenti con lo spettro di riferimento. Tuttavia, si è mostrato che anche nel fortunato caso italiano, in cui si ha a disposizione l'analisi di pericolosità per qualunque sito, non sono sempre disponibili informazioni dettagliate sui meccanismi di sorgente nonché sulla magnitudo e la distanza rilevanti. Infatti, lo studio INGV fornisce valori di disaggregazione solo per  $a_g$  e sebbene questa possa dare delle informazioni su tutti i terremoti che influenzano la pericolosità, non è detto che sia facilmente desumibile l'entità dei contributi che essi danno alla disaggrega-

zione relativamente alla parte dello spettro di interesse per la struttura in esame.

È quindi possibile utilizzare, in alternativa, le condizioni di compatibilità spettrale media definite per i segnali artificiali anche per quelli naturali, avendo cura in ogni caso di rispettare le condizioni geologiche di sito e di scegliere accelerogrammi il cui spettro è, per quanto possibile, generalmente simile a quello di riferimento (Min.LL.PP, 2008b). Si specifica anche che se ciò richiede che gli accelerogrammi siano scalati linearmente in ampiezza, il fattore di scala sia limitato nel caso di segnali provenienti da eventi di piccola magnitudo.

Queste istruzioni rispecchiano la considerazione per cui cercare accelerogrammi con magnitudo e distanza ottenuti dalla disaggregazione è secondario rispetto a selezionarli in modo da avere la forma spettrale simile a quella di riferimento. Questo per due motivi: perché la risposta strutturale non lineare, specialmente in termini di spostamento, è prima di tutto sensibile alla forma spettrale e poi perché, in realtà, tutte le norme indicano di scegliere gli accelerogrammi in base a magnitudo e distanza di riferimento proprio perché si crede, a ragione, che la magnitudo influenzi la forma spettrale.

In § 7.3.5, la norma infine prescrive che se la risposta viene valutata mediante analisi dinamica, gli effetti sulla struttura sono rappresentati dai valori medi degli effetti più sfavorevoli ottenuti dalle analisi, se si utilizzano almeno sette diversi gruppi di accelerogrammi, dai valori più sfavorevoli degli effetti, in caso contrario. In nessun caso si possono adottare meno di tre gruppi di accelerogrammi.

## 5. Selezione dell'input sismico assistita dal calcolatore

Si è visto come le NTC, opportunamente, consentano una certa discrezionalità nella selezione e manipolazione degli accelerogrammi naturali mitigando le prescrizioni di compatibilità spettrale che invece spesso sono dettate dai codici, a patto però di tenere in conto informazioni che non sempre sono a disposizione del professionista. Allo stesso tempo, sebbene la scelta accurata dell'input sismico sulla base delle caratteristiche sismogenetiche rilevanti per il sito in esame sia sicuramente la procedura più prudente e razionale, mantenere una certa coerenza dei segnali con lo spettro di riferimento può aiutare in quei casi

in cui essa non è agevolmente attuabile.

Per consentire la selezione secondo entrambi gli approcci è stato sviluppato uno specifico strumento software (Fig. 9) per la ricerca di combinazioni di accelerogrammi compatibili in media con gli spettri delle NTC e che possono, eventualmente, rispecchiare caratteristiche di sorgente. *REXEL 2.0 beta*, disponibile gratuitamente al sito web <http://www.reluis.it/>, fa riferimento agli accelerogrammi che si trovano nello European Strong-motion Database, o ESD, (<http://www.isesd.cv.ic.ac.uk/>) e che verificano le condizioni di campo libero, cioè che non dovrebbero risentire della risposta strutturale di strutture su cui potrebbero essere installati o a cui potrebbero essere adiacenti gli

strumenti di registrazione (Ambraseys et al., 2000; Ambraseys et al., 2004).

Il programma consente di definire automaticamente, per qualunque luogo sul territorio nazionale, gli spettri di normativa orizzontali e verticali a partire dalle coordinate geografiche, dalla geologia locale, dallo stato limite in esame, dalla vita nominale e dalla classe di utilizzo, in modo del tutto simile al software disponibile sul sito web del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (<http://www.cslp.it/>). Nel caso le coordinate specificate non cadano in un nodo del reticolo di riferimento, i valori dei parametri vengono calcolati automaticamente come media pesata dei valori assunti nei vertici della maglia elementare del reticolo contenente il punto in esame, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici, come specificato nell'Allegato A delle NTC.

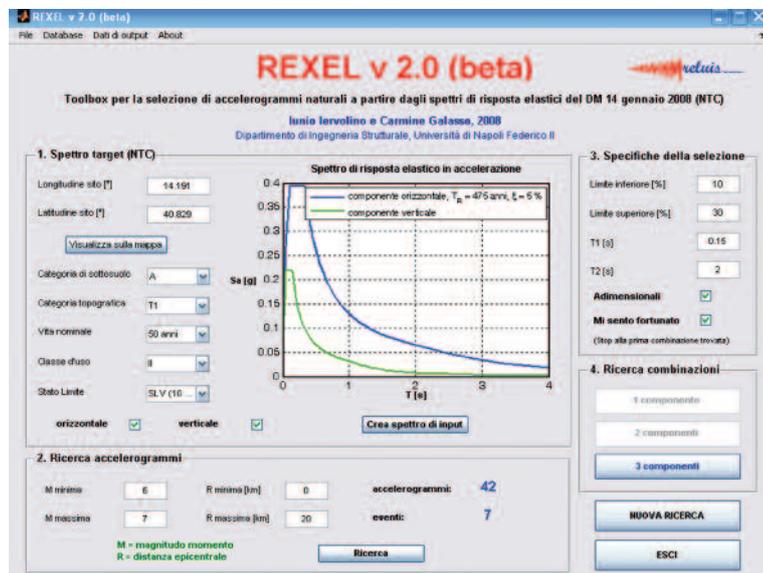
Il codice, inoltre, consente di ricercare tra gli accelerogrammi provenienti dalla stessa geologia locale presenti nel database europeo, quelli che cadono in intervalli arbitrari di magnitudo e distanza epicentrale. La caratteristica principale del software sviluppato è che gli spettri degli accelerogrammi restituiti dalla ricerca possono essere utilizzati per cercare combinazioni di sette che in media rispettano lo spettro precedentemente definito per il sito, con tolleranza assegnata e in un intervallo di periodi qualunque tra 0 s e 4 s. Le combinazioni possono essere formate da una, due o tutte e tre le componenti del moto sismico, per analisi sia piane che spaziali e che includano o meno la componente verticale.

Il software consente di effettuare analisi:

mirate a ottenere combinazioni di accelerogrammi compatibili con lo spettro che non necessitano di essere scalati, ma anche set di accelerogrammi che, essendo stati normalizzati rispetto alla propria PGA, sono compatibili con lo spettro se scalati linearmente il che, come già dimostrato in Iervolino et al. (2008) e negli altri riferimenti in esso contenuti, consente di ottenere combinazioni i cui spettri sono simili rispetto a quello di normativa e quindi più raccolti attorno ad esso. Si noti anche che la scalatura degli accelerogrammi descritta in precedenza consisteva nel far coincidere l'accelerazione spettrale ad un periodo con quella dello spettro di riferimento, in questo caso è la PGA degli accelerogrammi che si fa coincidere con quella dello spettro di normativa.

Il programma analizza tutte le combinazioni di sette spettri definite dai parametri dell'input e restituisce una lista di quelle il cui spettro medio rispetta la compatibilità con il target nell'intervallo di periodi prescelto e con la tolleranza prevista. I risultati sono ordinati in modo che all'inizio si trovino le combinazioni che hanno i singoli spettri il meno dispersi possibile secondo i parametri di deviazione definiti in Iervolino et al. (2008). Esso prevede anche una opzione "mi sento fortunato" tale per cui la ricerca si ferma alla prima combinazione trovata e che è una tra le più raccolte rispetto allo spettro target. Nel seguito, attraverso alcuni esempi illustrativi, si mostra lo strumento sviluppato e come la nuova norma generalmente faciliti la selezione degli accelerogrammi per la analisi dinamica non lineare delle strutture.

Fig. 9  
Immagine dell'interfaccia utente della versione beta del software.



### 5.1 Esempio 1 - Sant'Angelo dei Lombardi

A titolo di esempio, si supponga innanzitutto di voler selezionare accelerogrammi orizzontali per analisi piane (combinazioni costituite da soli 7 accelerogrammi da applicare in una sola direzione) e spaziali (combinazioni costituite da 7 gruppi di accelerogrammi che includono le due componenti orizzontali della registrazione) allo SLV di una struttura su suolo di tipo A con vita nominale di 50 anni e classe d'uso II, sita in Sant'Angelo dei Lombardi (AV). Impostando le coordinate geografiche (15.1784° lon., 40.8931° lat.) e i suddetti parametri che permettono di definire l'azione sismica secondo le NTC, il software restituisce lo spettro di riferimento. Si supponga, inoltre, di voler selezionare gli accelerogrammi intorno alle magnitudo più grandi che contribuiscono alla disaggregazione di  $a_g$  per  $T_R = 475$  (Fig. 4) a distanze relativamente piccole dalla sorgente.

Specificando come intervallo per la magnitudo [5.6, 7] e per la distanza 0 km ÷ 30 km, REXEL

2.0 beta trova nel database 59 coppie di accelerogrammi (componenti orizzontali) provenienti da 28 terremoti diversi. Assegnando una tolleranza di compatibilità della media del 10% inferiore e del 20% superiore nell'intervallo di periodi 0.15 s ÷ 2 s e selezionando l'opzione di ricerca rapida, si ottengono immediatamente le combinazioni di accelerogrammi in Figura 10 e Figura 11. Nella legenda oltre che i codici delle singole forme d'onda sono forniti anche i codici dei terremoti (EQ) a cui si riferiscono secondo lo ESD. In Tabella 3 si riportano, per ciascuna combinazione, la magnitudo media e la distanza media. Le informazioni di dettaglio sugli spettri, che comunque il software fornisce in output, possono essere desunte dal sito dello ESD.

Si noti che si sono scelti degli intervalli e non i valori esatti modali sia perché non si sono trovate combinazioni spettro-compatibili non scalate utilizzando tale coppia sia perché, a rigore, ci sono anche altre magnitudo e distanze, vicine ai valori modali, che contri-

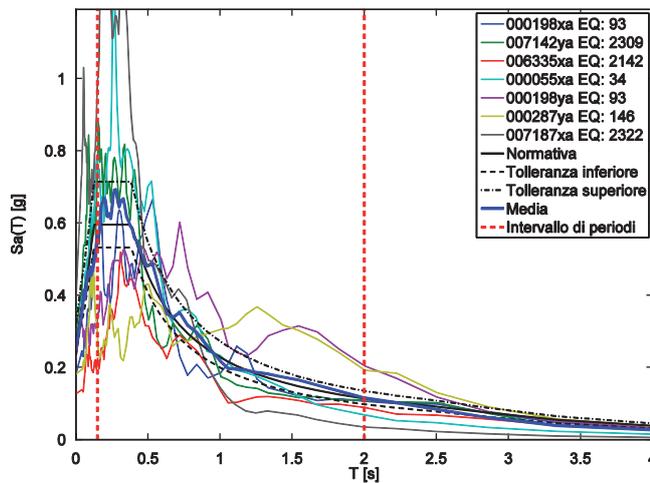


Fig. 10  
Combinazione non scalata per analisi di strutture piane che riflette la disaggregazione di  $a_g$  con periodo di ritorno 475 anni in Sant'Angelo dei Lombardi (AV).

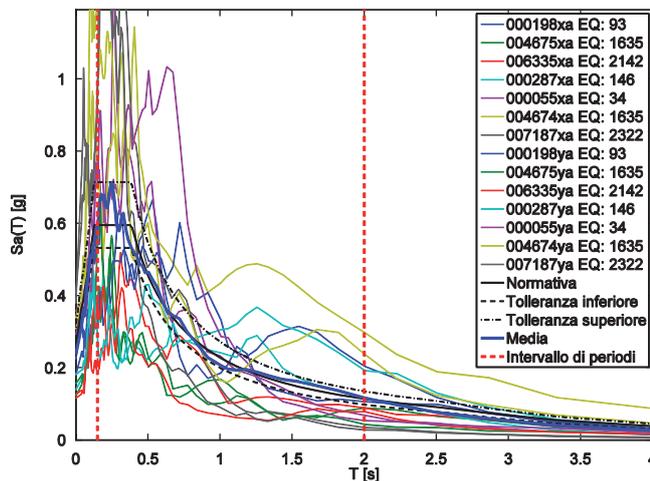


Fig. 11  
Combinazione non scalata per analisi di strutture spaziali che riflette la disaggregazione di  $a_g$  con periodo di ritorno 475 anni in Sant'Angelo dei Lombardi (AV).

buiscono significativamente alla disaggregazione della pericolosità.

Dai risultati presentati, si evince che lo scostamento del singolo spettro rispetto a quello target può essere grande, mentre può essere utile, come anche suggerito dalle prescrizioni NTC, avere combinazioni caratterizzate da accelerogrammi che singolarmente devino poco dallo spettro di normativa. Per trovare set più raccolti rispetto allo spettro target, è possibile utilizzare l'opzione di "adimensionalizzazione"; in questo modo, controllando la forma spettrale, è possibile ricercare combinazioni compatibili senza tenere in ecc-

siva considerazione la magnitudo e la distanza provenienti dalla disaggregazione, sebbene questo richieda scalare gli accelerogrammi. Considerando semplicemente accelerogrammi con  $M \geq 6$  e distanza nell'intervallo  $0 \text{ km} \div 25 \text{ km}$ , con le stesse specifiche di compatibilità del caso precedente (nello stesso intervallo di periodi) e sfruttando ancora l'opzione "mi sento fortunato", si ottengono immediatamente le combinazioni di accelerogrammi in Figura 12 e Figura 13. I valori medi di magnitudo, distanza e fattore di scala per ciascuna combinazione sono riportati in Tabella 3.

Fig. 12  
Combinazione da scalare per  
analisi di strutture piane in  
Sant'Angelo dei Lombardi (AV).

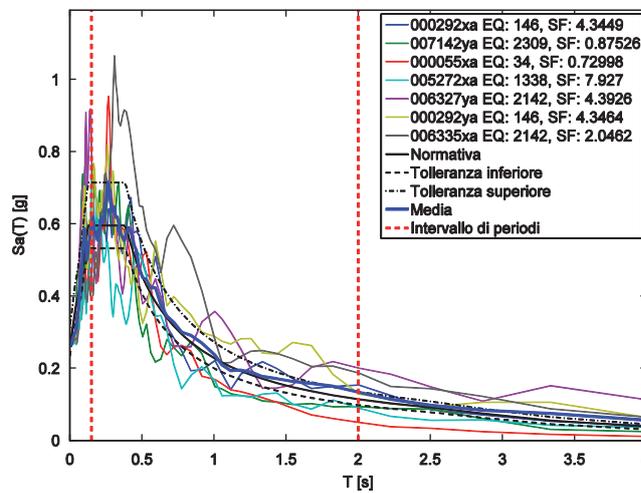


Fig. 13  
Combinazione da scalare per  
analisi di strutture spaziali in  
Sant'Angelo dei Lombardi (AV).

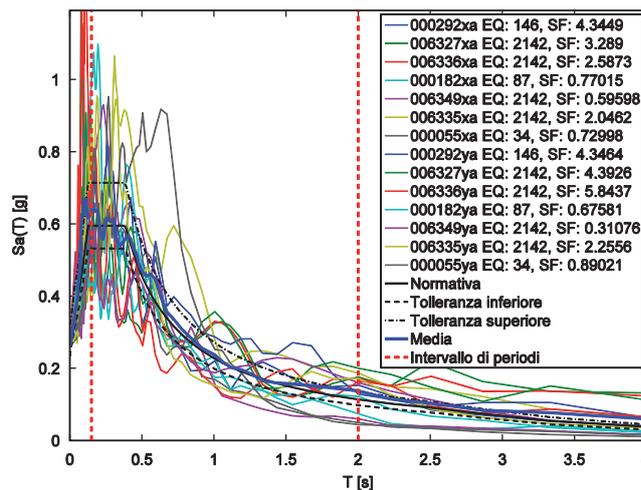


Tabella 3 - Informazioni sulle combinazioni presentate per il sito di Sant'Angelo dei Lombardi

Combinazione	$M_{media}$	$R_{media}$ [km]	$SF_{medio}$
Per analisi piane (non scalata)	6.7	20.7	-
Per analisi spaziali (non scalata)	6.6	18.3	-
Per analisi piane (scalata)	6.5	21.4	3.5
Per analisi spaziali (scalata)	6.6	18.3	2.4

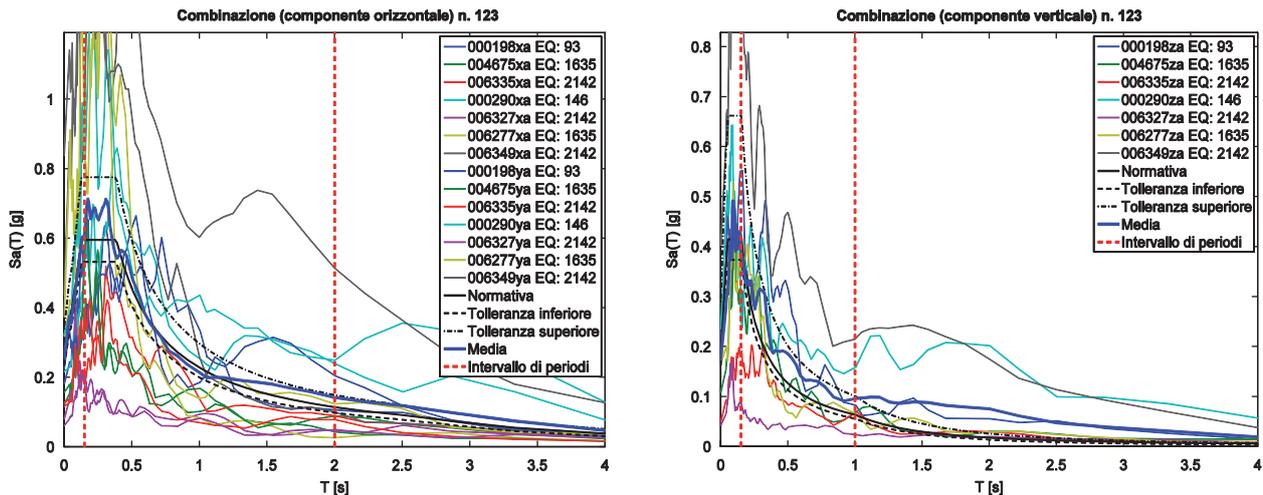
### Ricerca che includa la componente verticale del moto sismico

REXEL consente di selezionare combinazioni di accelerogrammi che includano anche la componente verticale delle registrazioni, sebbene le NTC prescrivano di considerare tale componente solo in casi specifici (§ 7.2.1 e § 7.10.5.3.2) e se il sito nel quale la costruzione sorge non si trovi in Zona III o IV.

Nel caso di analisi spaziali, dove si applicano tutte e tre le componenti dell'azione sismica, la selezione con REXEL avviene secondo due passi successivi: dapprima si ricercano le combinazioni compatibili relativamente alla componente orizzontale in maniera del tutto analoga a quanto fatto negli esempi precedenti; successivamente, il programma analizza le combinazioni trovate e ne verifica la spettro-compatibilità media anche relativamente alla componente verticale, chiedendo

all'utente di specificare anche per tale componente i vincoli di tolleranza con lo spettro target e l'intervallo di periodi di interesse. Anche in questo caso è possibile selezionare l'opzione di "adimensionalizzazione".

Si consideri ancora il sito di S. Angelo dei Lombardi e l'azione sismica per vita nominale 50 anni, classe d'uso II, suolo A e SLV. Specificando come intervallo di magnitudo [6, 7] e come intervallo di distanza [0 km, 50 km], si trovano 52 gruppi di accelerogrammi (19 eventi). Assegnando una tolleranza di compatibilità della media del 10% inferiore e del 30% superiore per le componenti orizzontali e del 10% inferiore e del 60% superiore per la componente verticale, nell'intervallo di periodi 0.15 s ÷ 2 s (componenti orizzontali) e 0.15 s ÷ 1 s (componente verticale), il software trova 22717 combinazioni compatibili con lo spettro di riferimento orizzontale e di



queste 631 combinazioni sono compatibili anche con lo spettro di riferimento verticale, tra cui quella in Figura 14.

Infine si noti che nel cercare combinazioni che includano la componente verticale può non essere opportuno utilizzare l'opzione di ricerca rapida data la maggiore difficoltà nel trovare combinazioni compatibili per la componente verticale. Non è detto, infatti, che la prima combinazione compatibile con lo spettro orizzontale restituita dal software verifichi anche la compatibilità con lo spettro verticale.

### 5.2 Esempio 2 - L'Ospedale del Mare

L'Ospedale del Mare, attualmente in costruzione a Napoli, è l'edificio con isolamento sismico più grande d'Europa. Esso ha una

pianta a geometria quadrata con lato pari a circa 150 m; l'altezza massima dell'edificio è pari a circa 30 m (Di Sarno et al., 2006). Il sistema sismico utilizzato per la struttura che ha un peso sismico di  $10^5$  tonnellate è costituito da 327 isolatori circolari che determinano un periodo equivalente di circa 2 s. Viste le caratteristiche della struttura si può considerare una classe d'uso IV e una vita nominale di 100 anni. Assumendo come stato limite di interesse quello di operatività si ottiene un periodo di ritorno di circa 120 anni. In Figura 15 accanto ad un'immagine del cantiere si riporta la disaggregazione di  $a_g$  (in termini di M e R) così come desunta dal sistema WebGIS (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>) per un periodo di ritorno di 140 anni, che è il valore più vicino a

Fig. 14  
Esempio di combinazione tridimensionale (non scalata) per il sito di S. Angelo dei Lombardi (AV).

120 disponibile. In essa la coppia modale è vicina a magnitudo 5 a 5 km, mentre un secondo picco, che da un contributo molto piccolo alla pericolosità, è relativo a terremoti di magnitudo intorno a 7 e molto più distanti. Si è discusso già come considerando lo studio di Figura 5 a riferimento per la disaggregazione, si nota che per  $T_R = 120$  anni i valori predominanti la  $a_g$  in termini di magnitudo e distanza corrispondano a 5.8 e 7 km, mentre per la accelerazione spettrale a 2 s, di maggiore interesse per la struttura in esame, magnitudo 6.8 e 70 km danno un contributo altrettanto forte alla pericolosità.

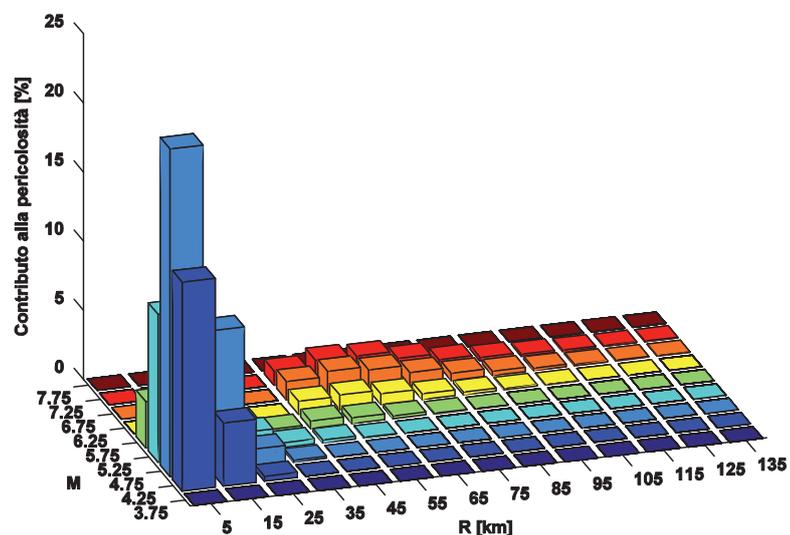
Vale la pena qui sottolineare che i valori modali relativi ad  $a_g$  ottenuti confrontando Figura 15 con Figura 5 non sono gli stessi, sebbene gli andamenti generali coincidano. Questo sia perché i dati sono relativi a due studi diversi della pericolosità per il sito

(anche i  $T_R$  non coincidono perfettamente), sia perché le distribuzioni marginali, per costruzione, possono avere valori di picco diversi dalle congiunte da cui sono derivate.

Si supponga di voler selezionare combinazioni per analisi spaziali che riflettano i valori modali individuati nelle distribuzioni marginali (Fig. 5) della disaggregazione della pericolosità al periodo fondamentale della struttura.

Con le coordinate geografiche del sito ( $14.3446^\circ$  lon.,  $40.8516^\circ$  lat.) e specificando la condizione geologica di tipo B, il software restituisce lo spettro di riferimento. Specificando come intervallo per la magnitudo [5.2, 6.4] e per la distanza 0 km ÷ 14 km ovvero intervalli centrati sui primi valori modali della disaggregazione di  $S_a(2\text{ s})$ , si ottengono 39 coppie di accelerogrammi provenienti da 25 eventi diversi. Assegnando una tolleranza di compatibilità del 10% inferiore e del 30%

Fig. 15  
Immagine del cantiere dell'Ospedale del Mare e disaggregazione della pericolosità sismica per il valore di  $a_g$  con periodo di ritorno  $T_R = 140$  anni (INGV).



superiore nell'intervallo di periodi  $0.15 \text{ s} \div 2.47 \text{ s}$ , il software non trova nessuna combinazione di spettri non scalati compatibile. Se, invece, si seleziona l'opzione di "adimensionalizzazione", grazie alla funzione di ricerca rapida "mi sento fortunato", si ottiene immediatamente la combinazione di accelerogrammi in Figura 16. Per trovare una combinazione non scalata compatibile è necessario rilassare le tolleranze di compatibilità con lo spettro di riferimento; ad esempio, assegnando una tolleranza superiore del 40% e senza modificare le altre opzioni di ricerca, si ottiene la combinazione di accelerogrammi in Figura 17. Le informazioni sui valori medi di magnitudo e distanza e sui fattori di scala, si trovano in Tabella 4.

Impostando l'intervallo di magnitudo  $6.2 \div 7.4$  e di distanza  $50 \text{ km} \div 90 \text{ km}$  (ovvero intervalli all'incirca centrati sui secondi valori modali della disaggregazione di  $S_a$  al periodo fondamentale della struttura), si trovano nel data-

base 26 coppie di spettri provenienti da 18 eventi. Con le stesse tolleranze del caso precedente (10% inferiore e 30% superiore nell'intervallo di periodi  $0.15 \text{ s} \div 2.47 \text{ s}$ ) e selezionando ancora l'opzione di "adimensionalizzazione", il programma restituisce la combinazione di Figura 18.

Per trovare una combinazione non scalata compatibile anziché rilassare le tolleranze di compatibilità con lo spettro di riferimento, si è scelto di aumentare esclusivamente l'intervallo di distanza aumentando di conseguenza il numero di accelerogrammi da analizzare (da 26 coppie – corrispondenti a 18 eventi – a 57 coppie provenienti da 23 eventi diversi). Grazie alla funzione "mi sento fortunato", in pochi istanti il programma restituisce la combinazione di Figura 19, i cui accelerogrammi sono ben raccolti rispetto allo spettro target senza necessitare di essere scalati. Anche in questo caso le informazioni sui valori medi di magnitudo e distanza e sui fattori di scala, si trovano in Tabella 4.

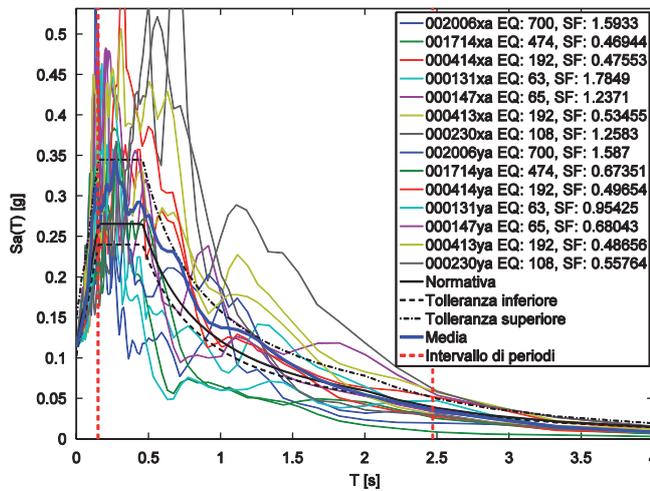


Fig. 16  
Combinazione scalata che riflette la prima coppia modale della disaggregazione di  $S_a(2 \text{ s})$  con periodo di ritorno 120 anni per la località Ponticelli (Napoli).

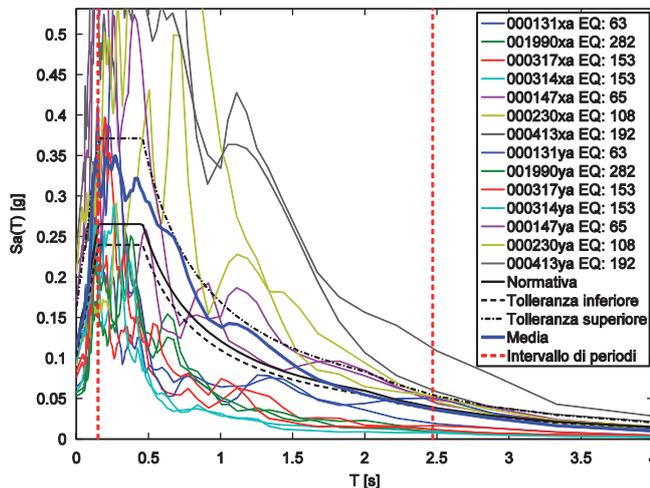


Fig. 17  
Combinazione non scalata che riflette la prima coppia modale della disaggregazione di  $S_a(2 \text{ s})$  con periodo di ritorno 120 anni per la località Ponticelli (Napoli).

Fig. 18  
Combinazione scalata che riflette la seconda coppia modale della disaggregazione di  $Sa(2s)$  con periodo di ritorno 120 anni per la località Ponticelli (Napoli).

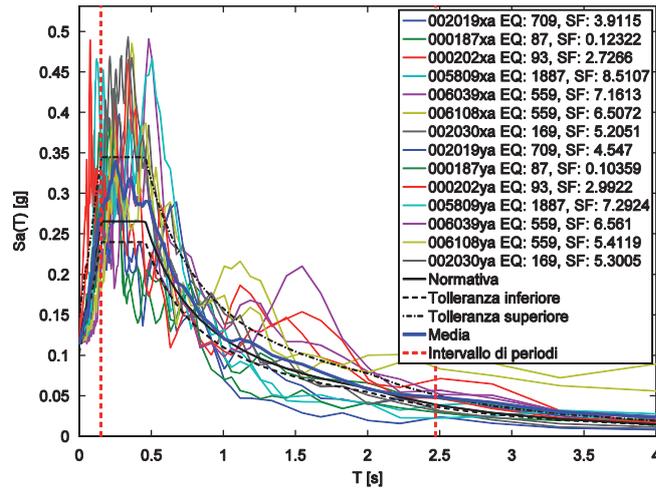


Fig. 19  
Combinazione non scalata che riflette la seconda coppia modale della disaggregazione di  $Sa(2s)$  con periodo di ritorno 120 anni per la località Ponticelli (Napoli).

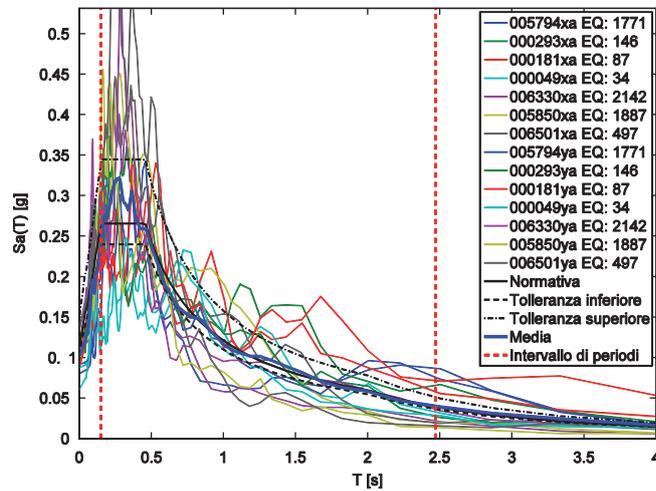


Tabella 4 - Informazioni sulle combinazioni presentate per l'Ospedale del Mare

Combinazione	$M_{media}$	$R_{media}$ [km]	$SF_{medio}$
Basata sulla prima coppia modale della disaggregazione di $Sa(2 s)$ (non scalata)	5.7	9.7	-
Basata sulla prima coppia modale della disaggregazione di $Sa(2 s)$ (scalata)	5.9	12.1	0.91
Basata sulla seconda coppia modale della disaggregazione di $Sa(2 s)$ (non scalata)	6.9	45.9	-
Basata sulla seconda coppia modale della disaggregazione di $Sa(2 s)$ (scalata)	6.7	71.1	4.7

### 6. Confronto tra OPCM e NTC per la selezione di accelerogrammi

Attraverso il codice sviluppato si possono anche confrontare OPCM 3431 e NTC per quanto riguarda la possibilità di trovare combinazioni di accelerogrammi reali per la analisi non lineare delle strutture. Si è visto in Figura 7 come lo spettro di risposta elastico determinato con la OPCM per il sito di Sant'Angelo dei Lombardi fosse significativamente sovradimensionato rispetto alla pericolosità al

sito secondo lo studio INGV. Inoltre, l'OPCM 3274, come anche l'Eurocodice 8, consentiva di utilizzare accelerogrammi naturali per l'analisi strutturale a condizione che l'ordinata spettrale media, di almeno sette registrazioni, non presentasse uno scarto in difetto superiore al 10%, rispetto alla corrispondente dello spettro elastico, in alcun punto dell'intervallo di periodi  $0.15 s \div 2.0 s$  e  $0.15 s \div 2T$  (questi limiti sono riferiti alla OPCM 3274 leggermente diversi da quelli dell'Eurocodice). Per il

sito in esame (classificato in Zona I), indipendentemente dal tipo di suolo, non era possibile trovare combinazioni di accelerogrammi non scalati che rispettassero tali prescrizioni di normativa ed in particolare il limite inferiore del 10% (Iervolino et al., 2007).

Per valutare le differenze tra i criteri di selezione, le stesse analisi eseguite in Iervolino et al. (2007) per la OPCM sono state ripetute per le NTC con REXEL 2.0 beta rispetto allo spettro SLV orizzontale. In Tabella 5 si riportano le combinazioni di accelerogrammi, non scalati, trovate utilizzando gli spettri di riferimento per Sant'Angelo dei Lombardi secondo le due

norme e per ciascuna categoria di suolo.

Sebbene, nel caso delle analisi per le NTC, si sia limitato il numero di combinazioni da analizzare considerando solo segnali sismici con magnitudo superiore a 5.8 e con distanza epicentrale ridotta (riportata accanto al numero di combinazioni trovate in tabella), mentre in Iervolino et al. (2007) non c'era alcuna limitazione sulla distanza, i risultati mostrano chiaramente come la nuova norma faciliti la selezione degli accelerogrammi. Infatti, le combinazioni trovate secondo le NTC sono sempre di diversi ordini di grandezza superiori in numero rispetto alla OPCM.

Tabella 5 - Confronto di combinazioni trovate per analisi spaziali tra OPCM e NTC per il sito di Sant'Angelo dei Lombardi (AV)

Suolo	Limite inferiore [%]	Limite superiore [%]	OPCM	NTC
A	30	100	15	24290 [0 km, 20 km]
B	20	100	1256	29900 [10 km, 60 km]
C	40	100	2	1770 [0 km, 20 km]

## 7. Conclusioni

Il lavoro presentato ha dapprima discusso le possibili strategie di selezione dell'input sismico in termini di accelerogrammi reali alla luce dei criteri di definizione delle azioni delle recenti Norme Tecniche per le Costruzioni e basati sullo studio di pericolosità dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia. Successivamente si è presentato uno strumento software per la selezione guidata di combinazioni di sette registrazioni accelerometriche, scalate e non, che rispettino vincoli di compatibilità della media con gli spettri definiti secondo la norma per l'analisi di strutture piane e spaziali relativamente a qualunque stato limite. Il programma, disponibile gratuitamente presso il sito del Consorzio della Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (ReLUIs), consente molteplici opzioni di selezione in modo da specificare non solo i criteri di compatibilità media ma anche eventuali condizioni di evento dominante per qualunque delle tre componenti dell'azione sismica.

Attraverso il software si è mostrato anche come la nuova norma faciliti e renda più razionale la selezione di accelerogrammi per

l'analisi dinamica rispetto alle precedenti norme nazionali i cui criteri erano desunti da codici tutt'ora adottati a livello internazionale (sebbene vada comunque precisato che tali prescrizioni meno raffinate sono in qualche modo accettabili per quei paesi, la maggioranza, dove non si dispone di uno studio dettagliato come quello INGV per l'Italia).

Dagli esempi sviluppati si evince, infine, che, soprattutto grazie alla definizione dell'azione sismica sulla base della pericolosità probabilistica, la selezione di combinazioni compatibili è particolarmente rapida in molti casi. Le combinazioni trovate, soprattutto del tipo da scalare caratterizzate da una contenuta variabilità degli spettri rispetto a quello di riferimento, possono essere selezionate anche senza tenere in eccessiva considerazione la magnitudo e la distanza provenienti dalla disaggregazione. Questo perché è stato dimostrato che, entro certi limiti, la risposta strutturale non lineare è indipendente da queste grandezze una volta rispettata una certa forma spettrale nell'intervallo di periodi di interesse. È tuttavia consigliato di validare sempre i risultati ottenuti dalla selezione sulla base delle peculiarità del caso in esame.

## Crediti

Gli autori intendono ringraziare Franco Braga e il revisore anonimo per le utili precisazioni sulla evoluzione

delle normative e della valutazione della pericolosità in Italia. Lo studio qui presentato è stato sviluppato nell'ambito del progetto triennale, 2005/2008, ReLUIs - DPC.

## Bibliografia

- Ambraseys N., Smit P., Berardi R., Rinaldis D., Cotton F., Berge C. (2000). "Dissemination of European Strong-Motion Data" (CD-ROM collection). *European Commission, DGXII, Science, Research and Development, Bruxelles*.
- Ambraseys N.N., Douglas J., Rinaldis D., Berge-Thierry C., Suhadolc P., Costa G., Sigbjornsson R., Smit P. (2004). "Dissemination of European strong-motion data", Vol. 2, CD-ROM Collection, *Engineering and Physical Sciences Research Council, United Kingdom*.
- CEN, European Committee for Standardisation (2003). "Eurocode 8: Design Provisions for Earthquake Resistance of Structures, Part 1.1: General rules, seismic actions and rules for buildings", PrEN1998-1.
- Bazzurro P., Cornell C.A. (1999). "Disaggregation of Seismic Hazard", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 89, No. 2, pp. 501-520.
- Convertito V., Iervolino I., Herrero A. (2008). "The importance of mapping design earthquakes: insights for southern Appennines, Italy.", *in preparazione*.
- Cosenza E. (2007). "Normativa e progettazione sismica: c'è del nuovo in Italia?", *Atti del workshop Materiali ed approcci innovativi per il progetto in zona sismica e la mitigazione della vulnerabilità delle strutture*, Salerno, C. Faella, G. Manfredi, V. Piluso, R. Realfonzo editors, Polimetrica International Scientific Publisher.
- Cornell C.A. (1968). "Engineering seismic risk analysis", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 58, No. 5, pp. 1583-1606.
- Di Sarno L., Cosenza E., De Risi B., Mascolo C. (2006). "Application of base isolation to a new building of Naples", *Proceedings of the World Conference on Structural Control*, San Diego, Paper n.173 (CD-ROM).
- Iervolino I., Cornell C.A. (2004). "Sulla Selezione degli Accelerogrammi nella Analisi Non Lineare delle Strutture", atti XI *Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, Genova.
- Iervolino I., Cornell C.A. (2005). "Record selection for nonlinear seismic analysis of structures", *Earthquake Spectra*, Vol. 21, No. 3, pp. 685-713.
- Iervolino I., Maddaloni G., Cosenza E. (2007). "Accelerogrammi naturali compatibili con le specifiche dell'OPCM 3431 per l'analisi sismica delle strutture", atti XII *Convegno Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia"*, Pisa.
- Iervolino I., Maddaloni G., Cosenza E. (2008). "Eurocode 8 compliant real record sets for seismic analysis of structures", *Journal of Earthquake Engineering*, 12(1): 54-90.
- Iervolino I., Manfredi G. (2008). "A review of ground motion record selection strategies for dynamic structural analysis", in *New Approaches to Analysis and Testing of Mechanical and Structural Systems*, Springer. (in corso di stampa)
- Meletti C., Montaldo V. (2007). "Stime di pericolosità sismica per diverse probabilità di superamento in 50 anni: valori di  $a_g$ ". *Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D2*, <http://esse1.mi.ingv.it/d2.html>.
- Min.LL.PP, DM 14 gennaio, (2008a). "Norme Tecniche per le Costruzioni", *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 29.
- Montaldo V., Meletti C. (2007). "Valutazione del valore della ordinata spettrale a 1 sec e ad altri periodi di interesse ingegneristico". *Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D3*, <http://esse1.mi.ingv.it/d3.html>.
- Min.LL.PP, (2008b). "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche delle costruzioni", Ministero delle infrastrutture (bozza).
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (OPCM) n.3274, (2003). "Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici", *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 105.
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (OPCM) n.3431, (2005). "Ulteriori modifiche ed integrazioni all'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274, 2005", *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 107.
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (OPCM) n.3519, (2006). "Criteri per l'individuazione delle zone sismiche e la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone", *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 108.
- Spallarossa D., Barani S. (2007). "Disaggregazione della pericolosità sismica in termini di M-R-ε". *Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D14*, <http://esse1.mi.ingv.it/d14.html>.