

# REXEL 2.2 BETA: UNO STRUMENTO PER LA SELEZIONE DI ACCELEROGRAMMI NATURALI PER LE NTC E L'EUROCODICE 8

IUNIO IERVOLINO, CARMINE GALASSO,  
EDOARDO COSENZA  
Università degli Studi di Napoli Federico II

## SUMMARY

*Non-linear dynamic analysis is recognized as the more accurate tool for seismic evaluation of structures in the case of both probabilistic assessment and design. The key issue in performing this kind of analysis is the selection of appropriate seismic input (e.g., real records), which should allow for a correct and accurate estimation of the seismic performance on the basis of the seismic threat at the site where the structure is located. In this paper, the prescriptions of the new Italian building code and of the Eurocode 8 on the topic are briefly reviewed and a tool for computer-aided real record selection is presented. The software, available at <http://www.reluis.it/>, allows to define the design spectra according to the two codes for any site in Italy and to search for sets of 7 records compatible, in the average, with them.*

## 1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni la ricerca ha messo a punto procedure relativamente semplici per l'analisi dinamica non lineare della risposta strutturale facendo uso di segnali accelerometrici [01]. Gli accelerogrammi naturali sono una scelta sempre più frequente perché più facilmente disponibili e perché non richiedono competenze specifiche come quelle necessarie alla generazione di accelerogrammi simulati e artificiali che siano appropriati per il caso in esame.

In generale, l'elemento 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 [02], le caratteristiche del terremoto, in termini ad esempio di magnitudo e distanza dalla sorgente, che più influenzano la regione dello spettro di

maggiore interesse per il comportamento dinamico della struttura che si sta analizzando.

Successivamente il professionista seleziona gli accelerogrammi in modo che essi riflettano tali caratteristiche oltre che essere *compatibili* con lo spettro di riferimento. Infine, se nella maggioranza delle analisi della struttura soggetta ai segnali selezionati si osserva il raggiungimento del collasso, si può dedurre che lo stato limite non è verificato per questo tipo di moto al suolo.

Questa procedura sembra pressoché attuabile nell'ambito delle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (di seguito NTC) [03] in cui l'azione sismica di riferimento è definita sulla base delle stime di pericolosità sismica per il territorio nazionale realizzate dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) con il Progetto S1 (<http://esse1.mi.ingv.it>). Tra le novità più importanti delle NTC vi è che per la prima volta tale azione sismica non viene definita sulla base della classificazione del territorio in zone (a ognuna delle quali era associato uno spettro di progetto standard), ma è determinata per ogni sito in Italia secondo una griglia regolare di nodi (con passo di 5 km, per un totale di oltre 10000 nodi). Per ogni nodo il Progetto S1 ha calcolato le curve di pericolosità sismica in termini di picco di accelerazione al suolo e di ordinate spettrali relative a 10 periodi tra 0.15s e 2s, su roccia. Inoltre, il sito del progetto fornisce anche i valori di disaggregazione per la *peak ground acceleration* (PGA) in termini di magnitudo, distanza ed *epsilon*. In sostanza, nelle NTC l'azione sismica è definita in forma di spettri elastici dipendenti dal sito e strettamente legati alla pericolosità stessa; essi, in buona approssimazione, coincidono con gli spettri a pericolosità uniforme che si possono ottenere dalle suddette curve di pericolosità [04].

L'azione sismica definita secondo l'Eurocodice 8 (EC8) [05], invece, riflette la pericolosità sismica attraverso il valore di ancoraggio dello spettro che dipende dall'hazard in termini di PGA al sito.

In questo lavoro si descrivono brevemente le prescrizioni delle NTC e dell'Eurocodice 8 riguardo alla scelta dell'input sismico per poi mostrare, con l'aiuto di alcuni casi applicativi, uno strumento software sviluppato per la selezione automatica di combinazioni di accelerogrammi naturali *compatibili* con gli spettri delle due normative.

## 2. IMPIEGO DI ACCELEROGRAMMI SECONDO LE NTC

Le NTC discutono la analisi dinamica non lineare delle strutture al punto § 7.3.4.2, riferendosi alla sezione § 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, in alcun punto del maggiore tra gli intervalli  $0.15s \div 2.0s$  e  $0.15s \div 2T$  (in cui  $T$  è il periodo fondamentale di vibrazione della struttura in campo elastico) per le verifiche agli stati limite ultimi, e  $0.15s \div 1.5T$ , 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.

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.

Queste indicazioni sono compatibili con la scelta degli accelerogrammi reali a seguito della disaggregazione della pericolosità sismica e del successivo *scaling* per renderli coincidenti con lo spettro di riferimento. Tuttavia, 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 l'accelerazione di picco (riferita a suoli rigidi) 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 disaggregazione relativamente alla parte dello spettro di interesse per la struttura in esame [04]. Inoltre, alcuni studi hanno dimostrato che, in alcune ipotesi, rispettare magnitudo e distanza provenienti dalla disaggregazione può non essere strettamente

necessario per una corretta stima della risposta strutturale [06].

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 [07]. Nelle istruzioni per l'applicazione delle norme tecniche 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.

## 3. IMPIEGO DI ACCELEROGRAMMI SECONDO L'EC8

La differenza più significativa tra NTC ed EC8 è che la forma spettrale in quest'ultimo caso è standard per ogni categoria di suolo e dipende dal sito solo per il valore di ancoraggio, mentre le NTC di fatto definiscono spettri completamente sito-dipendenti e praticamente coincidenti con gli spettri a pericolosità uniforme.

Dal punto di vista dei criteri per la selezione, secondo l'EC8, un set di accelerogrammi, sia esso composto di records reali, artificiali o simulati, deve rispettare i seguenti criteri:

- a) il set deve essere composto da almeno 3 gruppi di segnali (intendendo per gruppo 1, 2 o 3 componenti del terremoto, a seconda di quante direzioni del moto sono necessarie per il caso in esame);
- b) la media delle ordinate spettrali valutate per  $T=0s$  non deve essere minore del valore dell'ordinata dello spettro elastico di normativa calcolata per lo stesso periodo;
- c) l'ordinata spettrale media della combinazione non deve essere minore del 90% di quella dello spettro elastico di normativa in nessun punto dell'intervallo di periodi compreso tra  $0.2T$  e  $2.0T$  con  $T$  periodo fondamentale di vibrazione della struttura.

Si noti che l'Eurocodice non consente la stessa libertà nella scelta e manipolazione degli accelerogrammi reali che invece è propria delle NTC. Una più approfondita discussione dei criteri forniti dall'EC8 in merito alla selezione di accelerogrammi si può trovare in [01].

#### 4. REXEL 2.2 beta

Si è discusso 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 strettamente necessarie e/o non 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 (Figura 1) per la ricerca di combinazioni di accelerogrammi compatibili in media con spettri di riferimento e che possono, eventualmente, rispecchiare caratteristiche di sorgente di interesse in termini di magnitudo e distanza epicentrale.

REXEL 2.2 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 [08] [09].

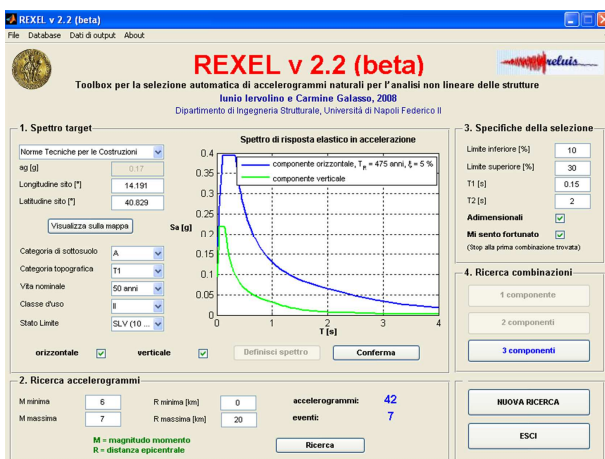


Figura 1. Immagine dell'interfaccia utente della versione beta del software

La ricerca di combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con un dato spettro di

riferimento avviene secondo pochi passi successivi, descritti nel seguito.

#### Definizione dello spettro di normativa (spettro target)

È necessario innanzitutto costruire lo spettro di risposta elastico in accelerazione per il sito di interesse. A tale scopo, nel caso si voglia effettuare la selezione secondo le NTC, è necessario inserire le coordinate geografiche del sito, *longitudine* e *latitudine*, in gradi decimali e specificare, attraverso menù a tendina, costruiti in accordo alle prescrizioni di normativa, *Categoria di sottosuolo*, *Categoria topografica*, *Vita nominale*, *Classe d'uso* e *Stato limite*.

Nel caso dell'EC8 è necessario specificare unicamente il valore di ancoraggio dello spettro,  $a_g$ , e la categoria di sottosuolo di riferimento. Il valore di  $a_g$  può essere definito manualmente dall'utente o, nel caso di siti sul territorio nazionale, può essere ricavato automaticamente a partire dalle coordinate geografiche del sito (i valori di  $a_g$  a cui si fa riferimento sono ancora quelli del Progetto S1).

Una terza alternativa consiste nella possibilità di utilizzare uno spettro di progetto completamente definito dall'utente.

È necessario inoltre specificare la componente dell'azione sismica che si intende considerare. Le due componenti ortogonali indipendenti che descrivono il moto orizzontale (X e Y) sono caratterizzate dallo stesso spettro di risposta, mentre la componente che descrive il moto verticale (Z) è caratterizzata da uno specifico spettro. È possibile selezionare contemporaneamente X-Y e Z per la ricerca di combinazioni spaziali del moto.

Nel caso le coordinate specificate non cadano in un nodo del reticolo di riferimento del progetto S1, i valori dei parametri utili a definire lo spettro elastico in accelerazione 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.

#### Ricerca nel database degli accelerogrammi da considerare nell'analisi

È possibile selezionare nel database ESD (e incorporato in REXEL) gli accelerogrammi che rispondono ad una determinata coppia magnitudo/distanza epicentrale di interesse (ad

esempio sulla base delle caratteristiche del terremoto rilevanti per il sito in esame ottenute dalla disaggregazione della pericolosità). A tale scopo è necessario specificare gli intervalli  $[M_{\min}, M_{\max}]$  (magnitudo momento) e  $[R_{\min}, R_{\max}]$  (in chilometri) nei quali si vuole che cadano gli accelerogrammi. Una volta forniti tali valori il software restituisce il numero di records disponibili in questi intervalli e tra cui opererà la successiva selezione. A tal proposito si sottolinea che è stata applicata una selezione preliminare escludendo dal database quelle registrazioni in cui non erano presenti tutte le tre componenti del moto; inoltre, si è scelto di considerare solo gli eventi caratterizzati da una magnitudo momento almeno pari a 4.

#### **Definizione delle specifiche della selezione**

È necessario, infine, specificare la tolleranza con cui lo spettro medio della combinazione deve rispettare il target in un arbitrario intervallo  $[T_1, T_2]$  di periodi, comunque compreso tra 0s e 4s. Più precisamente, è necessario specificare la sottostima (*Limite inferiore*) e la sovrastima (*Limite superiore*) massime (in termini percentuali) dello spettro medio della combinazione rispetto allo spettro di riferimento e l'intervallo di periodi  $[T_1, T_2]$  (in secondi) di interesse. L'EC8, ad esempio, indica esplicitamente che il valore dell'ordinata spettrale media degli accelerogrammi non deve presentare uno scarto in difetto superiore al 10% (limite inferiore) ma non fornisce nessuna indicazione circa il limite superiore. È economicamente conveniente cercare di ridurre il più possibile anche la sovrastima dello spettro.

REXEL 2.2 beta consente di effettuare analisi mirate ad ottenere combinazioni di accelerogrammi compatibili con lo spettro di normativa 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. Se si sceglie questa seconda via, è necessario selezionare l'opzione *Adimensionali* e specificare il massimo fattore di scala medio che si desidera utilizzare (mediante una finestra di dialogo che si apre automaticamente all'avvio dell'analisi). Ciò, come già dimostrato in [01], consente di ottenere combinazioni i cui spettri sono simili rispetto a quello target e quindi più raccolti attorno ad esso.

È anche possibile inoltre selezionare l'opzione *Mi sento fortunato* per far sì che la ricerca si fermi subito dopo aver trovato la prima combinazione compatibile. Ciò fa sì che, nella maggior parte dei casi, si ottenga immediatamente una

combinazione compatibile con lo spettro secondo i criteri specificati, altrimenti la ricerca di tutte le combinazioni compatibili potrebbe durare molto a lungo.

#### **Ricerca delle combinazioni**

Se non si è selezionata l'opzione *Mi sento fortunato* è possibile analizzare tutte le possibili combinazioni di sette spettri che si possono costruire a partire dai record trovati nel database per gli intervalli definiti di magnitudo e distanza al fine di verificarne la compatibilità media con lo spettro di normativa.

Il numero massimo di combinazioni compatibili da trovare (dopodiché la ricerca si ferma) può essere specificato dall'utente mediante una finestra di dialogo che si apre automaticamente all'avvio dell'analisi. La scelta di limitare il numero di combinazioni permette di rendere più agevole la successiva analisi dei risultati.

Le combinazioni compatibili da ricercare possono essere formate da:

- 7 accelerogrammi da applicare in una sola direzione (orizzontale e/o verticale) per analisi piane;
- 7 coppie di accelerogrammi da applicare nelle due direzioni orizzontali per analisi spaziali;
- 7 gruppi di accelerogrammi (per analisi spaziali) che includono le due componenti orizzontali più la componente verticale delle registrazioni.

Nel caso di analisi spaziali, dove si applicano tutte e tre le componenti dell'azione sismica, la selezione automatica avviene secondo due passi successivi: dapprima vengono cercate le combinazioni compatibili relativamente alla componente orizzontale dello spettro (7 coppie); successivamente, il programma analizza le combinazioni trovate e ne verifica la spettro compatibilità anche relativamente alla componente verticale, chiedendo di specificare – attraverso una finestra di dialogo che si apre automaticamente – anche per tale componente i vincoli di tolleranza con lo spettro target e l'intervallo di periodi di interesse.

La lista di records tra cui cercare combinazioni è preliminarmente ordinata dal programma in modo che all'inizio siano analizzati gli accelerogrammi i cui spettri sono meno dispersi rispetto al target secondo il parametro [01] definito in Eq. 1.

$$\delta_i = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Sa_j(T_i) - Sa_{target}(T_i)}{Sa_{target}(T_i)}} \quad 1$$

$Sa_j(T_i)$  rappresenta l'ordinata dello spettro di pseudo-accelerazione dell'accelerogramma  $j$ -esimo in corrispondenza del periodo  $T_i$  mentre  $Sa_{target}(T_i)$  è il valore dell'ordinata spettrale letta sullo spettro elastico di riferimento, in corrispondenza dello stesso periodo;  $N$  è il numero di punti in cui è discretizzato lo spettro nell'intervallo di periodi specificato.

### Gestione dell'output

Il programma restituisce una lista delle combinazioni 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 (grazie al preliminare ordinamento dei records in base ai  $\delta_j$ ).

Per tutte le combinazioni trovate è possibile calcolare la deviazione di ciascun accelerogramma della combinazione rispetto allo spettro target (Eq. 1) e la deviazione dello spettro medio della combinazione rispetto allo spettro elastico target (Eq. 2).

$$\delta_{medio} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Sa_{medio}(T_i) - Sa_{target}(T_i)}{Sa_{target}(T_i)}} \quad 2$$

dove  $Sa_{medio}(T_i)$  rappresenta l'ordinata dello spettro di pseudo-accelerazione reale medio (della combinazione) in corrispondenza del periodo  $T_i$ .

Le combinazioni della lista sono univocamente identificate da un numero progressivo; è possibile utilizzare tale codice per visualizzare graficamente una qualsiasi combinazione e ottenere automaticamente gli accelerogrammi della combinazione (menù *Dati di output > Plot & Get records*).

Per ciascuna combinazione, il software può restituire le informazioni sui singoli accelerogrammi ottenute dallo ESD (insieme ai valori medi di magnitudo e distanza della combinazione); nel caso di combinazioni adimensionali, vengono forniti anche i fattori di scala (SF) dei singoli accelerogrammi ed il fattore di scala medio della combinazione.

La voce *Dati di output > Diversi2* nella barra dei menù permette di cercare nella lista di output, coppie di combinazioni (2 gruppi di 7) formate da

accelerogrammi tutti provenienti da eventi diversi. In alcuni casi, infatti, può essere utile aver più di un set che non abbiano accelerogrammi provenienti dagli stessi terremoti in maniera tale che la successiva analisi strutturale non sia condizionata da pochi eventi dominanti.

Infine, l'opzione *Dati di output > Diversi3* nella barra dei menù permette di cercare nella lista di output, gruppi costituiti da tre combinazioni (3 gruppi di 7) che non hanno alcun accelerogramma in comune.

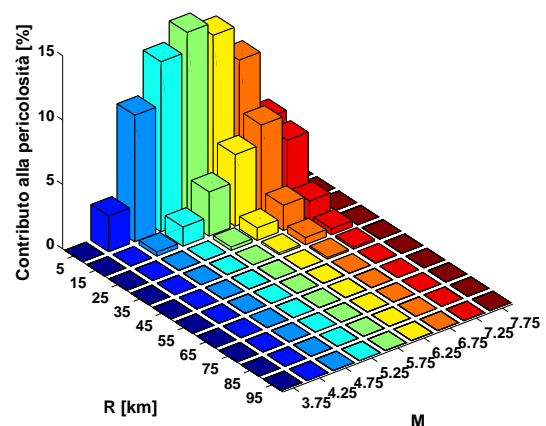
Nel seguito, attraverso alcuni esempi illustrativi, si mostra lo strumento sviluppato e come la nuova norma generalmente faciliti la selezione degli accelerogrammi per la analisi dinamica non lineare delle strutture.

## 5. ESEMPI

### 5.1. SELEZIONE SECONDO LE NTC

A titolo di esempio, si supponga di voler selezionare accelerogrammi orizzontali a partire dallo spettro delle NTC per 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) e con riferimento allo stato limite di salvaguardia della vita (SLV).

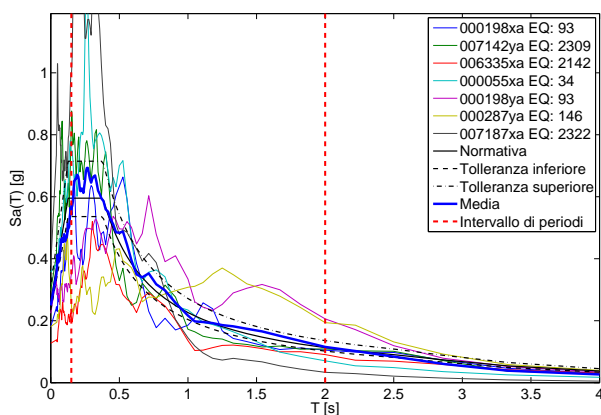
In *Figura 2* si riporta la disaggregazione della PGA con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni su roccia ottenuta dal sito web del progetto S1. Impostando le coordinate geografiche (15.1784° lon., 40.8931° lat.) e i suddetti parametri che permettono di definire l'azione sismica secondo le NTC, il software restituisce lo spettro di riferimento.



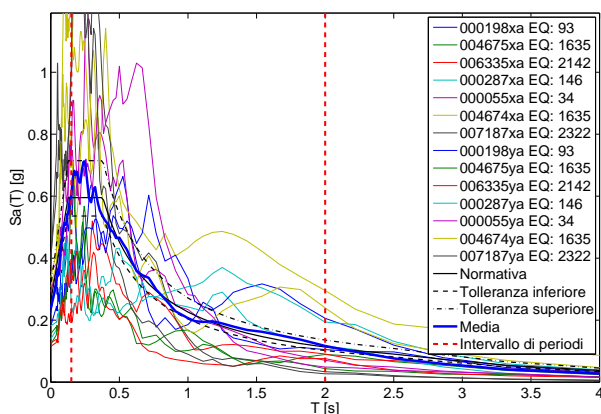
**Figura 2.** Disaggregazione della pericolosità in termini di PGA con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni per S. Angelo dei Lombardi

Si supponga, inoltre, di voler selezionare gli accelerogrammi intorno alle magnitudo più grandi che contribuiscono alla disaggregazione della pericolosità sismica per il sito in esame a distanze relativamente piccole dalla sorgente, si veda [04] per ulteriori dettagli. Specificando come intervallo per la magnitudo [5.6,7] e per la distanza 0km ÷ 30km, REXEL 2.2 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 0.15s ÷ 2s e selezionando l'opzione di ricerca rapida, si ottengono immediatamente le combinazioni di accelerogrammi in *Figura 3* e *Figura 4*.



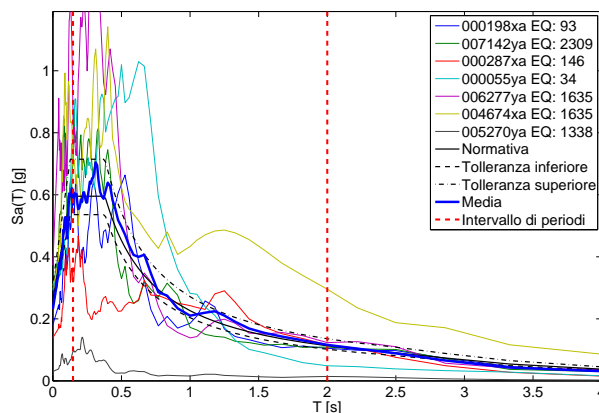
**Figura 3.** Prima combinazione NTC non scalata per analisi di strutture piane in Sant'Angelo dei Lombardi (AV) [ $M_{media} = 6.6$ ,  $R_{media} = 20.7$ km]



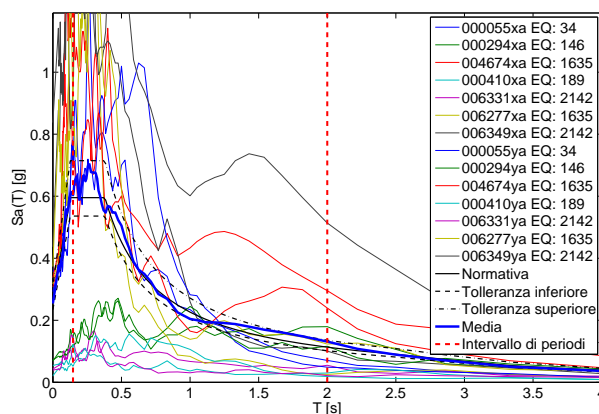
**Figura 4.** Prima combinazione NTC non scalata per analisi di strutture spaziali in Sant'Angelo dei Lombardi (AV) [ $M_{media} = 6.6$ ,  $R_{media} = 18.3$ km]

Se non si seleziona l'opzione *Mi sento fortunato*, limitando per semplicità a 1000 il numero massimo di combinazioni da trovare, il software trova (in poco più di un minuto con un normale *personal computer*) 1000 combinazioni

compatibili per analisi piane e (in pochi minuti) 520 combinazioni compatibili per analisi spaziali. In *Figura 5* e in *Figura 6* sono riportate le ultime combinazioni restituite da REXEL nei due casi.



**Figura 5.** Ultima combinazione NTC non scalata per analisi di strutture piane in Sant'Angelo dei Lombardi (AV) [ $M_{media} = 6.5$ ,  $R_{media} = 18$ km]

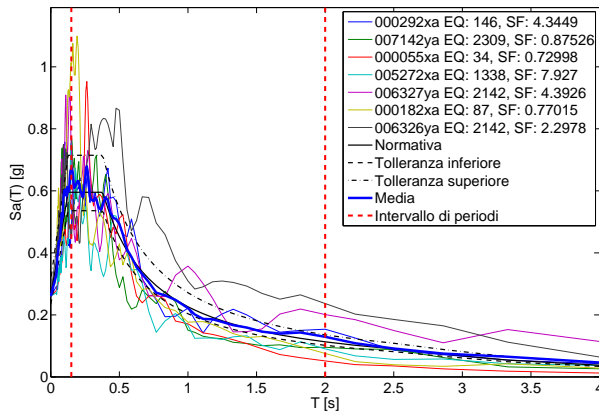


**Figura 6.** Ultima combinazione NTC non scalata per analisi di strutture spaziali in Sant'Angelo dei Lombardi (AV) [ $M_{media} = 6.5$ ,  $R_{media} = 17.9$ km]

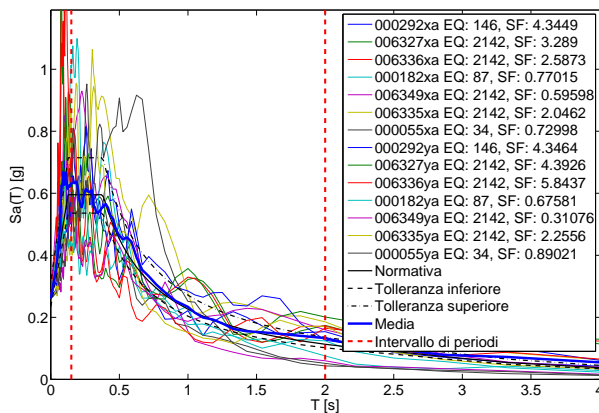
Come si vede dalle figure e come già sottolineato, l'ordinamento degli accelerogrammi in base al  $\delta_j$  consente di ottenere all'inizio combinazioni che hanno i singoli spettri poco dispersi rispetto allo spettro target se confrontate con le ultime.

Tuttavia dai risultati presentati, si evince che lo scostamento del singolo spettro rispetto a quello target può essere ancora grande (ad esempio in *Figura 4*). Per aumentare il numero di combinazioni tra cui cercare e quindi per incrementare la probabilità di trovare set più raccolti rispetto allo spettro target, è possibile utilizzare l'opzione *Adimensionali*, in cui si normalizzano gli spettri degli accelerogrammi dividendo le ordinate spettrali per la PGA.

In tal caso, 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 7* e *Figura 8*. Si noti che si è scelto di limitare a 3.5 il massimo fattore di scala medio della combinazione.



**Figura 7.** Combinazione NTC scalata per analisi di strutture piane in Sant'Angelo dei Lombardi (AV) [ $M_{\text{media}} = 6.5$ ,  $R_{\text{media}} = 19.4\text{km}$ ,  $SF_{\text{medio}} = 3$ ]

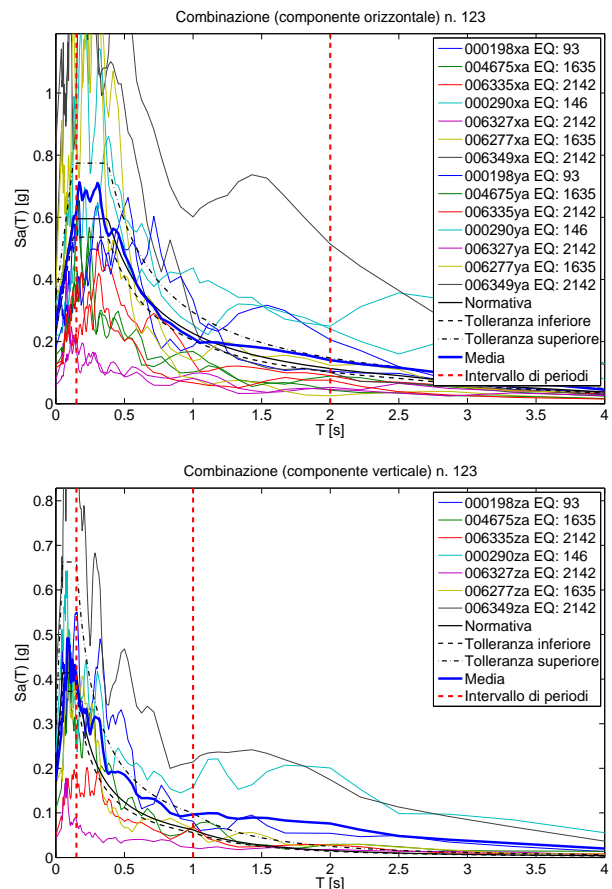


**Figura 8.** Combinazione NTC scalata per analisi di strutture spaziali in Sant'Angelo dei Lombardi (AV) [ $M_{\text{media}} = 6.6$ ,  $R_{\text{media}} = 18.3\text{km}$ ,  $SF_{\text{medio}} = 2.4$ ]

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

REXEL 2.2 beta consente di selezionare combinazioni di accelerogrammi che includano anche la componente verticale delle registrazioni, sebbene sia le NTC sia l'EC8 prescrivano di considerare tale componente solo in casi specifici. 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  $[0\text{km},50\text{km}]$ , 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  $0.15\text{s} \div 2\text{s}$  (componenti orizzontali) e  $0.15\text{s} \div 1\text{s}$  (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 9*.



**Figura 9.** Esempio di combinazione NTC tridimensionale (non scalata) per il sito Sant'Angelo dei Lombardi (AV) [ $M_{\text{media}} = 6.6$ ,  $R_{\text{media}} = 17.9\text{km}$ ]

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

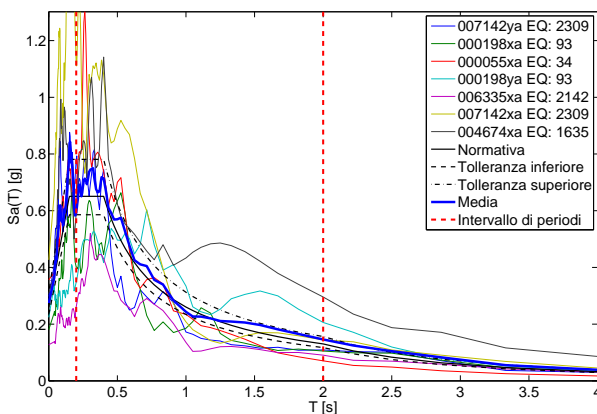
## 5.2. SELEZIONE SECONDO L'EC8

Si supponga ora di voler selezionare, ancora per una struttura su suolo di tipo A sita in Sant'Angelo dei Lombardi, accelerogrammi orizzontali secondo le prescrizioni EC8 con riferimento allo stato limite ultime (SLU).

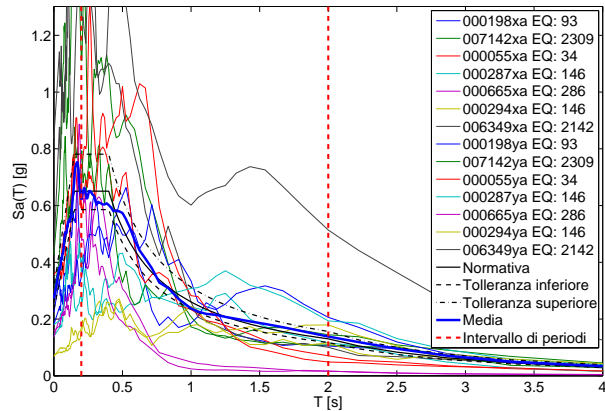
Specificando come intervallo per la magnitudo [5.6,7] e per la distanza  $0\text{km} \div 30\text{km}$ , assegnando una tolleranza di compatibilità della media del 10% inferiore e del 20% superiore (come nell'esempio precedente) nell'intervallo di periodi  $0.2\text{s} \div 2\text{s}$  e selezionando l'opzione di ricerca rapida, si ottengono immediatamente le combinazioni di accelerogrammi in *Figura 10* e *Figura 11*.

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 sia l'opzione *Adimensionali* sia l'opzione *Mi sento fortunato*, si ottengono immediatamente le combinazioni di accelerogrammi in *Figura 12* e *Figura 13*. Ancora una volta si è scelto di limitare a 3.5 il massimo fattore di scala medio della combinazione.

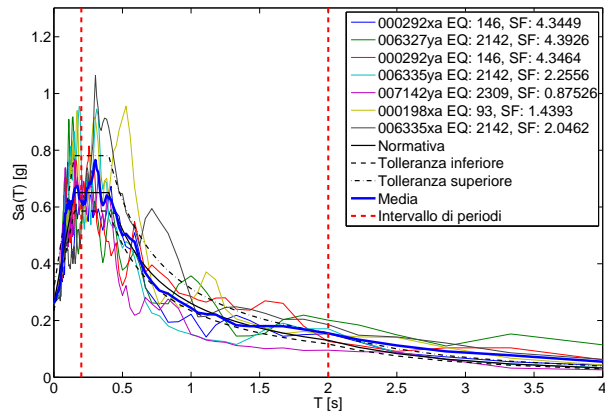
Dai risultati presentati si evince che le diverse prescrizioni dell'EC8 rispetto a quelle delle NTC e l'andamento differente degli spettri elastici secondo le due normative, fanno sì che set di accelerogrammi selezionati secondo quanto prescritto dalle NTC non sempre risultano essere utilizzabili anche per la norma europea.



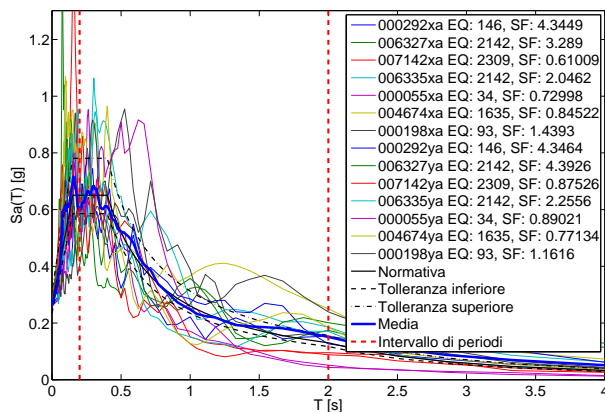
**Figura 10.** Combinazione EC8 non scalata per analisi di strutture piane in Sant'Angelo dei Lombardi (AV) [ $M_{\text{media}} = 6.5$ ,  $R_{\text{media}} = 16.1\text{km}$ ]



**Figura 11.** Combinazione EC8 non scalata per analisi di strutture spaziali in Sant'Angelo dei Lombardi (AV) [ $M_{\text{media}} = 6.6$ ,  $R_{\text{media}} = 19\text{km}$ ]



**Figura 12.** Combinazione EC8 scalata per analisi di strutture piane in Sant'Angelo dei Lombardi (AV) [ $M_{\text{media}} = 6.6$ ,  $R_{\text{media}} = 19.9\text{km}$ ,  $SF_{\text{medio}} = 2.8$ ]



**Figura 13.** Combinazione EC8 scalata per analisi di strutture spaziali in Sant'Angelo dei Lombardi (AV) [ $M_{\text{media}} = 6.6$ ,  $R_{\text{media}} = 18.1\text{km}$ ,  $SF_{\text{medio}} = 2$ ]



## 6. CONFRONTO CON IL CASO DELLA CLASSIFICAZIONE SISMICA IN ZONE

Si è detto che 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) [10] e 3431 (2005) [11] 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) [12] 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 IV a seconda che la PGA su roccia con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni cadesse rispettivamente negli intervalli ]0.25g, 0.35g], ]0.15g, 0.25g], ]0.05g, 0.15g],  $\leq 0.05g$ . A ciascuna di queste zone era assegnato, cautelativamente, un valore di  $a_g$  pari al limite superiore dell'intervallo di accelerazione.

Ciò aveva diverse conseguenze, prima di tutto faceva sì che lo spettro così ottenuto fosse legato solo indirettamente alla pericolosità sismica. Inoltre, in tal modo spesso si sovradimensionavano significativamente le ordinate spettrali rispetto al caso dello spettro ad hazard uniforme con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni.

La maggiore razionalità e quindi maggiore economia rispetto alla vecchia classificazione garantisce anche una più semplice selezione dell'input sismico per l'analisi dinamica non lineare. Se ad esempio, si suppone di voler selezionare accelerogrammi (non scalati) per analisi spaziali secondo le prescrizioni EC8 per Sant'Angelo dei Lombardi considerando come valore di ancoraggio dello spettro sia la reale PGA su roccia con il 10% di probabilità di superamento in 50 anni (0.27g) sia il valore 0.35g (determinato sulla base dell'intervallo di pertinenza della PGA secondo la vecchia classificazione), si ottengono i risultati in *Tabella 1*.

Le analisi sono state effettuate specificando come intervallo per la magnitudo [6, 7.6] e per la distanza 0km ÷ 30km, assegnando una tolleranza di compatibilità della media del 10% inferiore e del 20% superiore nell'intervallo di periodi 0.2s ÷ 2s.

Dai risultati presentati, è evidente la maggiore razionalità della valutazione delle azioni secondo la reale pericolosità attesa al sito di interesse.

Infatti, come già discusso in [01], per siti in zona 1 (ovvero  $a_g = 0.35g$ ) e suoli A, B e C non è possibile trovare combinazioni che rispettino il limite inferiore del 10% prescritto dall'EC8. Considerando invece come valore di ancoraggio dello spettro, il valore di accelerazione massima attesa al sito (così come desunto dall'analisi di pericolosità), è possibile trovare combinazioni di accelerogrammi reali spettro-compatibili in media.

Suolo	$a_g = 0.27g$	$a_g = 0.35g$
A	589	0
B	904	0
C	1	0

*Tabella 1. Effetto della classificazione sismica in zone sulla selezione di accelerogrammi secondo l'EC8: combinazioni trovate per S. Angelo dei Lombardi per i diversi tipo di suolo.*

## 7. CONCLUSIONI

Nel lavoro 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 assegnati spettri target (secondo le NTC, l'EC8 o definiti dall'utente) per l'analisi di strutture piane e spaziali. REXEL 2.2 beta, disponibile gratuitamente presso il sito del Consorzio della Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica (ReLUIS) (<http://www.reluis.it/>) consente molteplici opzioni di selezione tali da specificare non solo i criteri di compatibilità media con lo spettro di progetto ma anche eventuali condizioni di evento sismico dominante (in termini di magnitudo e distanza epicentrale) per qualunque delle tre componenti dell'azione sismica.

Il programma analizza tutte le combinazioni di sette gruppi di 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 [01]. Esso prevede anche una opzione tale per cui la ricerca si ferma alla prima combinazione trovata e che è una tra le più raccolte rispetto allo spettro target.

Dagli esempi sviluppati col l'ausilio del software sviluppato si evince che, soprattutto grazie alla definizione dell'azione sismica sulla base della pericolosità probabilistica, la selezione

di combinazioni compatibili con i criteri normativi è particolarmente rapida in molti casi.

## 8. CREDITI

Lo studio qui presentato è stato sviluppato nell'ambito del progetto triennale, ReLUIS – DPC.

## 9. BIBLIOGRAFIA

- [01] IERVOLINO I., MADDALONI G., COSENZA E. (2008). "Eurocode 8 compliant real record sets for seismic analysis of structures", *Journal of Earthquake Engineering*, 12(1): 54–60.
- [02] BAZZURRO P., CORNELL C.A. (1999). "Disaggregation of Seismic Hazard", *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol. 89, No. 2, pp. 501-520.
- [03] MIN.LL.PP, DM 14 gennaio, (2008). "Norme Tecniche per le Costruzioni", *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 29.
- [04] IERVOLINO I., GALASSO C., COSENZA E. (2008). "Spettri, accelerogrammi e le nuove Norme Tecniche per le Costruzioni", *Progettazione Sismica (in corso di stampa)*
- [05] 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.
- [06] IERVOLINO I., CORNELL C.A. (2005). "Record selection for nonlinear seismic analysis of structures", *Earthquake Spectra*, Vol. 21, No. 3, pp. 685-713.
- [07] MIN.LL.PP, (2008). "Istruzioni per l'applicazione delle Norme Tecniche delle costruzioni" (bozza), Ministero delle infrastrutture.
- [08] 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.
- [09] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.

### Contatti con gli autori:

Iunio Iervolino: [iunio.iervolino@unina.it](mailto:iunio.iervolino@unina.it)

Carmine Galasso: [carmine.galasso@unina.it](mailto:carmine.galasso@unina.it)

Edoardo Cosenza: [edoardo.cosenza@unina.it](mailto:edoardo.cosenza@unina.it)