

Accelerogrammi naturali compatibili con le specifiche dell'OPCM 3431 per l'analisi sismica delle strutture

Iunio Iervolino, Giuseppe Maddaloni, Edoardo Cosenza

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II, Facoltà di Ingegneria, via Claudio 21, 80125 Napoli

Keywords: accelerogrammi naturali, analisi dinamiche, OPCM 3431, Eurocodice 8.

ABSTRACT:

Gli accelerogrammi naturali rappresentano una opzione sempre più interessante quale input per l'analisi dinamica non lineare delle strutture, non solo perché sono sempre più numerosi i database che permettono di reperirli, ma anche e soprattutto perché essi consentono di ottenere una stima accurata e statisticamente corretta della domanda sismica.

L'OPCM 3431 consente di usare per l'analisi strutturale questo tipo di registrazioni a condizione che l'ordinata spettrale media, di almeno sette registrazioni, non presenti uno scarto in difetto superiore al 10%, rispetto alla corrispondente dello spettro elastico, in alcun punto dell'intervallo di periodi $0,15 \text{ s} \div 2,0 \text{ s}$ e $0,15 \text{ s} \div 2 T$, in cui T è il periodo fondamentale di vibrazione della struttura.

Lo studio presentato in questo lavoro ha esplorato lo "European Strong Motion Database" al fine di trovare records che rispondano alle prescrizioni di normativa e di altri criteri aggiuntivi dettati dalla recente ricerca e ritenuti importanti nella predizione della risposta non lineare degli edifici.

I risultati ottenuti si riferiscono ai siti di categorie A, B e C e a set di registrazioni che rispondono anche alle esigenze, evidentemente economiche, di minimizzare la sovrastima dello spettro di normativa e di avere una minima variabilità dei singoli spettri reali.

1 INTRODUZIONE

L'OPCM 3431, nell'allegato 2, richiama la questione dell'input sismico per l'analisi dinamica non lineare delle strutture, descrivendo la possibilità di una rappresentazione alternativa dell'azione sismica mediante l'uso di accelerogrammi *artificiali, simulati o naturali*.

Gli accelerogrammi artificiali sono registrazioni di eventi realmente accaduti modificati in modo da avere uno spettro di risposta praticamente coincidente, entro una certa tolleranza, con uno spettro definito "target", attraverso manipolazione nel dominio delle frequenze (Bommer e Acevedo, 2004). Anche se questi metodi producono registrazioni perfettamente compatibili con le prescrizioni di normativa, alcuni studi dimostrano che il numero di cicli o l'energia del segnale possono essere lontani da quelli di una registrazione reale e quindi condurre ad una stima statisticamente non corretta della risposta non lineare (Carballo e Cornell, 2000).

Gli accelerogrammi sintetici vengono generati, attraverso una modellazione, con metodi sia deterministici che stocastici, capace di simulare gli effetti

dei processi fisici connessi col moto al suolo, come genesi del terremoto, propagazione dell'onda e risposta superficiale al sito. Si ottengono in tal modo, segnali aventi caratteristiche corrispondenti ad uno o più scenari di progetto, ma tuttavia, nella pratica ingegneristica sussistono ostacoli all'utilizzo di accelerogrammi così ottenuti in quanto le competenze necessarie per la generazione sono, a tutt'oggi, specifiche dei sismologi.

Gli accelerogrammi naturali, infine, sembrano essere la più diretta rappresentazione del moto al suolo in quanto riportano in se caratteristiche quali ampiezza, contenuto in frequenza, energia, durata e fase di eventi reali. Rispetto al passato, sussiste una crescente disponibilità di cataloghi on-line che forniscono libero accesso ad una grande quantità di registrazioni.

Per queste ragioni e tenuto conto che recentemente molti studi si sono occupati dell'utilizzo di records reali per la valutazione sismica delle strutture, si è ritenuto opportuno focalizzare l'attenzione sulle registrazioni naturali come input per l'analisi dinamica non lineare.

Lo studio ha investigato la possibilità di individuare combinazioni di accelerogrammi reali, sia per

analisi su strutture aventi una dimensione prevalente (analisi piane) che per gli edifici (analisi spaziali), compatibili con i criteri della normativa italiana includendo anche altri vincoli ritenuti importanti nella scelta dell'input sismico (Baker e Cornell, 2006).

I risultati trovati si riferiscono a combinazioni rispondenti ai criteri di norma sia per i suoli di tipo deformabile che per la roccia.

Gli accelerogrammi considerati sono intenzionalmente non scalati, tuttavia si sono anche ricercati set di accelerogrammi scalati linearmente in termini di accelerazione di picco al suolo (PGA), allo scopo di minimizzare la dispersione degli spettri della combinazione rispetto allo spettro di riferimento.

Risultati analoghi sono stati trovati con riferimento all'Eurocodice 8 che pur essendo la base della norma italiana (OPCM 3274, 2003), si discosta da questa per taluni aspetti che saranno in seguito descritti.

2 PRESCRIZIONI DELL'OPCM 3431 SULL'USO DEGLI ACCELEROGRAMMI

Nel paragrafo 3.2.7 *–Impiego di accelerogrammi–* la norma impone che il set di accelerogrammi utilizzato, sia esso costituito da segnali naturali, sintetici o artificiali, abbia uno spettro di risposta medio coerente con quello elastico definito dal codice. Tale coerenza è da verificare in base alla media delle ordinate spettrali ottenute con i diversi accelerogrammi per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ del 5%. Nel dettaglio: l'ordinata spettrale media non deve essere inferiore al 90% della corrispondente dello spettro elastico, in alcun punto dell'intervallo di periodi $0,15 \text{ s} \div 2,0 \text{ s}$ e $0,15 \text{ s} \div 2 \text{ T}$, in cui T è il periodo fondamentale di vibrazione della struttura in campo elastico. Nel presente lavoro la coerenza tra l'ordinata spettrale media e lo spettro di norma è stata verificata in un range compreso tra $0,147 \text{ s}$ e $2,0 \text{ s}$ e quindi per strutture con periodo fondamentale fino ad 1 secondo.

Il numero di accelerogrammi da considerare per verificare le prescrizioni della norma è legato al concetto di *gruppo*. Ciascun gruppo è costituito dall'insieme delle due registrazioni orizzontali e da quella verticale di un evento sismico. Secondo la norma un set di accelerogrammi deve essere costituito da un numero di gruppi almeno pari a 3, ma al punto 4.5.5 *–Analisi dinamica non lineare–* viene chiarito che nel caso in cui si utilizzino almeno 7 diversi gruppi di accelerogrammi gli effetti sulla struttura (sollecitazioni, deformazioni, spostamenti, etc.) potranno essere rappresentati dalle medie dei valori massimi ottenuti dalle analisi.

Tenuto conto, (punto 4.6 *–Combinazione delle componenti dell'azione sismica–*) che l'azione sismica verticale va considerata solo in casi particolari, come per elementi pressoché orizzontali con luce

superiore ai 20 m, per elementi a mensola o elementi principali precompressi, pilastri in falso, edifici con piani sospesi, si è ritenuto opportuno nello studio qui presentato non considerare la componente verticale. I risultati trovati si applicano comunque alla maggior parte delle comuni tipologie strutturali.

Inoltre, nel seguito si distingue tra set di records per analisi su strutture piane, in cui l'azione sismica può essere considerata come agente secondo una sola direzione e set per l'analisi di strutture spaziali in cui vanno tenute in conto le due direzioni orizzontali ortogonali dell'input sismico.

2.1 Spettri di normativa

Lo spettro di riferimento, come è noto, è funzione della tipologia di terreno considerato e del livello di pericolosità sismica della zona di interesse. La norma definisce 5 principali categorie per i profili stratigrafici di fondazione:

A - Formazioni litoidi o suoli omogenei molto rigidi (velocità delle onde di taglio, V_{s30} , superiore a 800 m/s);

B - Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti (V_{s30} compresa tra 360 m/s e 800 m/s);

C - Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza (V_{s30} compresa tra 180 e 360 m/s);

D - Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti ($V_{s30} < 180 \text{ m/s}$);

E - Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali (V_{s30} simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con $V_{s30} > 800 \text{ m/s}$).

In aggiunta a queste categorie, se ne definiscono altre due, S1 e S2, per le quali sono richieste caratterizzazioni speciali e che per questo sono state escluse dal presente studio. Le forme spettrali per le cinque categorie principali si classe di sito sono riassunte in Figura 1.

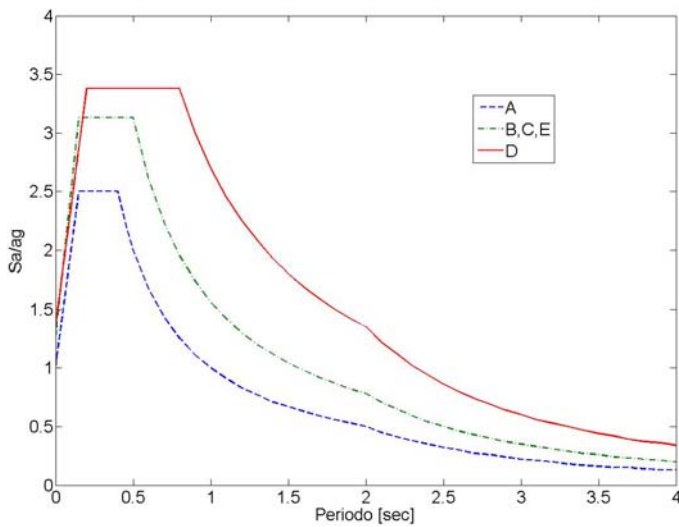


Figura 1. Forme spettrali dell'OPCM 3431

Il livello di pericolosità, invece, è definito attraverso il valore del parametro a_g che rappresenta l'accelerazione orizzontale massima sul suolo di categoria A. I valori per l'Italia (non dissimili da altri paesi europei) sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1. Valori delle accelerazioni al suolo secondo l'OPCM 3431

| Zona | Valori di a_g |
|------|-----------------|
| 1 | 0,35g |
| 2 | 0,25g |
| 3 | 0,15g |

2.2 Dimensione del campione e tipo di analisi

La normativa impone di utilizzare, per le analisi un numero di gruppi non inferiore a 3, ma nel seguente lavoro, come già detto, è stata condotta un'analisi mirata alla ricerca di combinazioni costituite da 7 gruppi di registrazioni. Ciò per tre ragioni fondamentali:

- è possibile considerare gli effetti medi sulla struttura anziché quelli massimi;
- aumenta significativamente la probabilità di trovare risultati;
- l'utilizzo di soli 3 accelerogrammi, può non consentire di stimare in maniera corretta la variabilità della risposta sulle strutture.

Ricordando la già citata questione dell'esclusione della componente verticale per le comuni tipologie strutturali, la combinazione di accelerogrammi che può essere utilizzata per eseguire analisi dinamiche spaziali su edifici, deve essere composta da 14 registrazioni (cioè 7 gruppi di due registrazioni ciascuno) e la coerenza con lo spettro di norma dovrà essere verificata considerando la media di tutti e quattordici gli spettri reali. Per le analisi su strutture

aventi una prevalente direzione di analisi (analisi piane), invece, la media sarà eseguita solo su 7 registrazioni in quanto ciascun gruppo è costituito da un singolo accelerogramma.

3 CRITERI SUPPLEMENTARI DI SELEZIONE

Per la ricerca dell'input sismico nessuna ulteriore limitazione è data dalla norma e quindi gli unici vincoli sono quelli riportati al paragrafo 2. Nello studio qui presentato, tuttavia, si è scelto di considerare alcuni criteri aggiuntivi, ritenuti efficaci sulla base di quanto suggerito dalla recente ricerca internazionale in materia di selezione dell'input sismico per la stima della risposta non-lineare delle strutture. In particolare si è considerato, ove possibile, per ciascuna combinazione individuata:

- la deviazione dello spettro medio della combinazione da quello di normativa;
- la deviazione massima del singolo spettro della combinazione da quello di normativa;
- l'intervallo di magnitudo degli eventi di ciascuna combinazione;
- eventi sismici diversi all'interno della combinazione.

a) La deviazione dello spettro medio (σ) fornisce una misura quantitativa dello scostamento che assume l'andamento dello spettro medio, relativo a tutti gli accelerogrammi di una combinazione, nei confronti dello spettro elastico target (Figura 2). Tale deviazione è calcolata secondo l'espressione:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{SA_{o,med}(T_i) - SA_s(T_i)}{SA_s(T_i)} \right)^2} \quad (1)$$

dove $SA_{o,med}(T_i)$ rappresenta l'ordinata dello spettro di pseudo-accelerazione reale medio in corrispondenza del periodo T_i , mentre $SA_s(T_i)$ è il valore dell'ordinata spettrale letta sullo spettro elastico di riferimento, in corrispondenza dello stesso periodo e N è il numero di punti osservati all'interno dell'intervallo di periodi considerato. Questo parametro ha permesso di selezionare all'interno dei risultati ottenuti, quelli con uno spettro reale medio prossimo a quello di normativa e quindi di ovviare ad una eventuale sovrastima della risposta sismica.

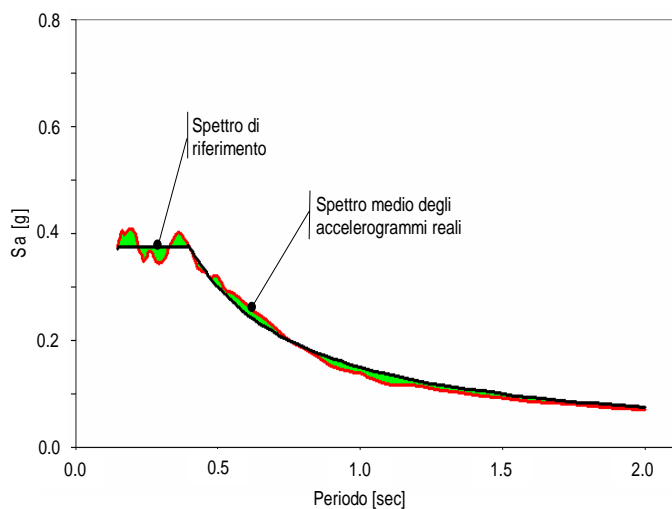


Figura 2. Valutazione dello scostamento tra spettro medio e spettro target.

b) La deviazione massima (σ_{\max}) del singolo spettro è intesa come lo scostamento massimo tra tutti gli spettri reali facenti parte della combinazione, ed è data dalla (1) a patto di sostituire $SA_{o,med}(T_i)$ con $SA_o(T_i)$, cioè con l'ordinata del singolo spettro in luogo di quella dello spettro medio. La selezione secondo questo parametro mira ad individuare le combinazioni in cui gli spettri delle singole registrazioni si discostano il meno possibile dallo spettro di riferimento. In tal modo si cerca di ridurre il più possibile la variabilità della risposta strutturale tra record e record.

c) Un altro parametro aggiuntivo nei criteri di selezione è dato dalla magnitudo degli eventi sismici della combinazione. Alcuni studi (Iervolino e Cornell, 2005), sebbene non ritengano di primaria importanza la magnitudo nella selezione (a patto di controllare la forma spettrale), raccomandano prudentemente che l'utente usi registrazioni provenienti grosso modo dalla stessa magnitudo, poiché questo parametro influenza significativamente il contenuto in frequenza e la durata del moto. Pertanto, nel gruppo dei risultati ottenuti, quando possibile, sono state scelte le combinazioni di accelerogrammi relativi ad eventi sismici di magnitudo contenuto in un range più stretto possibile. Tuttavia questo criterio è considerato secondario rispetto agli altri.

d) Infine, l'ultimo criterio considerato è relativo agli eventi di provenienza degli accelerogrammi costituenti le combinazioni. Ad ogni terremoto possono corrispondere più registrazioni accelerometriche ottenute dagli strumenti di misura disposti in diversi siti del territorio. Sono state individuate, quando possibile, quelle combinazioni caratterizzate da eventi sismici differenti in maniera tale che l'analisi non fosse condizionata da pochi eventi dominanti.

Non sono stati considerati, se non indirettamente, altri criteri quali durata del segnale e distanza tra registrazione e sorgente dell'evento, tenuto conto che diversi studi dimostrano la loro importanza solo sotto determinate condizioni (Iervolino et al. 2006a). In conclusione, nella selezione dei risultati, fermo restando il rispetto delle prescrizioni di normativa si è cercato di rispettare il più elevato numero di criteri aggiuntivi contemporaneamente.

4 DATABASE INVESTIGATO

Molti sono i database on-line che offrono oggi la possibilità di avere libero accesso alle registrazioni accelerometriche. Nel lavoro si è scelto di utilizzare quelle disponibili nel sito internet dello European Strong-motion Database – ESD (<http://www.isesd.cv.ic.ac.uk>).

Si sono considerati tutti gli accelerogrammi presenti nel sito fino all'Aprile 2005 distinguendoli, attraverso il solo parametro della geologia locale del sito (*rock, stiff soil, soft soil, very soft soil, alluvium*). I risultati ottenuti sono costituiti da file rappresentativi delle registrazioni nelle sole due direzioni orizzontali ortogonali (Nord-Sud, Est-Ovest), avendo, per i motivi già discussi, tralasciato la componente verticale (Tabella 2).

Successivamente, per i suoli A, B, C ed E è stata applicata una selezione preliminare escludendo quelle registrazioni poco significative dal punto di vista della magnitudo, considerando solo gli eventi caratterizzati da una magnitudo momento (M_w) medio-alta (almeno pari a 5,8). Così facendo, è stato possibile ridurre drasticamente il numero dei records da analizzare e quindi i tempi di calcolo. I risultati della preselezione sono riportati in Tabella 3. Nella

Tabella 4 sono riportati i terremoti che hanno un numero di registrazioni più elevato, mentre nella

Tabella 5 vengono sinteticamente indicate le registrazioni distinte per nazione. Non a caso i paesi con più registrazioni sono Italia, Turchia e Jugoslavia che notoriamente sono le zone a maggiore sismicità nell'area dell'Europa e bacino del Mediterraneo, oltre che essere dotate di vaste reti di strumenti di registrazione.

Tabella 2. Numero totale delle registrazioni presenti nel sito e distinte per classe di sito

| Geologia del sito | Est-Ovest | Nord-Sud |
|-----------------------------------|------------------|-----------------|
| SUOLO A (<i>rock</i>) | 575 | 570 |
| SUOLO B (<i>stiff soil</i>) | 770 | 770 |
| SUOLO C (<i>soft soil</i>) | 410 | 410 |
| SUOLO D (<i>very soft soil</i>) | 28 | 29 |
| SUOLO E (<i>alluvium</i>) | 105 | 103 |

Tabella 3. Numero totale delle registrazioni considerate nelle analisi

| <i>Geologia del suolo</i> | <i>E-O</i> | <i>N-S</i> | <i>Totale</i> |
|---------------------------------|------------|------------|---------------|
| <i>SUOLO A (rock)</i> | 111 | 111 | 222 |
| <i>SUOLO B (stiff soil)</i> | 135 | 135 | 270 |
| <i>SUOLO C (soft soil)</i> | 122 | 122 | 244 |
| <i>SUOLO D (very soft soil)</i> | 28 | 28 | 56 |
| <i>SUOLO E (alluvium)</i> | 29 | 29 | 58 |

Tabella 4. Numero delle registrazioni dei terremoti più rappresentati

| <i>Terremoto e Nazione</i> | <i>Registrazioni (E-O + N-S)</i> |
|--------------------------------|----------------------------------|
| <i>Campano-Lucano (Italia)</i> | 42 |
| <i>Duzce 1 (Turchia)</i> | 92 |
| <i>Friuli (Italia)</i> | 60 |
| <i>Izmit (Turchia)</i> | 124 |
| <i>Montenegro (Yugoslavia)</i> | 76 |

Tabella 5. Numero totale delle registrazioni presenti nel sito distinte per nazione

| <i>Nazione</i> | <i>Geologia del sito</i> | | | | |
|---------------------------|--------------------------|------------|------------|-----------|-----------|
| | <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>D</i> | <i>E</i> |
| <i>Italia</i> | 47 | 11 | 16 | 11 | 14 |
| <i>Albania</i> | - | - | - | 2 | - |
| <i>Algeria</i> | 1 | - | 1 | - | 1 |
| <i>Armenia</i> | - | - | 1 | - | - |
| <i>Bosnia Herzegovina</i> | - | - | - | 6 | - |
| <i>Croatia</i> | - | - | - | 2 | - |
| <i>Cyprus</i> | - | - | 1 | - | - |
| <i>Egypt</i> | - | - | 7 | - | - |
| <i>Georgia</i> | 5 | 2 | 3 | - | - |
| <i>Greece</i> | 20 | 29 | 20 | - | 4 |
| <i>Iceland</i> | - | 11 | - | - | - |
| <i>Iran</i> | 2 | 10 | 5 | - | - |
| <i>Israel</i> | - | - | - | - | - |
| <i>Macedonia</i> | 1 | 1 | - | 1 | - |
| <i>Portugal</i> | - | - | 2 | - | 1 |
| <i>Romania</i> | 3 | 1 | - | 2 | - |
| <i>Slovenia</i> | - | - | - | - | 4 |
| <i>Turkey</i> | 24 | 59 | 59 | - | 4 |
| <i>Yugoslavia</i> | 8 | 11 | 7 | 4 | 1 |
| <i>Totale</i> | 111 | 135 | 122 | 28 | 29 |

5 ANALISI E RISULTATI

Per cercare le combinazioni di accelerogrammi che rispondessero alle prescrizioni di normativa è stato creato uno specifico codice di calcolo. Tale codice è capace di controllare, in percentuale, lo scostamento in eccesso o in difetto dello spettro medio della combinazione rispetto a quello di riferimento. Sono state analizzate, in questo modo, tutte le combinazioni di 7 gruppi di accelerogrammi (sette o quattordici spettri nel caso di combinazioni per ana-

lisi piane o spaziali rispettivamente) tra quelli considerati come input nel paragrafo precedente.

La normativa asserisce esplicitamente che il valore dell'ordinata spettrale media degli accelerogrammi non deve presentare uno scarto in difetto superiore al 10% (limite inferiore) nel campo di periodo 0,15 s – 2 s ma non fornisce nessuna indicazione circa il limite superiore. Nelle analisi si è cercato di ridurre il più possibile anche la sovrastima dello spettro e partendo dal presupposto di dover rispettare solo il limite inferiore al 10%, è stato possibile variare iterativamente il limite superiore al fine di ottenere un numero congruo di risultati su cui applicare poi i criteri di selezione aggiuntivi discussi nel paragrafo 3.

I risultati per le analisi spaziali (7 gruppi di accelerogrammi che includono le 2 componenti orizzontali dell'evento) sono sinteticamente riportati in Tabella 6, in cui sono indicati per ogni suolo e zona sismica di riferimento, il numero di combinazioni *spettro compatibili* trovate e la sovrastima e sottostima massima rispetto allo spettro di riferimento in termini percentuali.

Per i suoli D ed E, non è stato possibile trovare combinazioni accettabili. Inoltre, essendo gli spettri relativi ad una pericolosità più elevata caratterizzati da una più bassa probabilità di accadimento, a parità di scostamento, il numero delle combinazioni trovate tende a crescere passando dalla zona 1 alla zona 3.

Per la zona 1 dei suoli A, B e C non si sono trovate combinazioni che rispettassero il limite inferiore del 10%. Tale limite è stato pertanto ampliato fino al 40% (per il suolo C) in modo da ottenere delle combinazioni di accelerogrammi reali che pur non spettro-compatibili potessero fornire un punto di partenza per una operazione di manipolazione delle registrazioni naturali (scaling lineare in PGA) consentite dalla norma. In questi casi, infatti, la spettro-compatibilità viene meno solo in pochi punti del range di periodi considerato e quindi lo scaling per ripristinare il rispetto delle condizioni di norma richiede fattori di scala molto bassi da applicare solo ad alcuni degli accelerogrammi della combinazione.

Tabella 6. Combinazioni trovate per analisi spaziali.

| <i>Suolo</i> | <i>Zona</i> | <i>Tol Inf [%]</i> | <i>Tol Sup [%]</i> | <i>Combinaz. Trovate</i> |
|--------------|-------------|--------------------|--------------------|--------------------------|
| <i>A</i> | 1 | 30 | 100 | 15 |
| | 2 | 10 | 100 | 452 |
| | 3 | 10 | 10 | 3673 |
| <i>B</i> | 1 | 20 | 100 | 1256 |
| | 2 | 10 | 30 | 20338 |
| | 3 | 10 | 20 | 24081 |
| <i>C</i> | 1 | 40 | 100 | 2 |
| | 2 | 20 | ∞ | 48 |
| | 3 | 10 | 15 | 12230 |

A titolo di esempio, nelle Figure dalla 3 alla 11 si riportano alcuni risultati relativamente alle analisi spaziali per il suolo A, B e C e le tre zone sismiche 1, 2, 3 (le linee spesse rappresentano lo spettro medio e di normativa; in legenda i codici della stazione e dell'evento sismico secondo l'ESD). In particolare, le combinazioni riportate per le analisi spaziali sono quelle caratterizzate dal minimo scarto dello spettro medio rispetto a quello di normativa. Si noti che nella Figura 5 è mostrato un set in cui si è dovuto ricorrere allo scaling (fattore di scala massimo pari ad 1.6) di alcuni accelerogrammi per ottenere uno spettro medio avente i requisiti prescritti dall'OPCM 3431. Dalla Figura 12 alla Figura 14 sono riportati i risultati, per il suolo A, per le analisi piane, cioè combinazioni costituite da sole sette registrazioni da applicare in una sola direzione. In particolare, le combinazioni illustrate sono quelle caratterizzate dalla minore variabilità degli spettri dei singoli eventi rispetto allo spettro di riferimento.

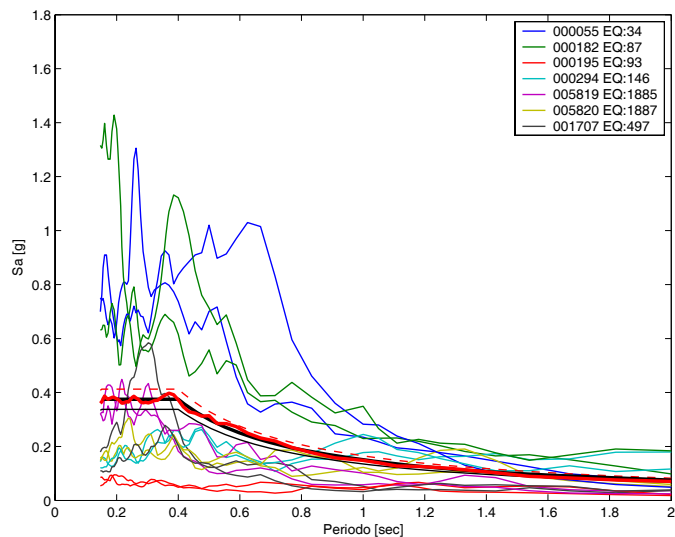


Figura 3. Sito di classe A. Zona 3 ($ag = 0,15g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

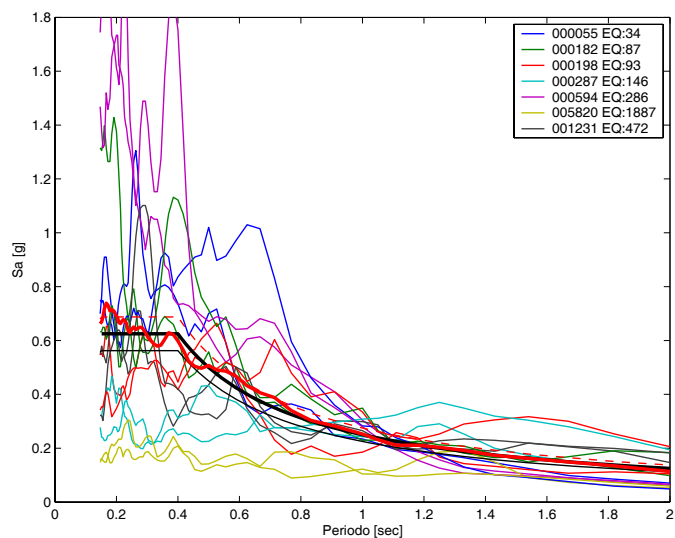


Figura 4. Sito di classe A. Zona 2 ($ag = 0,25g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

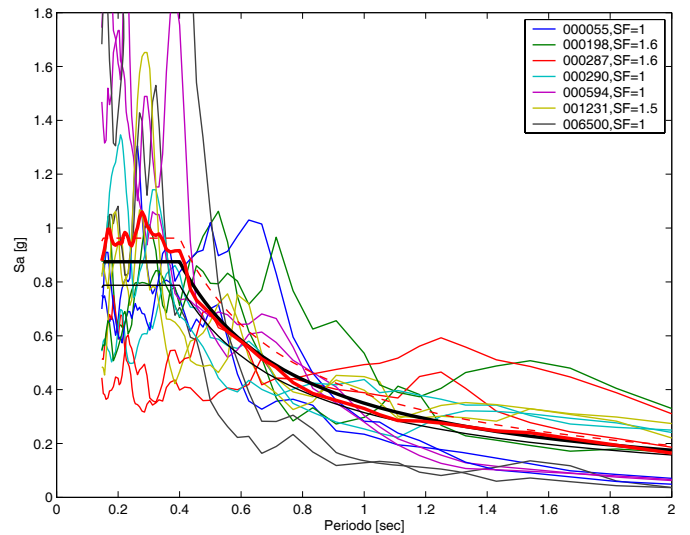


Figura 5. Sito di classe A. Zona 1 ($ag = 0,35g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali (SF = fattore di scala).

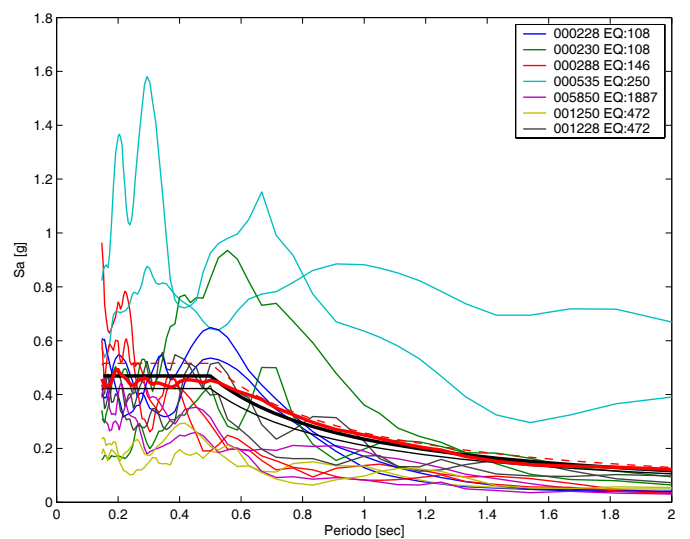


Figura 6. Sito di classe B. Zona 3 ($ag = 0,15g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

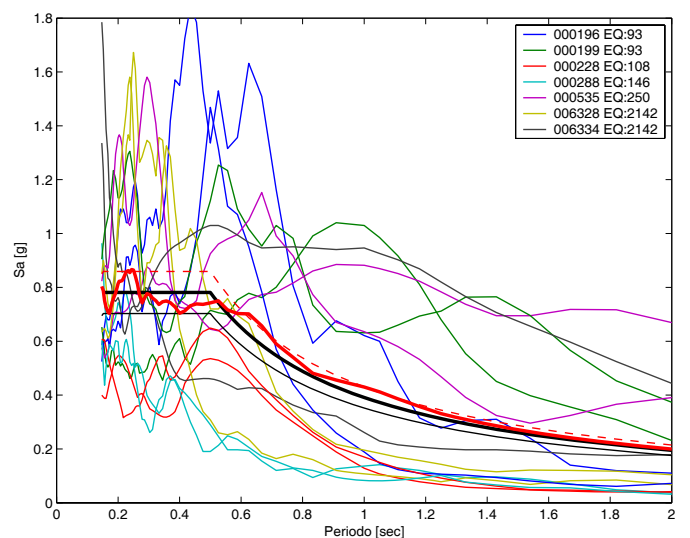


Figura 7. Sito di classe B. Zona 2 ($ag = 0,25g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

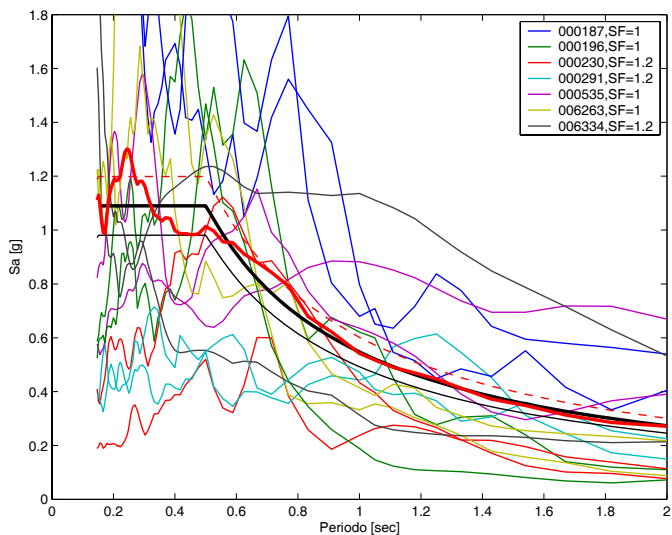


Figura 8. Sito di classe B. Zona 1 ($a_g = 0,35g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali (SF = fattore di scala).

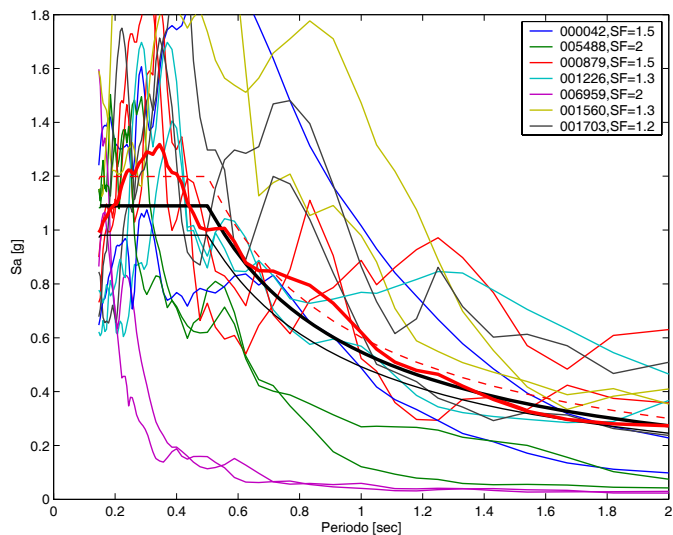


Figura 11. Sito di classe C. Zona 1 ($a_g = 0,35g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali (SF = fattore di scala).

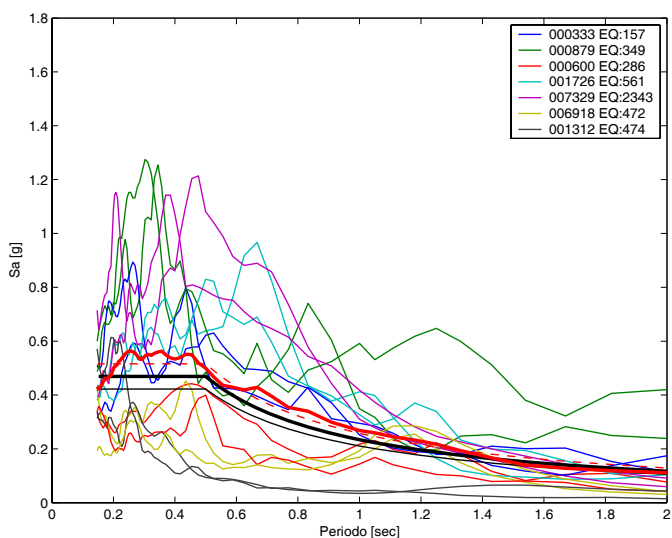


Figura 9. Sito di classe C. Zona 3 ($a_g = 0,15g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

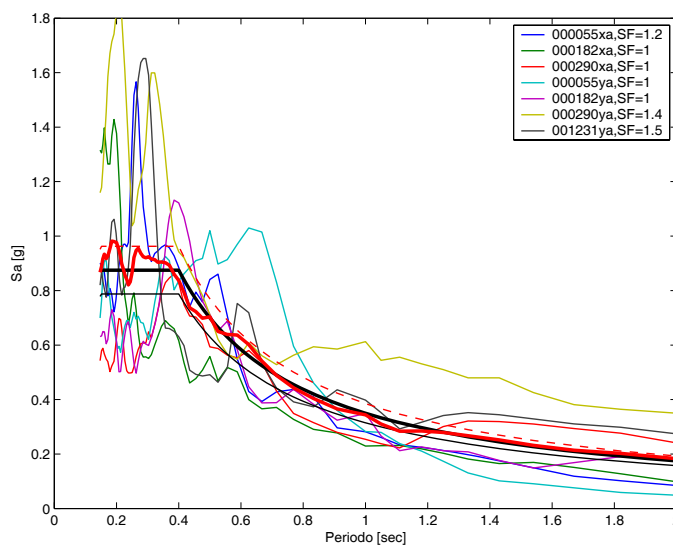


Figura 12. Sito di classe A zona 1 ($a_g = 0,35g$). Combinazione di 7 registrazioni (SF = fattore di scala).

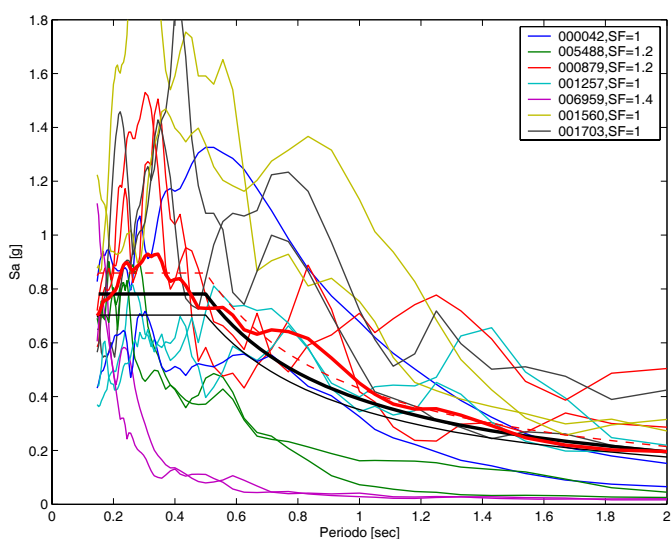


Figura 10. Sito di classe C. Zona 2 ($a_g = 0,25g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

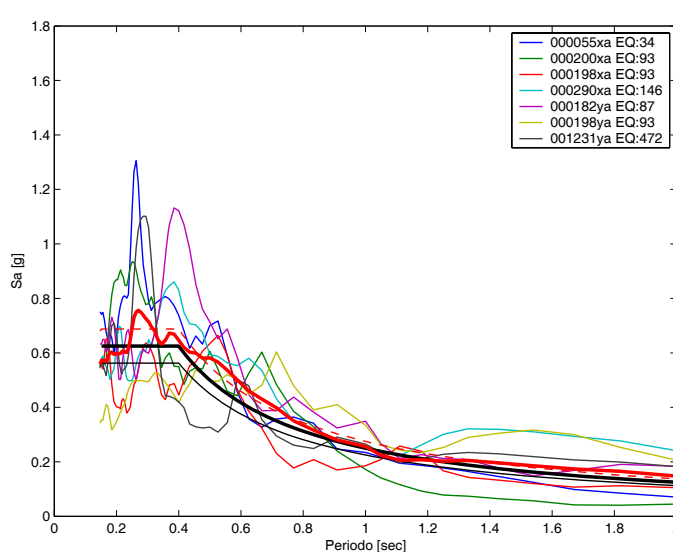


Figura 13. Sito di classe A zona 2 ($a_g = 0,25g$) Combinazione di 7 registrazioni.

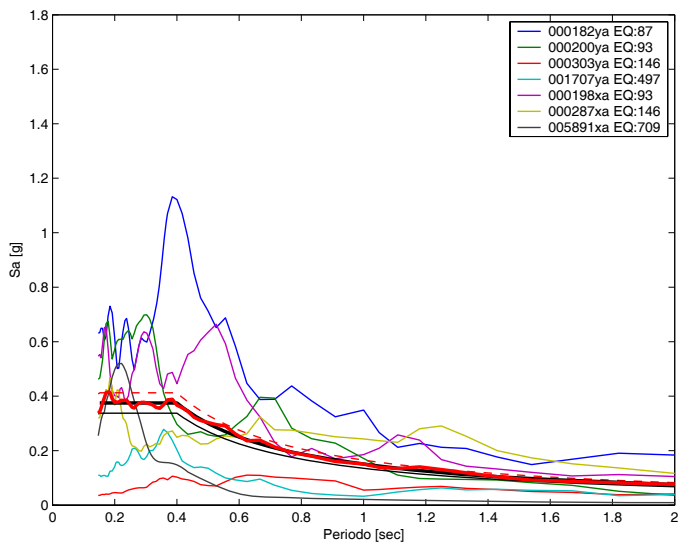


Figura 14. Sito di classe A zona 3 ($a_g = 0,15g$). Combinazione di 7 registrazioni.

5.1 Combinazioni adimensionali

Dai risultati si evince che lo scostamento del singolo spettro rispetto a quello di target può essere molto grande, mentre può essere utile per ridurre la variabilità della risposta sismica, avere combinazioni caratterizzate da accelerogrammi che singolarmente devino poco dallo spettro di normativa. Per trovare set più raccolti rispetto agli spettri target si sono eseguite le stesse analisi di cui al paragrafo precedente, però avendo adimensionalizzando gli spettri, cioè dividendo tutte le ordinate spettrali degli accelerogrammi analizzati e dello spettro di codice per la propria PGA. E' evidente che tali risultati sono indipendenti dalla zona sismica in quanto si riferiscono allo spettro di normativa reso indipendente da a_g . Esempi di questo tipo di combinazioni sono dati nelle figure dalla 15 alla 17.

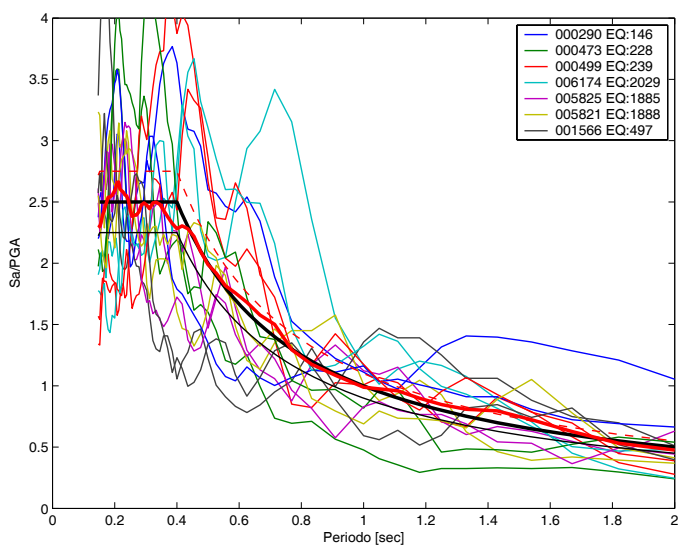


Figura 15. Sito di classe A. Combinazione adimensionale per analisi spaziali.

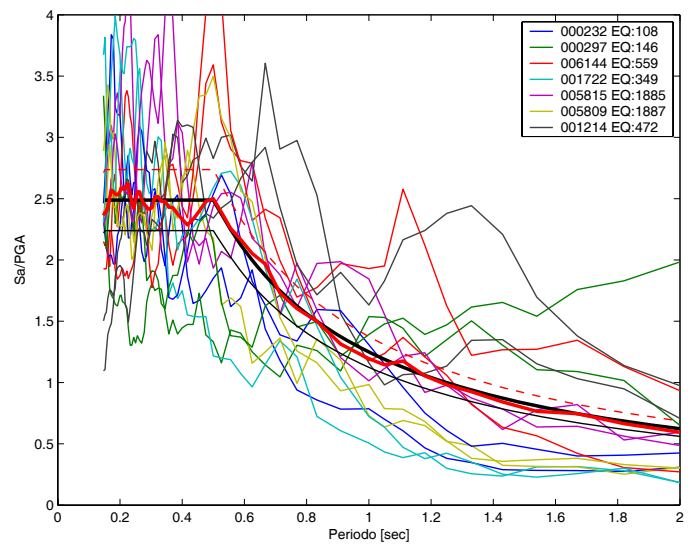


Figura 16. Sito di classe B. Combinazione adimensionale per analisi spaziali.

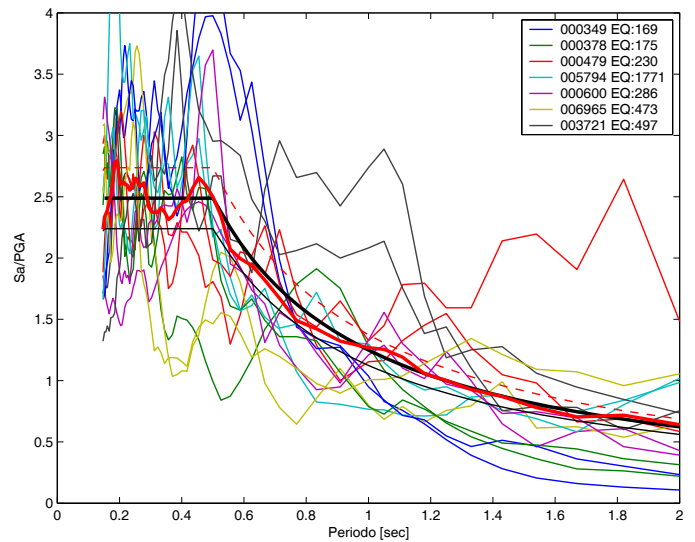


Figura 17. Sito di classe C. Combinazione adimensionale per analisi spaziali.

Sebbene l'adimensionalizzazione raggiunga l'obiettivo di ridurre la variabilità dei singoli spettri rispetto a quello di riferimento, queste combinazioni richiedono lo scaling in PGA (concesso dalla norma) per poter essere utilizzate ed i fattori di scala necessari possono essere anche molto elevati (ben oltre 10).

6 SET DI ACCELEROGRAMMI COMPATIBILI CON LE SPECIFICHE DELL'EUROCODICE 8

Anche l'Eurocodice 8 (CEN, 2003) nella sua parte 1, come l'OPCM 3431, prevede per gli edifici l'utilizzo degli accelerogrammi come rappresentazione alternativa del moto sismico.

Nel dettaglio, un set di accelerogrammi sia esso naturale, artificiale o sintetico deve rispettare i seguenti criteri:

a) un minimo di 3 accelerogrammi deve essere usato;

b) la media delle ordinate spettrali valutate per $T=0$ e calcolate per i singoli accelerogrammi 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 nessuno del range di periodi compreso tra $0.2 T$ e $2.0 T$ con T periodo fondamentale di vibrazione della struttura.

Gli spettri elastici definiti dall'EC8 si riferiscono alle stesse categorie di suolo di fondazione (A, B, C, D, E) dell'OPCM 3431 ma rispetto a quest'ultimo tranne che per il suolo rigido, assumono un andamento leggermente differente (Figura 18).

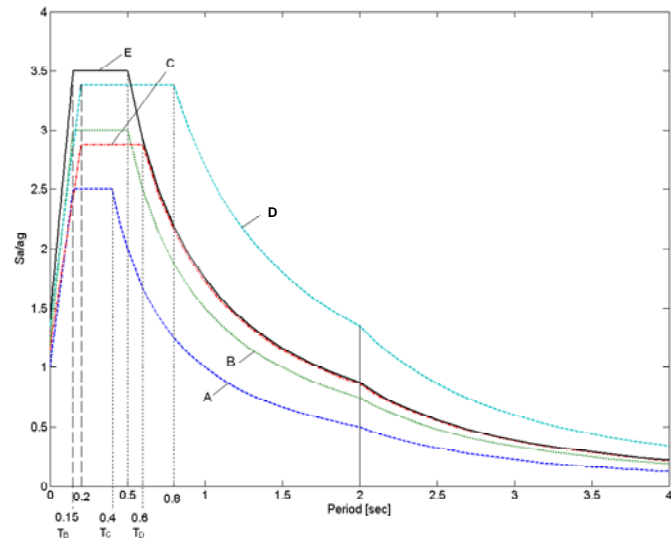


Figura 18. Forme spettrali per l'EC8.

Questo, unito alle condizioni prescrittive leggermente differenti fanno sì che set di accelerogrammi "spettro-compatibili" per la norma sismica italiana non sempre risultano esserlo anche per la norma europea. Nelle Figure dalla 19 alla 27 sono riportati gli spettri di set di accelerogrammi utilizzabili secondo quanto prescritto dall'EC8 per le analisi dinamiche sugli edifici in relazione al suolo A, B e C (Iervolino et al., 2006b).

Si noti che pur essendo lo spettro elastico di normativa per il suolo A, identico per OPCM 3431 ed EC8, i risultati di seguito proposti, tranne che per la zona 1, sono diversi anche per tale categoria. Ciò è dovuto alla circostanza che pur essendo identico lo spettro elastico di confronto, per l'EC8, come detto, sussiste un ulteriore condizionamento sulla scelta dell'input sismico riguardante l'ordinata spettrale media degli accelerogrammi reali valutata per $T=0$.

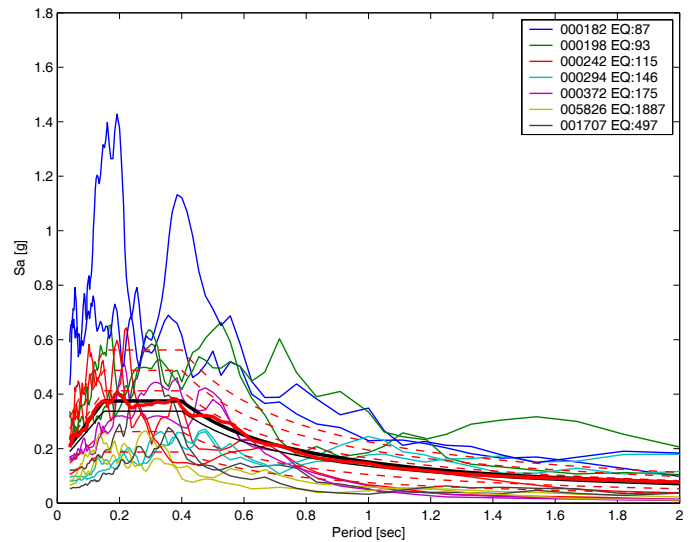


Figura 19. Sito di classe A zona 3 ($a_g = 0,15g$). Combinazione di 14 registrazioni compatibile con le prescrizioni dell'EC8.

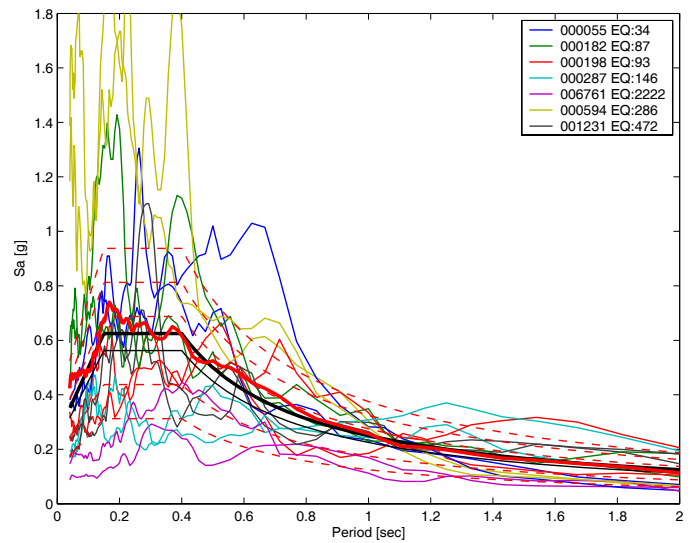


Figura 20. Sito di classe A zona 2 ($a_g = 0,25g$). Combinazione di 14 registrazioni compatibile con le prescrizioni dell'EC8.

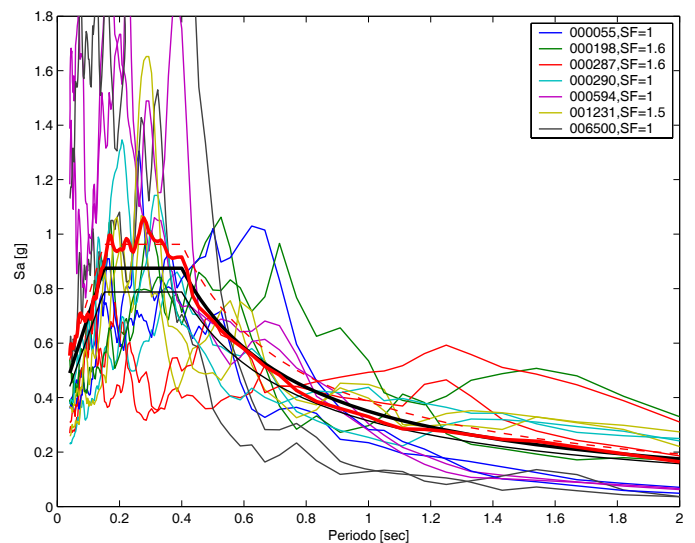


Figura 21. Sito di classe A zona 1 ($a_g = 0,35g$). Combinazione di 14 registrazioni compatibile con le prescrizioni dell'EC8. (SF = fattore di scala)

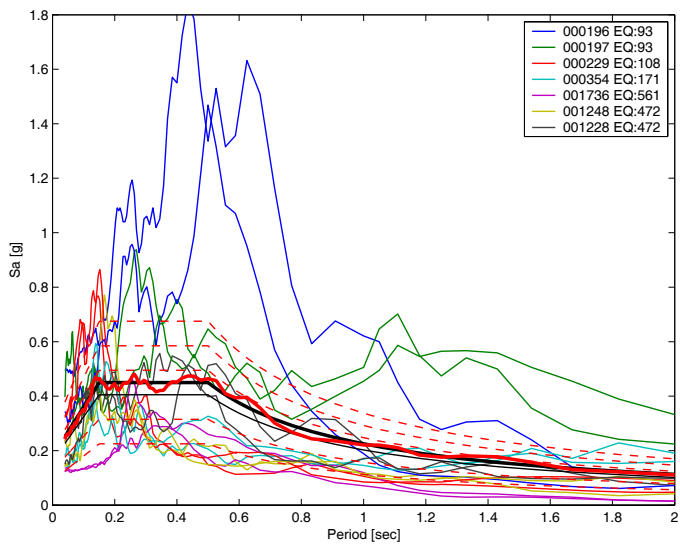


Figura 22. Sito di classe B zona 3 ($a_g = 0,15g$). Combinazione di 14 registrazioni compatibile con le prescrizioni dell'EC8.

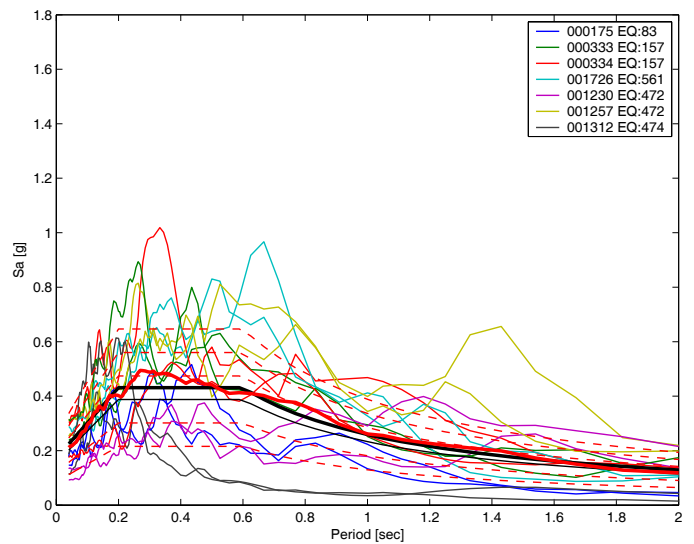


Figura 25. Sito di classe C zona 3 ($a_g = 0,15g$). Combinazione di 14 registrazioni compatibile con le prescrizioni dell'EC8.

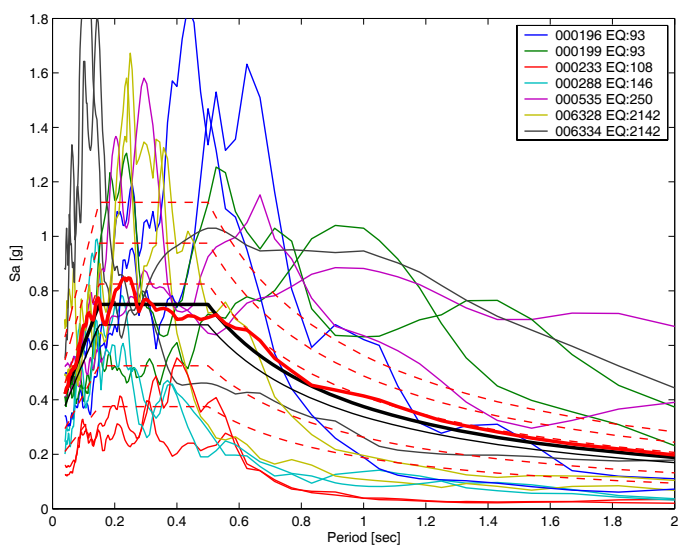


Figura 23. Sito di classe B zona 2 ($a_g = 0,25g$). Combinazione di 14 registrazioni compatibile con le prescrizioni dell'EC8.

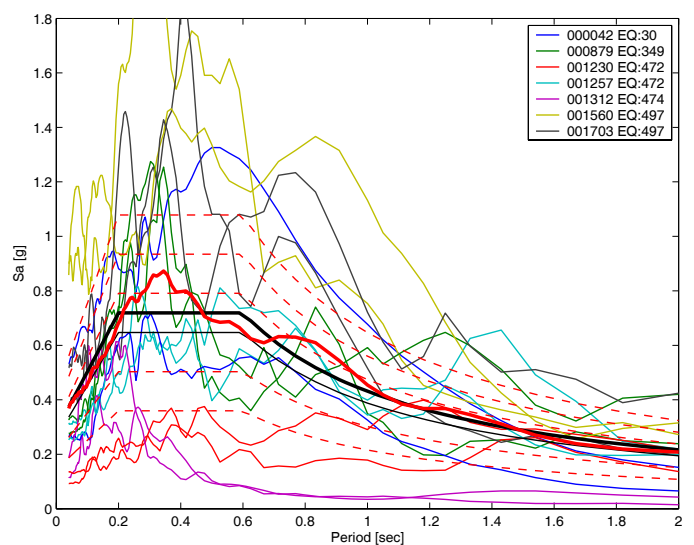


Figura 26. Sito di classe C zona 2 ($a_g = 0,25g$). Combinazione di 14 registrazioni compatibile con le prescrizioni dell'EC8.

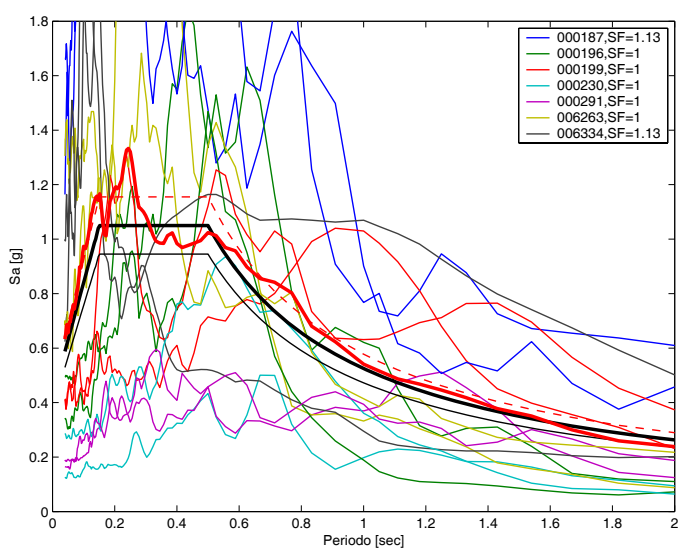


Figura 24. Sito di classe B zona 1 ($a_g = 0,35g$). Combinazione di 14 registrazioni compatibile con le prescrizioni dell'EC8 (SF = fattore di scala).

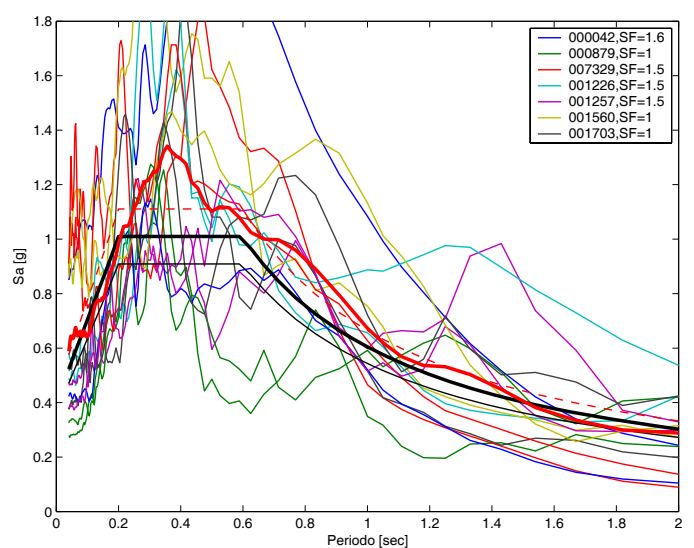


Figura 27. Sito di classe C zona 1 ($a_g = 0,35g$). Combinazione di 14 registrazioni compatibile con le prescrizioni dell'EC8 (SF = fattore di scala).

7 CONCLUSIONI

Lo studio presentato ha investigato la possibilità di individuare registrazioni accelerometriche naturali che possono essere usate come input per l'analisi dinamica non-lineare delle strutture in accordo ai criteri stabiliti dall'OPCM 3431. Alle prescrizioni di normativa sono stati aggiunti altri parametri ritenuti importanti nella selezione e che consentono di individuare le soluzioni che, rispettando la normativa, permettono di stimare correttamente la domanda sismica.

Sebbene il codice affermi che il numero minimo di gruppi di accelerogrammi da considerare in una singola combinazione è pari a 3, le analisi condotte hanno cercato combinazioni di 7 gruppi poiché questo consente di considerare per gli effetti la risposta media sulla struttura in luogo di quella massima.

Le combinazioni individuate fanno riferimento sia alle analisi da eseguire su strutture piane sia alle analisi per gli edifici. Inoltre va considerato che per gruppo la normativa intende l'insieme delle due componenti orizzontali e di quella verticale di un evento sismico: per questo motivo, tenendo presente che non è stata presa in esame la componente verticale necessaria solo in casi particolari, per gli edifici ogni gruppo è costituito da due componenti agenti contemporaneamente nelle due direzioni ortogonali.

È stato possibile pervenire a risultati solo per i suoli A, B e C e nelle zone 2 e 3 caratterizzate da un'accelerazione di picco pari rispettivamente a 0,25 g e 0,15 g. Nella zona 1, è stato ampliato il limite inferiore, ottenendo risultati che opportunamente scalati offrono la garanzia di compatibilità normativa. Per i suoli più soffici (D, E) l'influenza della risposta di sito e la scarsità di registrazioni hanno impedito di trovare combinazioni accettabili perché, in sintesi, per suoli soffici non è possibile stabilire una forma spettrale standard.

L'Eurocodice 8 sul tema dell'impiego degli accelerogrammi per le analisi dinamiche sugli edifici è molto simile all'OPCM 3431, costituendone il riferimento, ma rispetto a quest'ultimo oltre a definire forme spettrali differenti per alcuni suoli, è anche più restrittivo, imponendo un vincolo sulla PGA media della combinazione.

Altri risultati, oltre a quelli brevemente presentati in questa sede, per OPCM 3431 ed EC8, sono reperibili al sito: <http://www.reluis.unina.it>.

RINGRAZIAMENTI

Questo studio è stato sviluppato nell'ambito del progetto triennale, 2006/2008, ReLUIS – Dipartimento della Protezione Civile.

BIBLIOGRAFIA

- Baker, J.W., Cornell, C.A. Spectral shape, epsilon and record selection Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35: 1077-1095, 2006.
- Bommer, J.J., Acevedo, A.B. The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis", Journal of Earthquake Engineering, Vol.8, Special Issue, 1, pp. 43-91, 2004.
- Carballo, J.E., Cornell, C.A. Probabilistic seismic demand analysis: spectrum matching and design, Report No. RMS-41, Reliability of Marine Structures Program, Department of Civil and Environmental Engineering, Stanford University, 2000.
- CEN. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance: – Part 2: Bridges. EN 1998-2, Brussels: 2005.
- CEN. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Final Draft, prEN 1998-1, Brussels: 2003.
- Iervolino, I., Cornell, C.A. Sulla Selezione degli Accelerogrammi nella Analisi Non-Lineare delle Strutture. XI Convegno Nazionale L'Ingegneria Sismica in Italia, Genova, Palazzo Ducale, 2004.
- Iervolino, I., Manfredi, G., Cosenza, E. Ground Motion Duration Effects in Nonlinear Seismic Structural Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35:21-38, 2006a.
- Iervolino, I., Maddaloni, G., Cosenza, E. Unscaled Real Record Sets Compliant With Eurocode 8. Proc. of First European Conference on Earthquake Engineering and Seismology, Geneva, Switzerland, 2006b. Paper Number: 113.
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274, Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici, 2003.
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3431, Ulteriori modifiche ed integrazioni all'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274, 2005.

APPENDICE: SELEZIONE E SCALING DEGLI ACCELEROGRAMMI SECONDO L'EC8 PER L'ANALISI DEI PONTI

Vale la pena, infine, riportare che, mentre nell'OPCM 3431 prescrizioni molto simili a quelle per gli edifici sono date con riferimento ai ponti, sostanziali sono, invece, le differenze tra parte 1 e parte 2 (CEN, 2005) dell'EC8. Infatti, la norma prescrive che per eseguire una analisi non lineare tipo time-history sui ponti, devono essere usate almeno tre coppie di componenti orizzontali del moto sismico. La coerenza di un set di accelerogrammi con lo spettro di risposta elastico di normativa per un coefficiente di smorzamento viscoso equivalente ξ del 5% va cercata applicando le regole seguenti:

a. Per ogni coppia di registrazioni orizzontali di un terremoto si calcola la radice quadrata della somma dei quadrati (SRSS) dei corrispondenti spettri valutati per uno smorzamento viscoso equivalente ξ del 5%.

b. Si determina la media delle SRSS degli spettri calcolati come descritto.

c. La media degli spettri così ottenuti dovrà essere scalata in maniera tale da risultare non inferiore a 1,3 volte lo spettro elastico di riferimento nei periodi compresi tra $0,2 T_1$ e $1,5 T_1$ dove T_1 è il periodo fondamentale della struttura nel caso di ponti duttili, oppure il periodo effettivo (T_{eff}) del sistema di isolamento nel caso di ponti con isolatori sismici.

d. I fattori di scaling devono essere applicati a entrambe le componenti di ciascun terremoto considerato.

e. Nei casi in cui l'analisi time-history richieda di considerare anche la componente verticale del moto sismico, lo scaling di quest'ultima può essere indipendente da quello delle componenti orizzontali e riferita ad un diverso terremoto. L'ordinata spettrale media delle componenti verticali non deve essere minore del 90% di quella dello spettro elastico verticale di normativa nei periodi compresi tra $0,2 T_v$ e $1,5 T_v$ dove T_v è il periodo del modo di vibrazione della struttura con prevalente moto verticale (valutato in termini di massa partecipante).

Anche per i ponti, così come per gli edifici, nell'EC8 parte 2 è chiarito che nel caso in cui si utilizzino almeno 7 diversi gruppi di accelerogrammi gli effetti sulla struttura (sollecitazioni, deformazioni, spostamenti, etc.) potranno essere rappresentati dalle medie dei valori massimi ottenuti dalle analisi; gli effetti massimi dovranno essere considerati nel caso in cui l'analisi sia eseguita con un numero di gruppi di registrazioni inferiore.