

ACCELEROGRAMMI NATURALI COMPATIBILI CON LE SPECIFICHE DELL'OPCM 3274 PER L'ANALISI NON LINEARE DELLE STRUTTURE

**IUNIO IERVOLINO, Università degli studi di
Napoli Federico II**
**GIUSEPPE MADDALONI, Università degli
studi di Napoli Federico II**
**EDOARDO COSENZA, Università degli studi
di Napoli Federico II**

SUMMARY

Among all possible options, natural recordings are emerging as the more attractive input for non-linear dynamic analysis of structures since accessible waveform databases are available and some evidences show that only a limited number of criteria have to be considered in selection to get unbiased estimation of seismic demand. The OPCM 3431, the recently released Italian seismic code, allows the use of real ground motions for the nonlinear seismic analysis of structures. The main constraint to be satisfied by the chosen record set is the matching, of the average spectral ordinates, with the elastic code spectrum. In fact, the latter may not be underestimated more than by 10% in a broad range of periods. Code's spectral shape depends on the seismicity of the site, and on the soil conditions.

The study presented in the paper investigated the European Strong Motion Database to establish whether combinations of records complying with the OPCM 3431 prescriptions, and also accounting for additive constraints believed to matter in the non-linear assessment of buildings, may be found. Results refer to soft soils, stiff soils and rock. The accelerogram sets obtained tend to not overestimate the code's spectrum; to have the minimum record-to-record variability; and are not manipulated (i.e. not scaled), to avoid "epsilon" related issues.

Details about such results and sets to download can be found at <http://www.reluis.unina.it>.

1. INTRODUZIONE

L'OPCM 3431 [01], nell'allegato 2, richiama la questione dell'input sismico per l'analisi dinamica non lineare delle strutture, descrivendo

la possibilità di avere una rappresentazione dell'azione sismica mediante l'uso di accelerogrammi *artificiali, simulati o naturali*.

Gli accelerogrammi artificiali sono tipicamente accelerogrammi derivanti da 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 [02]. Sebbene questi metodi producano registrazioni perfettamente compatibili con le prescrizioni di normativa, alcuni studi discutono che il numero di cicli o l'energia del segnale possono essere lontani da quelli di una registrazione reale o possono condurre ad una stima statisticamente non corretta della risposta non-lineare [03].

Gli accelerogrammi sintetici vengono generati, attraverso la modellazione, con metodi sia deterministici che stocastici, dei meccanismi di nucleazione e/o propagazione degli eventi sismici. Questi metodi sono in grado di simulare gli effetti dei processi fisici connessi col moto al suolo, come la 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, 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; inoltre l'arbitrarietà con cui si assegnano alcuni parametri fisici nei modelli di simulazione ne rendono discutibile l'utilizzo per la stima probabilistica della risposta sismica delle strutture.

Gli accelerogrammi naturali, infine, sembrano essere la più diretta rappresentazione del moto al suolo in quanto riportano in se caratteristiche quali ampiezza, contenuto di frequenze e di 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 hanno investigato l'utilizzo di records reali per la valutazione sismica delle strutture, in questo lavoro si è ritenuto opportuno focalizzare l'attenzione sulle registrazioni naturali come input per l'analisi dinamica non lineare sebbene, come discusso nel seguito, la normativa italiana sembra favorire gli accelerogrammi generati per avere uno spettro simile a quello prescritto.

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

analisi piane che spaziali, compatibili con i criteri della normativa italiana [01;04] includendo anche altri vincoli emersi recentemente dalla ricerca come importanti nella scelta dell'input sismico per l'analisi non-lineare delle strutture [05]. I risultati trovati si riferiscono a combinazioni rispondenti ai criteri di norma per i suoli di tipo rigido e per la roccia. Gli accelerogrammi considerati sono intenzionalmente *non scalati*, tuttavia per ridurre la variabilità degli spettri all'interno delle combinazioni si sono anche ricercate combinazioni 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.

2. PRESCRIZIONI DELL'OPCM 3431 SULL'USO DI ACCELEROGRAMMI

Nel paragrafo 3.2.7 *–Impiego di accelerogrammi–* la norma impone che la combinazione di accelerogrammi utilizzata, 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 presentare uno scarto 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 in campo elastico. (Nel presente lavoro la coerenza tra l'ordinata spettrale media e lo spettro di norma è stata verificata in un range di periodo compreso tra $0,147 \text{ s}$ e $2,0 \text{ s}$ e quindi per strutture con periodo fondamentale fino ad 1 secondo.)

Per quanto riguarda il numero di accelerogrammi che costituiscono una combinazione bisogna dapprima chiarire il concetto di *gruppo*. Ciascun gruppo è costituito dall'insieme delle due registrazioni orizzontali e da quella verticale di una singola stazione sismica. Secondo la norma una combinazione per l'analisi strutturale deve essere costituita 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 nei seguenti casi:

- Elementi pressoché orizzontali con luce superiore ai 20 m;
- Elementi a mensola;
- Pilastri in falso;
- Edifici con piani sospesi;
- Elementi principali precompressi,

si è ritenuto opportuno nello studio qui presentato non considerare la componente verticale per cui i risultati si applicano ad edifici di luci non elevate, mentre per le strutture industriali (prefabbricate e di grande luce) è attualmente in corso un'analisi che mira a trovare combinazioni che includono tutte le tre componenti dell'azione sismica. Inoltre nel seguito si distingue tra analisi non lineari su strutture piane, in cui l'azione sismica può essere considerata come agente secondo una sola direzione, e le strutture spaziali per cui l'analisi va svolta con riferimento a due direzioni orizzontali.

2.1. Spettri di normativa

La definizione dello 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 (V_{s30} superiori a 800 m/s);
- B - Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti (velocità delle onde di taglio (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 $V_{s30} > 800$ m/s).

In aggiunta a queste categorie, se ne definiscono altre due, S1, S2, per le quali sono richiesti caratterizzazioni speciali e che sono state escluse dal presente studio.

Le forme spettrali per le cinque categorie principali di suolo sono riassunte in Figura 1, si noti che esse differiscono, per alcuni suoli da quelle prescritte dall'Eurocodice 8.

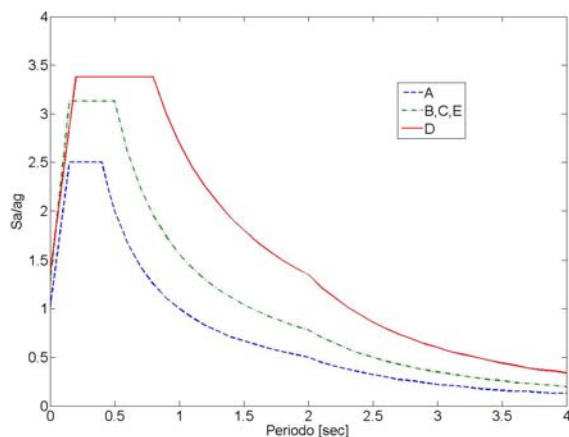


Figura 1. Forme spettrali nell'OPCM 3431

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.

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

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

2.2. Dimensione del campione e tipo di analisi

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

- In tal caso 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 delle strutture

Secondo la norma il set (combinazione) di accelerogrammi che può essere utilizzato per eseguire analisi non lineari su edifici, deve dunque essere composto da 14 registrazioni (cioè 7 gruppi costituiti da due direzioni orizzontali) 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 piane, invece, la media sarà eseguita solo su 7 registrazioni in quanto ciascun gruppo è costituito da un singolo accelerogramma. Nel seguito sono discusse combinazioni per entrambi i tipi di analisi, sia piane che spaziali.

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, tuttavia, si è scelto di considerare alcuni criteri aggiuntivi, in quanto 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 per ciascuna combinazione individuata:

- La deviazione dello spettro medio della combinazione da quello di normativa;
- La deviazione massima del singolo spettro di un accelerogramma appartenente alla combinazione da quello di normativa;
- L'intervallo di magnitudo degli eventi da cui provengono gli accelerogrammi di ciascuna combinazione;
- Numero di eventi sismici diversi all'interno della combinazione differenti.

a) La deviazione dello spettro medio (σ) fornisce una misura quantitativa dello scostamento che assume l'andamento dello spettro medio, relativo alla singola combinazione, nei confronti dello spettro elastico target (Figura 2). Tale deviazione è stata calcolata secondo la seguente 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 della pseudo-accelerazione relativa allo spettro 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 che definiscono uno spettro reale medio che si discosta meno da quello di normativa e quindi di ovviare ad un'eventuale sovrastima della risposta sismica.

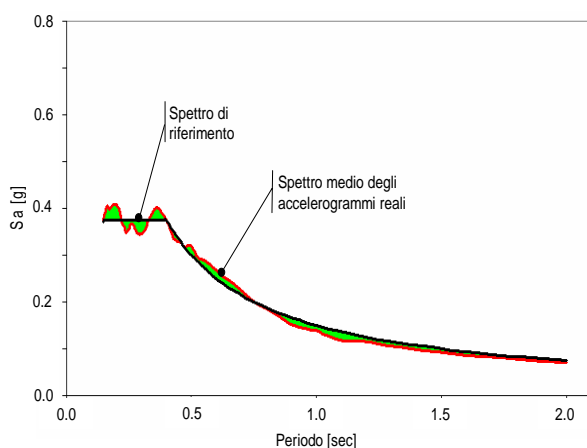


Figura 2. Esempio di spettro medio della combinazione che devia poco dallo spettro target.

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 non solo lo spettro medio è compatibile con quello di normativa, ma anche in cui gli spettri delle singole registrazioni si discostino 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 rappresentati nella combinazione. Alcuni studi [06], 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, corrispondente ad uno scenario di progetto, perché 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 identificate e rispondenti ai criteri di norma. Infatti, ad ogni terremoto possono corrispondere più registrazioni accelerometriche ottenute da strumenti di misura (accelerometri) disposti in diversi siti del territorio. Sono state individuate, quando possibile, quelle combinazioni caratterizzate da registrazioni avente tutte codice diverso in maniera tale che l'analisi non fosse condizionata da pochi eventi dominanti.

Non sono stati considerati, se non indirettamente, altri criteri quali durata e distanza tra registrazione e sorgente dell'evento, tenuto conto che diversi studi dimostrano la loro importanza solo sotto determinate condizioni [07].

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 accesso a molte registrazioni accelerometriche. Nel presente lavoro si è scelto di utilizzare quelle disponibili nel sito internet dello European Strong-motion Database – ESD (<http://www.isesd.cv.ic.ac.uk>). In

esso sono presenti records a partire dal terremoto di Debar (Macedonia) del 2 dicembre 1967. In particolare, si è focalizzata l'attenzione su tutti gli accelerogrammi relativi ai terremoti europei 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).

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

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

Successivamente, sui suoli A, B, C, E è stata applicata una selezione preliminare escludendo quelle stazioni in cui non erano presenti entrambe le componenti orizzontali e le registrazioni poco significative dal punto di vista della magnitudo, considerando pertanto solo gli eventi caratterizzati da una magnitudo momento (Mw) medio-alta (almeno pari a 5,8). Così facendo, è stato possibile ridurre drasticamente il numero delle records da analizzare e quindi i tempi di calcolo. I risultati della preselezione sono riportati in Tabella 3. Per il suolo D, non è stato operato nessun taglio preliminare, tenuto conto della penuria di registrazioni esistenti per questo tipo di suolo nel data-base. Nella Tabella 5 vengono sinteticamente indicate le nazioni da cui derivano le registrazioni usate come input nella ricerca, mentre nella Tabella 5 sono indicati i terremoti che hanno un numero di registrazioni più elevato. Non a caso i paesi rappresentati sono Italia, Turchia e Jugoslavia che notoriamente sono zone a sismicità medio-alta e dotate nel contempo di vaste reti di strumenti di registrazione.

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

Tabella 3. Numero totale delle registrazioni considerate nelle analisi

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

Tabella 4. Numero totale delle registrazioni presenti nel sito distinte per nazione

| TERREMOTO E NAZIONE | REGISTRAZIONI (E-O + N-S) |
|-------------------------|------------------------------|
| Campano-Lucano (Italia) | 42 |
| Duzce 1 (Turchia) | 92 |
| Friuli (Italia) | 60 |
| Izmit (Turchia) | 124 |
| Montenegro (Yugoslavia) | 76 |

Tabella 5. Numero delle registrazioni dei terremoti più rappresentati

5. ANALISI E RISULTATI

Per trovare 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 di tutte le combinazioni di 7 gruppi di accelerogrammi (sette o quattordici spettri nel caso di combinazioni per analisi piane o spaziali rispettivamente) tra quelli considerati come input delle analisi. Infatti 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 da 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 e discussi nel paragrafo 3.

I risultati per le combinazioni per analisi spaziali (7 gruppi di accelerogrammi che includono le 2 componenti orizzontali di 7 stazioni) 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.

Vale la pena sottolineare che è stato imposto nelle analisi che le combinazioni includessero sempre entrambe le componenti orizzontali di una stessa stazione sismica, per cui i 14 accelerogrammi del gruppo vengono sempre da soli 7 strumenti di registrazione.

Dai risultati si evince che per i suoli D ed E, non è stato possibile trovare combinazioni accettabili e che essendo gli spettri relativi ad una pericolosità più elevata si riferiscono ad eventi con una più bassa probabilità di accadimento, a parità di scostamento, il numero delle combinazioni trovate tende a crescere al passare dalla zona 1 alla zona 3.

| SUOLO | ZONA | TOL INF [%] | TOL SUP [%] | COMB. TROVATE |
|-------|------|-------------|-------------|---------------|
| A | 1 | 30 | 100 | 15 |
| | 2 | 10 | 100 | 452 |
| | 3 | 10 | 10 | 3673 |
| B | 1 | 20 | 100 | 1256 |
| | 2 | 10 | 30 | 20338 |
| | 3 | 10 | 20 | 24081 |
| C | 1 | 40 | 100 | 2 |
| | 2 | 20 | ∞ | 48 |
| | 3 | 10 | 15 | 12230 |

Tabella 6. Combinazioni trovate per analisi spaziali.

Inoltre per la zone 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 in PGA) consentite dalla norma. In questi casi, 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.

A titolo di esempio, nelle Figure da 3 a 11 si riportano alcuni risultati relativamente alle analisi spaziali per il suolo A,B e C e le tre zone sismiche 1,2,3 di riferimento normativo. (Le linee spesse rappresentano lo spettro medio e di normativa. In legenda i codici della stazione e dell'evento sismico secondo l'ESD)

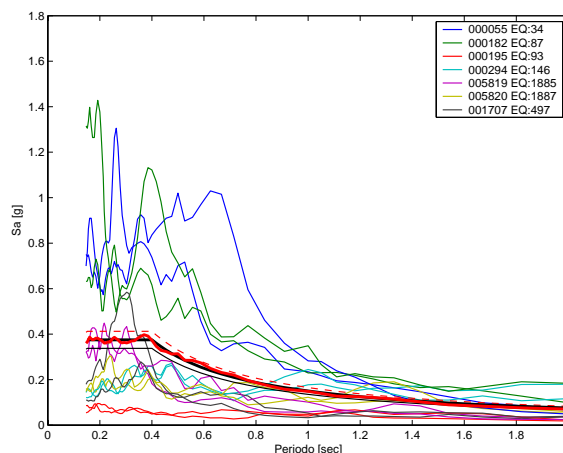


Figura 3. Suolo A. Zona 3 ($a_g = 0,15g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

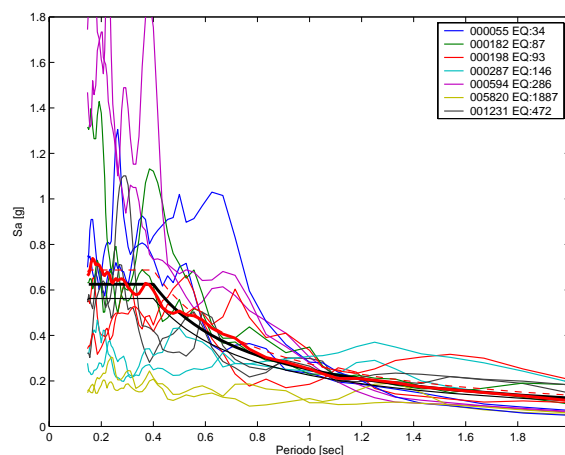


Figura 4. Suolo A. Zona 2 ($a_g = 0,25g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

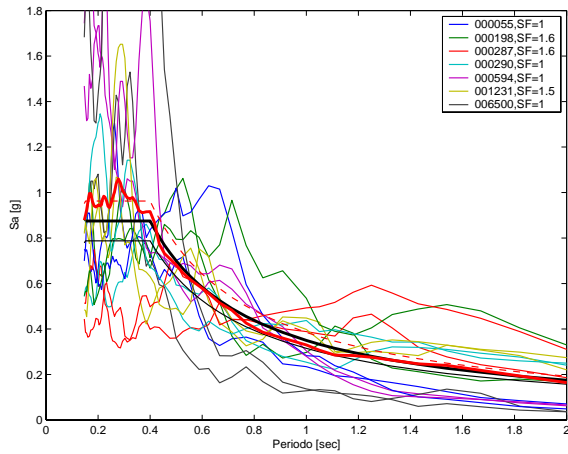


Figura 5. Suolo A. Zona 1 ($a_g = 0,35g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

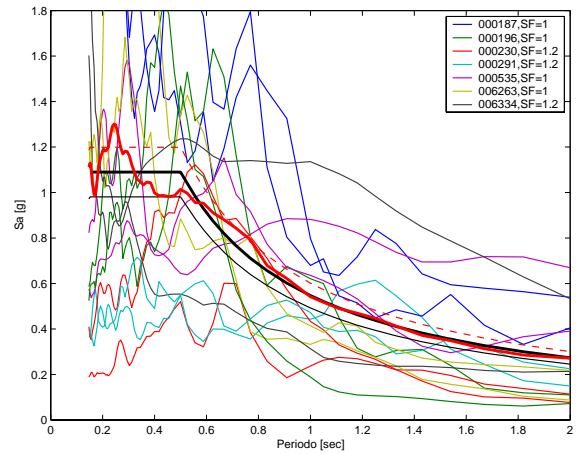


Figura 8. Suolo B. Zona 1 ($a_g = 0,35g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

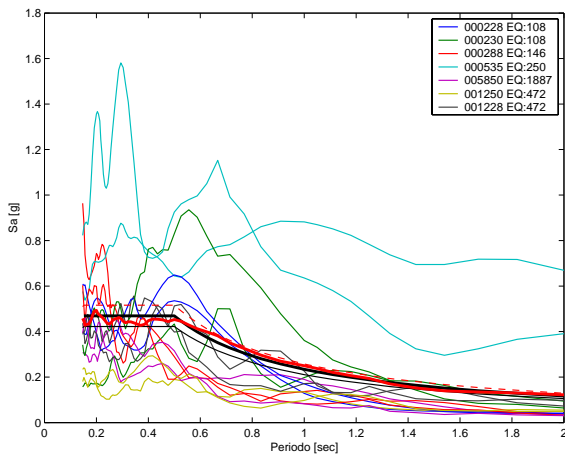


Figura 6. Suolo B. Zona 3 ($a_g = 0,15g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

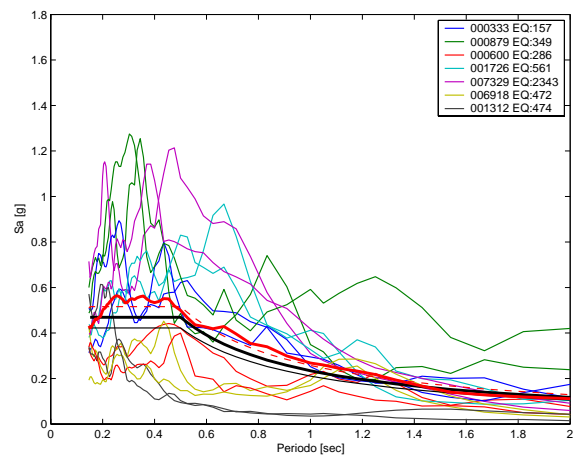


Figura 9. Suolo C. Zona 3 ($a_g = 0,15g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

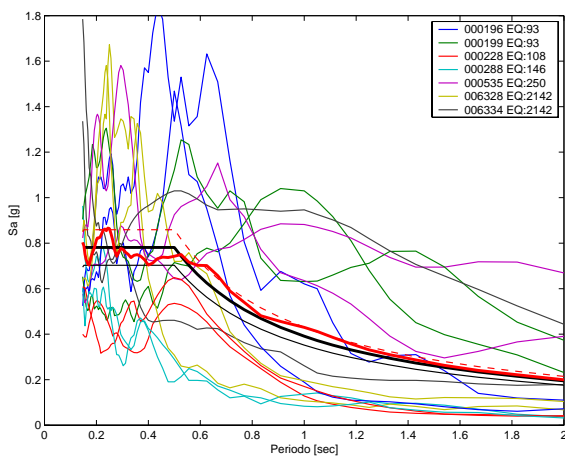


Figura 7. Suolo B. Zona 2 ($a_g = 0,25g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

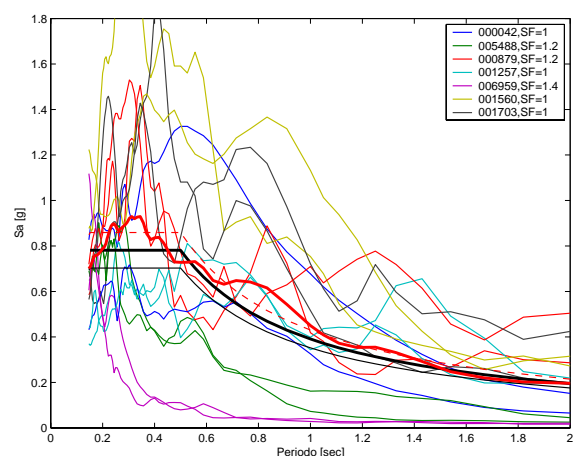


Figura 10. Suolo C. Zona 2 ($a_g = 0,25g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

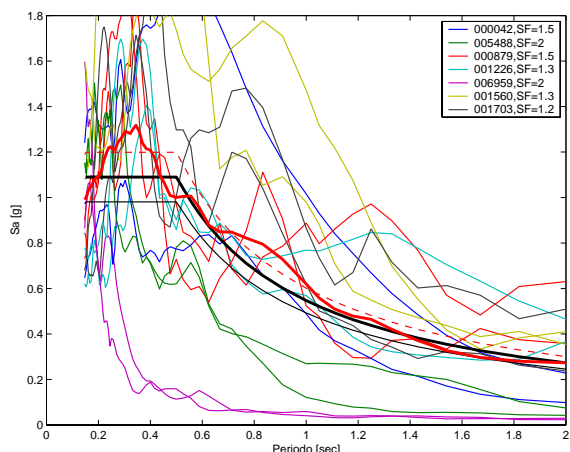


Figura 11. Suolo C. Zona 1 ($a_g = 0,35g$). Set di 7 gruppi di 2 componenti orizzontali.

In particolare le combinazioni riportate per 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 1.2) di alcuni accelerogrammi per ottenere uno spettro medio avente i requisiti prescritti dall'OPCM 3431.

Nei diagrammi dalla Figura 12 alla Figura 14 sono riportati risultati, per il suolo A, per analisi piane, cioè combinazioni costituite da sole sette registrazioni. In particolare le combinazioni illustrate sono quelle caratterizzate dalla minore variabilità degli spettri dei singoli eventi rispetto allo spettro di riferimento.

Dettagli su questi ed altri risultati sono reperibili nell'allegato a questo documento presente sul sito della Rete dei Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica – ReLUIS.

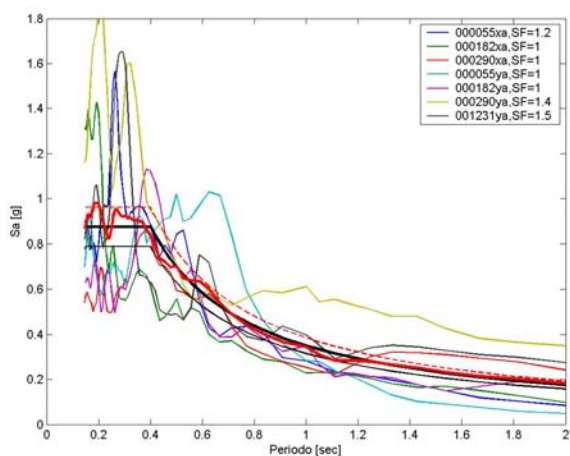


Figura 12. Suolo A zona 1 ($a_g = 0,35g$). Combinazione di 7 registrazioni.

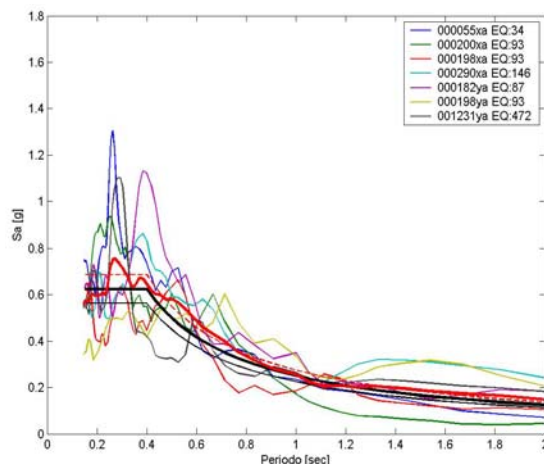


Figura 13. Suolo A zona 2 ($a_g = 0,25g$). Combinazione di 7 registrazioni.

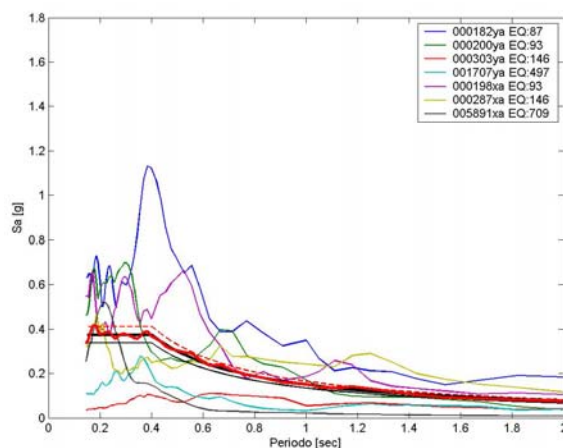


Figura 14. Suolo A zona 3 ($a_g = 0,15g$). Combinazione di 7 registrazioni.

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 combinazioni di accelerogrammi più raccolte 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. Un esempio di questo tipo di combinazione è dato in Figura 15 per le analisi spaziali e in Figura 16 per analisi piane. E' evidente che tali risultati sono indipendenti dalla zona sismica in

quanto si riferiscono allo spettro di normativa adimensionalizzato.

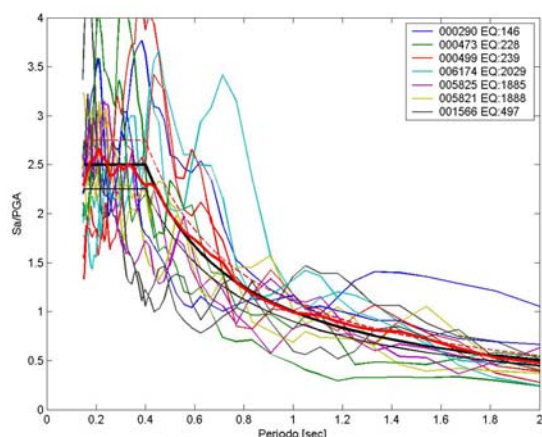


Figura 15. Suolo A. Combinazione adimensionale per analisi spaziali.

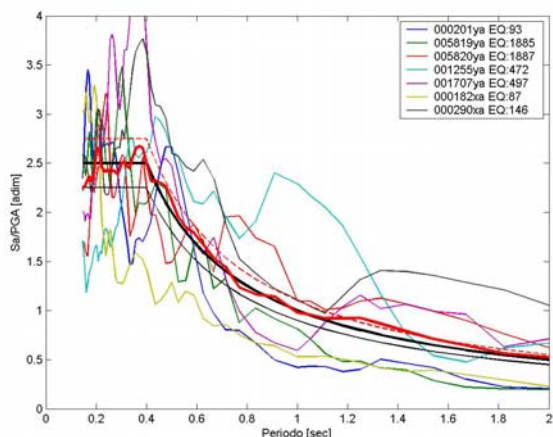


Figura 16. Suolo A. Combinazione adimensionale per analisi piane.

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 superiori a 10 e quindi elevati.

6. CONCLUSIONI

E' qui presentato uno studio che ha investigato la possibilità di individuare combinazioni di registrazioni accelerometriche naturali che rispettino i criteri stabiliti dall'OPCM 3431 per l'analisi dinamica non-lineare delle strutture. Alle prescrizioni di normativa sono

aggiunti altre ritenute importanti nella selezione che si sintetizzano sostanzialmente in pochi parametri e consentono di individuare le soluzioni che, rispettando la normativa, consentano almeno in linea di principio 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, tra l'altro, consente di considerare la risposta media della struttura in luogo di quella massima.

Le combinazioni individuate fanno riferimento ai criteri relativi sia alle analisi condotte su strutture piane sia alle analisi spaziali e quindi agli edifici. Inoltre bisogna va considerato che, per gruppo la normativa intende l'insieme delle due componenti orizzontali e di quella verticale di una registrazione accelerometrica: per questo motivo, tenendo presente che non è stata comunque mai 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 relativi solo ai suoli A, B e C e nelle zone 2 e 3 caratterizzate da un'accelerazione di picco al suolo 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 come quella prescritta dall'ordinanza.

Sebbene siano stati trovati risultati in termini di accelerogrammi naturali va notato che, ciò ha richiesto uno studio molto esteso e lunghe analisi all'interno di un largo database come quello europeo e si può concludere che la norma favorisce senza dubbio l'utilizzo di segnali generati o modificati in modo da avere una forma spettrale compatibile con quella dello spettro normativo rendendo la ricerca di quelli reali molto complicata per i professionisti.

Va altresì sottolineato che i criteri normativi non permettono di applicare direttamente la migliore pratica corrente per la selezione degli accelerogrammi reali così come suggerita dalla ricerca e quindi l'utilizzo, per l'analisi strutturale, dei risultati qui forniti richiede un esteso studio di validazione, soprattutto per quelle combinazioni che per rispettare lo spettro

medio contengono allo stesso spettri molto dissimili.

Va altresì sottolineato che la dimensione della combinazione (7 gruppi) non sempre è sufficiente per la stima efficace della variabilità della risposta sismica e una larga campagna di validazione dei criteri di selezione sarebbe necessaria.

In conclusione, si rileva che l'Eurocodice 8 [08] in merito all'impiego degli accelerogrammi per le analisi dinamiche non lineari è molto simile all'OPCM 3274. Esso prescrive dispone che l'ordinata media spettrale della combinazione di registrazioni considerata non deve eccedere per il 10% in difetto l'ordinata corrispondente dello spettro elastico, nell'intervallo di periodi $0.15 T$ e $2.0 T$ con T periodo fondamentale della struttura e che la media per $T=0$ delle accelerazioni spettrali non deve essere più piccola del valore del valore di ancoraggio dello spettro normativo per lo specifico sito in esame. In sintesi, l'Eurocodice 8, oltre che definire forme spettrali diverse per alcuni suoli rispetto all'ordinanza, è più restrittivo di quest'ultima imponendo anche un vincolo 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>.

BIBLIOGRAFIA

- [01] **Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3431**, Ulteriori modifiche ed integrazioni all'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274, 2005.
- [02] **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.
- [03] **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.
- [04] **Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274**, Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici, 2003.
- [05] **Baker, J.W., Cornell, C.A.** Spectral shape, epsilon and record selection Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35: 1077-1095, 2006.
- [06] **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.
- [07] **Iervolino, I., Manfredi, G., Cosenza, E.** Ground Motion Duration Effects in Nonlinear Seismic Structural Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 35:21-38, 2006.
- [08] **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, 2006. Paper Number: 113.

Contatti con gli autori:

Iunio Iervolino: iunio.iervolino@unina.it

Giuseppe Maddaloni: gmaddalo@unina.it

Edoardo Cosenza: cosenza@unina.it