

Sulla selezione degli accelerogrammi secondo la circolare applicativa delle NTC18

A note on the selection of accelerograms according to the circular on the application of the NTC18

Roberto Baraschino¹, Georgios Baltzopoulos¹, Iunio Iervolino¹ ■

Sommario

In merito alla selezione degli accelerogrammi per l'analisi dinamica delle strutture, le norme tecniche per le costruzioni italiane, così come l'Eurocodice 8 parte 1 (edifici), prescrivono la compatibilità media degli spettri selezionati con lo spettro di progetto. Nel caso di analisi di modelli tridimensionali, la pratica dell'ingegneria sismica intende la spettro-compatibilità degli spettri di entrambe le componenti orizzontali mediati insieme, il che, nel caso in cui il rispetto del vincolo di compatibilità richieda modificare in ampiezza i segnali, può portare a fattori di scala diversi tra le due componenti di una stessa registrazione. La circolare ministeriale di accompagnamento alla recente revisione delle norme tecniche per le costruzioni, in maniera simile all'Eurocodice 8 parte 2 (ponti), suggerisce, per evitare ciò, la spettro-compatibilità media di spettri ottenuti dalla radice quadrata della somma dei quadrati delle due componenti di una stessa registrazione. Obiettivo del lavoro presentato in questa breve nota, è investigare se la procedura già consolidata nella pratica garantisca anche di soddisfare il criterio introdotto nella circolare. Infine, si discute anche che la procedura generalmente seguita, molto spesso, consente di separare le componenti orizzontali delle registrazioni di una stessa selezione, trovando due combinazioni che sono anch'esse spettro-compatibili.

Parole chiave: Input sismico, spettro di progetto, pericolosità, azioni sismiche.

Abstract

Regarding the selection of accelerograms for dynamic analysis of structures, the Italian building code (Norme Tecniche per le Costruzioni), as well as the Eurocode 8 part 1 (rules for buildings), require that the mean of the selected response spectra be compatible with the design spectrum. In the case of three-dimensional models, earthquake engineering practice holds this spectral compatibility to be satisfied by the mean resulting from pooling both horizontal components of all records together and taking the average; in this context, if scaling records in amplitude is considered admissible, this practice may lead to different scale factors being applied to the two components of a single ground motion record. The ministry's circular that accompanies the recently updated Italian building code, suggests to avoid this by adopting a procedure similar to the one in the Eurocode 8 part 2 (rules for bridges), whereby average spectrum compatibility is to be guaranteed by the mean of the square root of the sum of squares of the two horizontal components in each record. The aim of this short note is to discuss whether the already-established procedure leads to record selections that simultaneously satisfy the criterion introduced by the circular. Finally, it is discussed that this same procedure often allows to consider the two horizontal components separately, splitting the selection into two combinations that are also spectrum-compatible on their own.

Keywords: Seismic input, design spectrum, hazard, seismic loads.

1. Introduzione

La recenti norme tecniche per le costruzioni (di seguito NTC18; CS.LL.PP., 2018), così come le precedenti NTC08 (CS.LL.PP., 2008) e come l'Eurocodice 8 (EC8) parte 1 (edifici) e parte 2 (ponti) (CEN, 2004, 2005), consentono le analisi strutturali dinamiche, utilizzando storie temporali del moto del terreno (*artificiali, simulate o naturali*) applicate a modelli tridimensionali delle strutture e aventi, quindi, due componenti orizzontali e, in alcuni casi, una verticale. Nel caso di utilizzo di accelerogrammi naturali, cioè registrati in terremoti già occorsi, il numero minimo di registrazioni prescritto, affinché si possa considerare la media degli effetti strutturali di tali segnali, è pari a sette. Ciò significa che, per una struttura rappresentata da un modello numerico per cui si prendano in considerazione le sole componenti orizzontali del moto, va selezionato un minimo di quattordici forme d'onda, provenienti da sette registrazioni sismiche. Il requisito principale per gli accelerogrammi selezionati, che formano quella che chiameremo di seguito una *combinazione*, è che la media degli spettri di risposta sia *compatibile* con lo spettro elastico di progetto o *spettro obiettivo*. Ciò significa che tale media deve essere simile, entro alcune tolleranze, allo spettro obiettivo in un certo intervallo di periodi di vibrazione, T .

¹ Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura, Università degli Studi di Napoli Federico II

Le NTC18, recitando: *la compatibilità con lo spettro di risposta elastico deve essere verificata in base alla media delle ordinate spettrali ottenute con i diversi accelerogrammi associati alle storie*, non forniscono specifiche ulteriori nel caso di modelli tridimensionali. In altre parole, la spettro-compatibilità può essere raggiunta, ad esempio, confrontando la media degli spettri ottenuta da entrambe le componenti delle registrazioni.¹ Un esempio in tal senso è riportato in Figura 1a, dove è illustrata una ipotetica selezione di sette coppie di segnali. Nella figura, oltre allo spettro obiettivo, sono indicate le tolleranze di spettro-compatibilità, l'intervallo di periodi entro cui è verificata la compatibilità della combinazione, lo spettro medio della stessa, ottenuto mediando tutte le quattordici componenti orizzontali, nonché le due componenti di ciascuna registrazione, arbitrariamente indicate come x e y .

Questa procedura, che in qualche modo è congruente anche con le indicazioni dello EC8-parte 1, porta alcuni vantaggi ampiamente discussi in letteratura (i.e., Iervolino, Maddaloni e Cosenza, 2008, 2009) ed è, da molti anni, pratica corrente dell'ingegneria sismica. D'altra parte, è noto che nel caso di utilizzo di accelerogrammi *scalati*, i quali cioè per verificare il criterio di spettro-compatibilità debbano essere modificati in ampiezza, mediare insieme entrambe le componenti, può portare ad alterare il rapporto tra le ordinate spettrali delle due componenti di una stessa registrazione. Per evitare questo effetto, non espressamente considerato preoccupante dalle NTC (2008 e 2018) e dallo EC8-parte 1, la *circolare applicativa* delle NTC18 (CS.LL.PP., 2019), apparentemente rifacendosi alle prescrizioni EC8-parte 2, suggerisce che per ciascuna registrazione si costruisca la radice quadrata della somma dei quadrati, o SRSS, degli spettri delle due componenti orizzontali. Per la verifica di spettro-compatibilità si devono mediare gli spettri SRSS di tutte le registrazioni della combinazione; tale media deve essere poi confrontata con lo spettro obiettivo amplificato di un coefficiente,² che può essere pari a 1.3. Un esempio di combinazione spettro-compatibile di questo tipo è riportato in Figura 1b, dove ci sono gli spettri SRSS delle sette registrazioni, nonché la loro media e lo spettro obiettivo amplificato di 1.3. La combinazione rappresentata nella figura, nonché lo spettro obiettivo, sono gli stessi della Figura 1a.

La procedura suggerita dalla circolare e dall'EC8-parte 2, oltre che creare un'apparente disomogeneità rispetto alle stesse NTC18 e lo EC8-parte 1, pone il tema se sia necessario aggiornare le procedure adottate negli strumenti dedicati alla selezione degli accelerogrammi (e.g., Iervolino, Cosenza e Galasso, 2009; Iervolino e Galasso, 2010; Iervolino, Galasso e Cosenza, 2010; Sgobba *et al.*, 2019). Per questo, l'obiettivo del semplice studio qui presentato è investigare la questione. A tal fine, si discutono tre strategie di selezione, che danno luogo a sette casi studio, per ciò che attiene alla selezione di registrazioni accelerometriche che includano le due componenti orizzontali del moto sismico, come descritto qui di seguito.

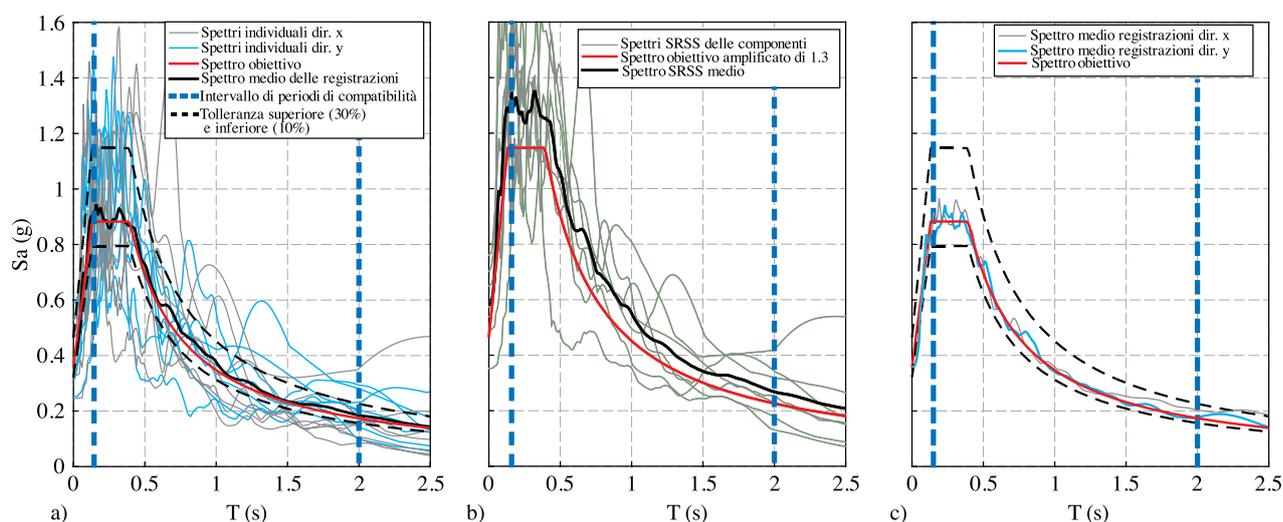


Figura 1 - Esempio di selezione di una combinazione di sette registrazioni in accordo con le prescrizioni delle NTC18 (a); selezione ottenuta confrontando lo spettro medio SRSS con lo spettro obiettivo amplificato moltiplicandolo per 1.3 (b); spettro-compatibilità media delle due componenti orizzontali considerate separatamente (c).

¹ In effetti, un approccio più rigoroso richiederebbe di ragionare sulla misura di intensità considerata nel derivare lo spettro obiettivo. Tale aspetto è qui tralasciato.
² Per esempio, per il confronto, lo spettro SRSS non deve essere mai inferiore allo spettro obiettivo amplificato.

1. Selezione di accelerogrammi *non scalati*, ai sensi delle NTC18, per i quali si verificano a posteriori i criteri di cui alla circolare.
2. Selezione di accelerogrammi *scalati* per investigare la differenza che sussiste tra i fattori di scala delle due componenti orizzontali di una stessa registrazione, quando l'algoritmo di selezione può indurre tale differenza.
3. Ancora nel caso di selezione di accelerogrammi scalati, si indaga la spettro-compatibilità delle combinazioni ottenute separando le due componenti delle registrazioni. (Una selezione di questo tipo è illustrata nella Figura 1c, dove il criterio adottato è che entrambe le combinazioni ottenute separando le due componenti di ciascuna registrazione verificano la spettro-compatibilità).

L'articolo è strutturato in modo che si discutano prima i criteri per la selezione di cui alle NTC18 e alla circolare applicativa delle stesse (per completezza si discutono anche le differenze rispetto all'Eurocodice). Quindi, si descrivono i casi studio e le procedure di selezione delle combinazioni, insieme alla base dati di riferimento per le forme d'onda. Successivamente si discutono i risultati delle applicazioni. Alcune conclusioni chiudono il lavoro.

2. I criteri per la selezione degli accelerogrammi

2.1 NTC18 ed EC8-parte 1

Allo §3.2.3.6 le NTC18 indicano che l'utilizzo di storie temporali del moto del terreno naturali (le uniche qui considerate) è consentito verificato che: *la loro scelta sia rappresentativa della sismicità del sito e sia adeguatamente giustificata in base alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente, alle condizioni del sito di registrazione, alla magnitudo, alla distanza dalla sorgente e alla massima accelerazione orizzontale attesa al sito.*³ Inoltre, le NTC18 impongono che la media delle ordinate spettrali in pseudo-accelerazione, con smorzamento viscoso $\xi = 5\%$, di tutte le registrazioni selezionate (scalate o meno) deve essere compatibile con lo spettro obiettivo all'interno di un dato intervallo di periodi (T_{min} , T_{max}) che dipende dallo stato limite (SL) considerato e nel rispetto di certi limiti di tolleranza (e.g., la Figura 1a).

Le NTC18 (così come le NTC08), nel caso di strutture non isolate, fissano $T_{min} = 0.15$ s, mentre fanno variare T_{max} a seconda se le analisi siano allo stato limite ultimo (*stato limite di salvaguardia della vita*, SLV; *stato limite di collasso*, SLC) o allo stato limite di esercizio (*stato limite di danno*, SLD). In particolare, agli SLV e SLC, T_{max} è pari al maggiore tra 2 s e $2 \cdot T$, essendo T il periodo fondamentale del modello strutturale, mentre allo SLD deve essere $T_{max} = 1.5 \cdot T$. Per quanto riguarda la tolleranza entro cui la spettro-compatibilità deve essere rispettata, il limite inferiore, al di sotto del quale non bisogna scendere, è pari al 90% dello spettro obiettivo, mentre non bisogna eccedere il 130% dello spettro obiettivo.

Sebbene le applicazioni nel seguito si riferiscano alla normativa italiana, vale la pena confrontare i requisiti delle NTC18 con lo EC8-parte 1. Una prima differenza riguarda l'intervallo di periodi in cui verificare la spettro-compatibilità. In particolare, secondo l'Eurocodice: $T_{min} = 0.2 \cdot T$ e $T_{max} = 2 \cdot T$. Altra differenza tra i due codici riguarda i limiti di tolleranza, infatti l'Eurocodice prevede solo il limite di tolleranza inferiore pari al 90% dello spettro obiettivo. Quanto esposto finora è riassunto nella Tabella 1.

Tabella 1 - Estremi dell'intervallo di periodi e tolleranze da utilizzare nella verifica di compatibilità secondo NTC18 ed EC8-parte 1.

Codice di riferimento	Tolleranza inferiore	Tolleranza superiore	SL	T_{min} [s]	T_{max} [s]
NTC18	90%	130%	SLV e SLC	0.15	$\max(2s; 1.5 \cdot T)$
			SLD	0.15	$1.5 \cdot T$
EC8-parte 1	90%	-	tutti	$0.2 \cdot T$	$2 \cdot T$

2.1.1. REXEL

Queste indicazioni si possono tradurre in un algoritmo di selezione quale REXEL (e.g., Iervolino, Galasso e Cosenza, 2010), di cui di seguito si elencano i soli passi ritenuti rilevanti ai fini dello studio in oggetto e nel caso si considerino selezioni formate da entrambe le componenti orizzontali delle registrazioni sismiche:

- I. definizione dello spettro obiettivo;
- II. assegnazione degli intervalli di periodi di vibrazione e delle tolleranze entro cui verificare la spettro-compatibilità;

³ Dato che lo spettro elastico di progetto delle NTC approssima uno spettro a pericolosità uniforme, l'utilizzo del termine "massima accelerazione attesa al sito" può apparire fuorviante. Infatti, tale valore è atteso sia superato con periodo di ritorno cui lo spettro obiettivo si riferisce e in scenari specifici (e.g., Iervolino e Giorgio, 2017).

- III. preselezione della base dati di accelerogrammi tra cui cercare le combinazioni spettro-compatibili (e.g., in base a parametri geofisici, quali intervalli di magnitudo e distanza-sito-sorgente, o altre misure di intensità sismica, dai quali le registrazioni selezionate devono provenire perché esse siano *rappresentative della sismicità del sito*);
- IV. classificazione degli spettri preselezionati in ordine crescente del parametro di similitudine dei singoli spettri rispetto allo spettro obiettivo in Equazione 1:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{Sa(T_i) - Sa_{target}(T_i)}{Sa_{target}(T_i)} \right)^2}, \quad (1)$$

dove $Sa(T_i)$ rappresenta l'ordinata spettrale i -esima, essendo l'intervallo tra T_{min} e T_{max} discretizzato in N punti, e $Sa_{target}(T_i)$ è l'ordinata dello spettro obiettivo allo stesso periodo (in questo modo ad essere analizzati per primi sono gli accelerogrammi i cui spettri risultano essere più simili, per forma, rispetto allo spettro obiettivo);

- V. si definisce la media delle accelerazioni spettrali delle forme d'onda selezionate all' i -esimo periodo strutturale come:

$$Sa_{media}(T_i) = \frac{1}{14} \cdot \sum_{j=1}^7 [Sa_{j,x}(T_i) + Sa_{j,y}(T_i)], \quad i = \{1, 2, \dots, N\} \quad (2)$$

dove j rappresenta la registrazione mentre $Sa_{j,x}(T_i)$, $Sa_{j,y}(T_i)$ sono rispettivamente l'ordinata spettrale della registrazione j -esima al periodo strutturale per le due componenti orizzontali (x e y) di una singola registrazione;

- VI. ricerca delle combinazioni di quattordici accelerogrammi che, nel rispetto delle tolleranze specificate, mediamente verificano la spettro-compatibilità nell'intervallo di periodi scelto; le combinazioni spettro-compatibili trovate, se più d'una, sono ordinate in modo crescente secondo il parametro (δ_{medio}) definito come:

$$\delta_{medio} = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{Sa_{media}(T_i) - Sa_{target}(T_i)}{Sa_{target}(T_i)} \right)^2}. \quad (3)$$

2.2 La circolare applicativa ed EC8-parte 2

Come anticipato nell'introduzione, la circolare applicativa delle NTC18 propone un criterio diverso per la selezione delle registrazioni, in alcuni aspetti simile a quello che compare nello EC8-parte 2. In particolare, la circolare al §3.2.3.6, suggerisce l'utilizzo di un unico fattore di scala per entrambe *selezionato in modo da rendere la risultante delle azioni sismiche nel piano orizzontale compatibile con lo spettro risultante*. La procedura per ottenere tale risultato è costituita dai seguenti passi:

- I. per ognuna delle due componenti di una registrazione si costruiscono gli spettri SRSS come in Equazione 4:

$$Sa_{j,SRSS}(T_i) = \sqrt{Sa_{j,x}(T_i)^2 + Sa_{j,y}(T_i)^2}, \quad \forall i = \{1, 2, \dots, N\}; \quad (4)$$

- II. per ogni combinazione candidata ad essere spettro-compatibile, si valuta lo *spettro medio SRSS* all' i -esimo periodo come:

$$Sa_{SRSS}(T_i) = \frac{1}{7} \cdot \sum_{j=1}^7 Sa_{j,SRSS}(T_i); \quad (5)$$

- III. lo spettro medio della combinazione, eventualmente scalato, deve essere confrontato con lo spettro elastico di progetto amplificato di un fattore, per il quale la circolare suggerisce un valore di 1.3; tuttavia *i criteri di coerenza spettrale* secondo cui fare il confronto non sono esplicitamente menzionati.

In effetti, in merito ai criteri di coerenza, la circolare potrebbe riferirsi agli stessi delle NTC18; tuttavia, si noti che lo EC8-parte 2 specifica che lo spettro medio SRSS debba essere, nell'intervallo di periodi di interesse, sempre al di sopra dello spettro obiettivo moltiplicato per 1.3. Ciò sembra coerente con lo EC8-parte 1 (e con le NTC08), per cui non c'è un limite di tolleranza superiore, ma solo una tolleranza in difetto, come discusso, pari al 10%.⁴ Lo EC8-parte 2 chiarisce inoltre che, in caso di necessità di scalare lo spettro medio SRSS, per soddisfare il requisito di coerenza spettrale appena esposto, il fattore di scala ricavato deve essere applicato a tutti gli accelerogrammi della combinazione selezionata, senza differenziazioni tra registrazioni. In effetti, la nuova procedura introdotta dalla circolare sembra proprio voler evitare fattori di scala molto diversi tra le due componenti di una stessa registrazione.

⁴ Nel caso ideale in cui le due componenti di una registrazione abbiano lo stesso spettro di risposta, lo spettro SRSS di queste è pari allo spettro stesso moltiplicato per 1.4. Quindi, confrontare lo spettro medio SRSS delle sette registrazioni con lo spettro obiettivo amplificato del 30%, in tal caso, sarebbe equivalente a comparare lo spettro medio SRSS con lo spettro obiettivo ridotto del 10%.

3. Metodo

Al fine di investigare quanto introdotto si considera, arbitrariamente, una struttura avente periodo fondamentale elastico $T = 0.8 \text{ s}$, classe d'uso II (§2.4.2 NTC18) che debba essere progettata alternativamente in due siti con condizione topografica T1 (§3.2.2 NTC18). I siti sono Cosenza e Milano (Figura 2a), e per ciascuno di essi si considerano due classi di sito, A e C (secondo la classificazione delle norme). Gli spettri obiettivo considerati fanno riferimento a: SLC, SLV e SLD, per ciascuno dei due siti e per ciascuna condizione di suolo (Figura 2b). La Tabella 2 riassume i sette casi studio risultanti.

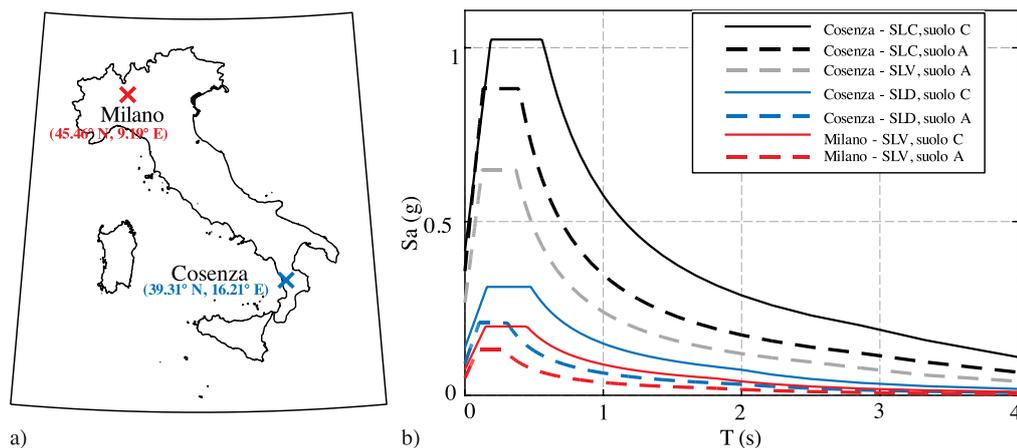


Figura 2
Localizzazione geografica dei siti (a). Spettri obiettivo (costruiti secondo NTC18) utilizzati per i casi studio di selezione degli accelerogrammi (b).

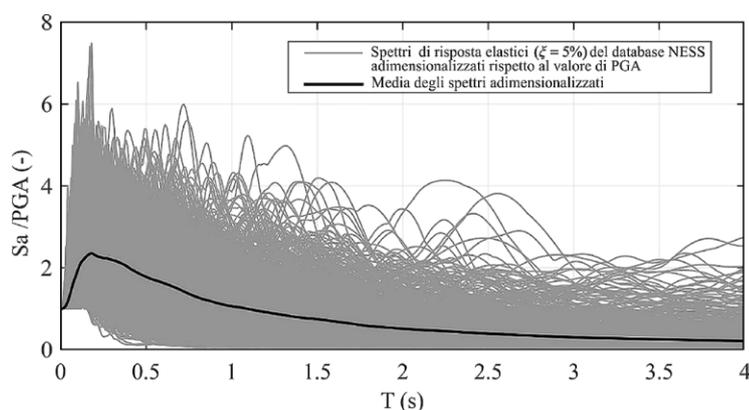
Tabella 2 - Sette casi studio oggetto di analisi, caratterizzati da localizzazione geografica, stato limite considerato, classe di suolo e valore dello spettro a periodo nullo (PGA_{target}) corrispondente.

Sito	Stato limite	Suolo	PGA_{target} (g)
Cosenza	SLC	A	0.365
	SLC	C	0.415
	SLV	A	0.272
	SLD	A	0.0934
	SLD	C	0.137
Milano	SLV	A	0.0497
	SLV	C	0.0745

Tutte le combinazioni selezionate nelle applicazioni discusse nel seguito sono ricavate attraverso l'algoritmo REXEL. Gli accelerogrammi considerati nelle selezioni provengono dal database NESS (<http://ness.mi.ingv.it/>; Pacor *et al.*, 2018) che considera eventi sismici con magnitudo momento minima pari a 5. NESS consiste di circa 1200 forme d'onda per le due componenti orizzontali (2400 totali circa) relativa a circa 700 stazioni che hanno registrato a una massima distanza Joyner & Boore (1981), di 140 km. La maggior parte delle forme d'onda è registrata su suoli aventi velocità delle onde di taglio, nei 30 metri superficiali, minore di 600 m/s, sporadicamente, maggiore di 800 m/s. Gli spettri di risposta elastici delle registrazioni contenute in NESS, adimensionalizzati dividendo le ordinate spettrali per la corrispondente accelerazione di picco al suolo (PGA), sono riportati in Figura 3.⁵

⁵ Indipendentemente della classe di suolo del sito della struttura nei casi studio, le selezioni sono state fatte considerando sempre tutte le registrazioni facenti parte della base dati utilizzata e non solo quelle corrispondenti al suolo in esame. Questo perché vincolare la forma spettrale attraverso la spettro-compatibilità è verosimile che renda non necessario obbligare gli accelerogrammi a provenire dalla stessa classe di suolo dello spettro obiettivo.

Figura 3
Spettri di risposta elastici, adimensionalizzati rispetto al valore di PGA, con smorzamento 5% delle circa 2400 registrazioni contenute nel database NESS (che costituisce la preselezione degli accelerogrammi in questo studio) e corrispondente spettro medio.



3.1 Applicazione 1: Selezione di combinazioni di accelerogrammi non scalati.

La prima analisi considera selezioni di accelerogrammi non scalati (cioè le forme d'onda non sono manipolate e quindi anche il rapporto tra le diverse componenti di una stessa registrazione è inalterato). In particolare, si cercano combinazioni che verifichino i criteri delle NTC18 e si valuta a posteriori se queste verificano anche quelli della circolare. La selezione, come discusso, è stata fatta utilizzando l'algoritmo di REXEL.

Nella Tabella 3, per ciascun caso studio di cui alla Tabella 2, si riporta il numero di combinazioni che è stato possibile trovare tali per cui il parametro definito in Equazione 3 è inferiore a 0.4. (Il limite di 0.4 sul parametro di spettro-compatibilità δ_{medio} è stato imposto in maniera arbitraria, per evitare confronti fra combinazioni caratterizzati da deviazioni, dello spettro medio da quello obiettivo, molto diverse). Inoltre, tutte le combinazioni considerate non hanno, prese due-a-due, alcuna registrazione in comune.⁶ In effetti, la tabella riporta quante delle combinazioni trovate secondo i criteri fissati, verifichino anche i requisiti della circolare, così come interpretati nella sezione 2.2. Si evince che in tutti i casi trattati, il soddisfacimento del requisito NTC18 porta implicitamente al soddisfacimento dei vincoli di compatibilità descritti dalla circolare.

Si osserva anche che per le analisi condotte allo SLD il numero di combinazioni ricavate è sempre maggiore rispetto alle corrispondenti analisi condotte allo SLC e SLV. Ciò perché l'intervallo di periodi strutturali all'interno dei quali soddisfare il criterio di compatibilità spettrale è limitato superiormente a 1.2 s anziché a 2 s.

A titolo di esempio dei risultati di questa applicazione, in Figura 4 è riportata per i due casi limite in termini di gravità dello spettro obiettivo, rispettivamente Cosenza, suolo C, per stato limite SLC (Figura 4a, 4b) e Milano, suolo A, per stato limite SLV (Figura 4c, 4d), una delle combinazioni soddisfacenti le prescrizioni tanto del codice quanto della circolare.

Tabella 3 - Per ogni caso studio (sito, stato limite, categoria di suolo) sono riportati l'intervallo di periodi in cui si deve soddisfare la spettro-compatibilità, il numero di combinazioni selezionate in accordo con le prescrizioni NTC18 e il numero di esse che soddisfano contemporaneamente i requisiti della circolare.

Sito	SL	Suolo	$T_{min} - T_{max}$ [s]	Numero di combinazioni trovate secondo NTC18 rispetto a combinazioni che soddisfano contemporaneamente i requisiti della circolare
Cosenza	SLC	A	0.15 - 2	15/15
	SLC	C	0.15 - 2	9/9
	SLV	A	0.15 - 2	21/21
	SLD	A	0.15 - 1.2	26/26
	SLD	C	0.15 - 1.2	37/37
Milano	SLV	A	0.15 - 2	10/10
	SLV	C	0.15 - 2	21/21

⁶ Questa procedura si diversifica da quella usata in (Iervolino, Maddaloni e Cosenza, 2008, 2009) che, pur facendo dei confronti simili a quelli fatti in questo lavoro, risente del fatto che le combinazioni utilizzate nelle selezioni non sono indipendenti in quanto alcuni accelerogrammi si ripetono in tutte le selezioni.

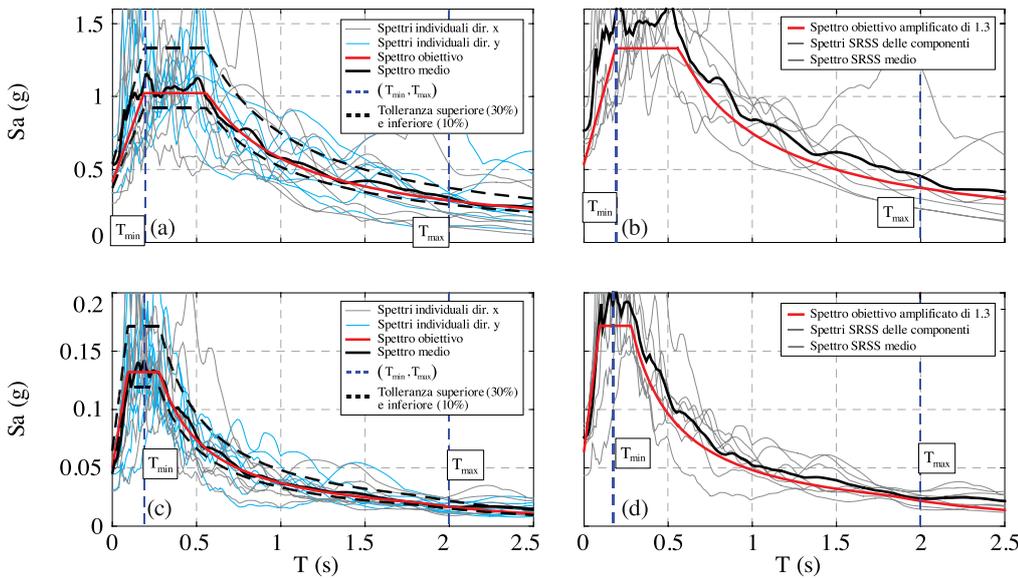


Figura 4
Esempi di combinazioni che soddisfano contemporaneamente i requisiti delle NTC18 e della circolare per i due casi studio di Cosenza, suolo C, per stato limite SLC (pannelli a e b) e Milano, suolo A, per stato limite SLV (pannelli c e d).

3.2 Applicazione 2: Selezione di combinazioni di accelerogrammi scalati.

La seconda analisi fa riferimento ad accelerogrammi scalati linearmente in ampiezza. Ciò per valutare se le prescrizioni NTC18 portino a fattori di scala molto diversi tra le due componenti di una stessa registrazione, tali da giustificare le indicazioni della circolare. Per selezionare le combinazioni compatibili, la procedura è sostanzialmente la stessa di quella già utilizzata nella applicazione precedente, con l'unica differenza che risiede nel fatto che gli accelerogrammi da selezionare sono preliminarmente resi adimensionali (come in Figura 3), dividendo ciascuna ordinata di ogni segnale per la propria PGA. Nella procedura di selezione, anche lo spettro obiettivo è adimensionalizzato allo stesso modo; per questo, ciascuna forma d'onda di una combinazione, per essere spettro-compatibile, deve essere scalata per un fattore (SF) pari a:

$$SF = \frac{PGA_{target}}{PGA} \quad (6)$$

in cui, la PGA è l'accelerazione di picco al suolo del singolo accelerogramma.

In questo caso si cercano combinazioni di segnali scalati che verifichino i criteri delle NTC18 e, come precedentemente, si verifica a posteriori se soddisfano anche i criteri della circolare; ciò si riconduce al soddisfacimento dell'Equazione 7:

$$\frac{1}{7} \cdot \sum_{j=1}^7 \sqrt{\left[\frac{Sa_{j,x}(T_i)}{PGA_{j,x}} \right]^2 + \left[\frac{Sa_{j,y}(T_i)}{PGA_{j,y}} \right]^2} \geq 1.3 \cdot \frac{Sa_{target}(T_i)}{PGA_{target}}, \quad \forall i = \{1, 2, \dots, N\}, \quad (7)$$

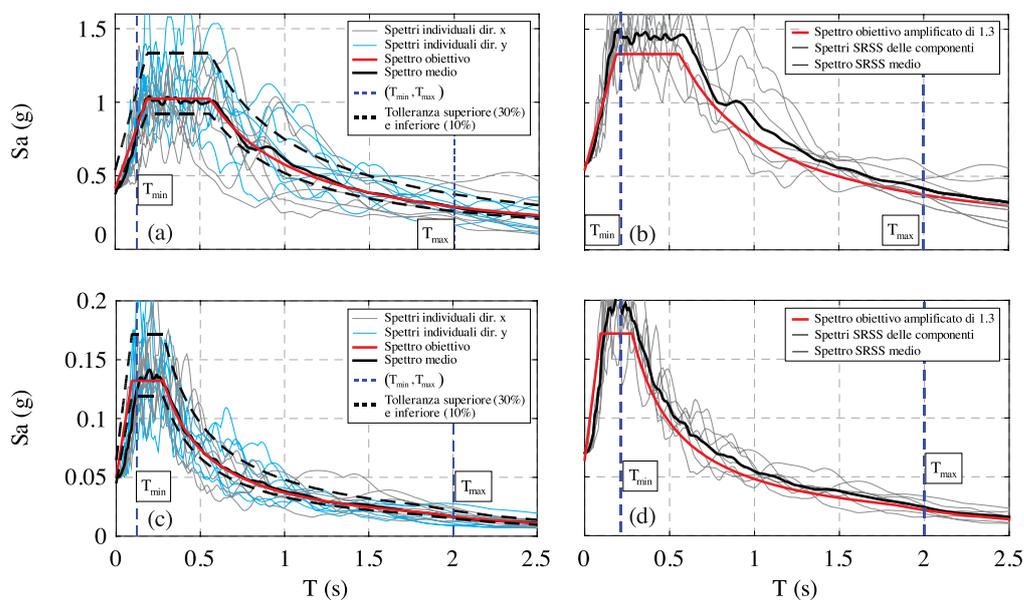
dove $PGA_{j,x}$ e $PGA_{j,y}$ sono, rispettivamente, le PGA delle componenti in direzione x e y della j -esima registrazione della combinazione. I risultati delle selezioni sono riportati in Tabella 4 per quanto riguarda le selezioni senza registrazioni in comune. Anche in questo caso il parametro δ_{medio} di Equazione 3 è limitato ad un valore massimo di 0.4.

Tabella 4 - Per ogni caso studio (sito, stato limite, categoria di suolo) sono riportate l'intervallo di periodi in cui si deve soddisfare la spettro-compatibilità, il numero di combinazioni di segnali scalati selezionate in accordo con le prescrizioni NTC18 e il numero di esse che soddisfano contemporaneamente i requisiti della circolare secondo l'Equazione 7.

Sito	SL	Suolo	$T_{min} - T_{max}$ [s]	Numero di combinazioni trovate secondo NTC18 rispetto a combinazioni che soddisfano contemporaneamente i requisiti della circolare
Cosenza	SLC	A	0.15 - 2	51/51
	SLC	C	0.15 - 2	37/37
	SLV	A	0.15 - 2	56/56
	SLD	A	0.15 - 1.2	61/61
	SLD	C	0.15 - 1.2	86/86
Milano	SLV	A	0.15-2	42/42
	SLV	C	0.15-2	17/17

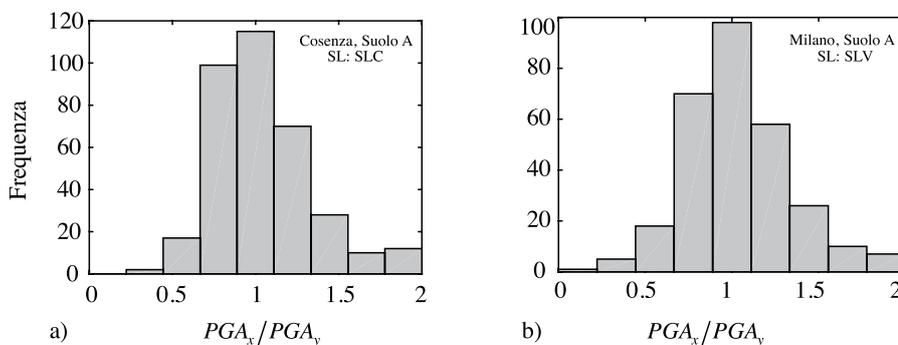
Si può osservare che anche in questo caso il soddisfacimento contemporaneo delle prescrizioni di NTC18 e circolare si verifica nella totalità dei casi analizzati⁷. In Figura 5 sono riportati due esempi di selezione di accelerogrammi scalati, per due dei casi studio esaminati.

Figura 5
Esempi di combinazioni di accelerogrammi scalati che soddisfano contemporaneamente i requisiti delle NTC18 e della circolare per i due casi studio di Cosenza, suolo C, stato limite SLC (pannelli a e b) e Milano, suolo A, stato limite SLV (pannelli c e d).



Si nota anche che, secondo l'approccio di scalare i segnali in ampiezza espresso dall'Equazione 6, anche se le due componenti orizzontali della stessa registrazione possono entrare nelle combinazioni con SF diversi fra di loro, per costruzione, il rapporto di tali fattori di scala è pari al reciproco del rapporto tra le loro PGA registrate, PGA_x/PGA_y . In effetti, per la maggior parte delle registrazioni che compongono le combinazioni effettuate nell'ambito dei casi studio esaminati, tale rapporto è molto vicino all'essere unitario, come si evince dalla Figura 6, e quindi conduce all'adozione di SF per le due componenti molto simili. Questo non è inatteso nel caso di componenti ortogonali del moto sismico di orientamento casuale, per cui, quando non sono registrati vicino alla sorgente, non ci si aspetta che esse esibiscano, mediamente, fra di loro differenze in ampiezza sistematiche (Beyer e Bommer, 2006). (In questo studio, anche se sono state utilizzate delle registrazioni del database NESS con le componenti ruotate secondo le direzioni parallele e normali alla sorgente sismica, per quanto riguarda le PGA, non si evidenziano comunque differenze sistematiche.)

Figura 6
Rapporti fra le PGA delle due componenti orizzontali per tutte le registrazioni che compongono le 37 combinazioni selezionate per il caso di Cosenza allo SLC, considerando categoria di suolo A (a) e le 47 per il caso di Milano allo SLV, considerando categoria di suolo A.



⁷ Si osserva anche che, in questo caso, il numero di combinazioni compatibili trovate dall'algoritmo è superiore, in sei casi su sette, rispetto al caso di accelerogrammi non scalati. Ciò è atteso: modificando infatti le componenti di una registrazione e vincolando così la selezione alla sola forma spettrale, il numero di registrazioni compatibili generalmente aumenta.

3.3 Applicazione 3: Verifica della compatibilità delle singole componenti.

Si è discusso come le NTC18 non esplicitino se fare riferimento alla sola media globale delle sette registrazioni valutata come visto precedentemente in Equazione 5, nell'intervallo di periodi (T_{min} , T_{max}), con lo spettro obiettivo, e sebbene questa sia una interpretazione oramai consolidata (Iervolino, Galasso e Cosenza, 2010), un'altra interpretazione potrebbe essere a verificare separatamente la spettro-compatibilità delle medie ottenute considerando separatamente le due componenti:

$$\begin{cases} Sa_{MEDIAX} = \frac{1}{7} \cdot \sum_{j=1}^7 Sa_{j,x}(T) \\ Sa_{MEDIAY} = \frac{1}{7} \cdot \sum_{j=1}^7 Sa_{j,y}(T) \end{cases} \quad (8)$$

Per valutare l'equivalenza tra questi due criteri, l'analisi qui presentata separa le combinazioni spettro-compatibili: anziché valutare la compatibilità di quattordici forme d'onda, si valuta tale compatibilità calcolando separatamente le medie delle sette componenti ed effettuando il confronto di entrambe tali medie con lo spettro obiettivo. C'è da precisare che stante il fatto che le direzioni x e y di un sisma sono determinate dall'orientamento dello strumento di registrazione, e non hanno quindi (di solito, anche se non nel caso della base dati qui considerata) una direzione preferenziale rispetto alla sorgente del terremoto cui fanno riferimento, queste possono essere considerate casuali. Per questo, sono state considerate, per ciascuna combinazione, tutte le $2^6 = 64$ possibili disposizioni delle componenti orizzontali in due combinazioni diverse (cioè tutte quelle che si ottengono con l'unico vincolo di non avere nella stessa combinazione entrambe le componenti orizzontali di una stessa registrazione). Ciò per ricavare almeno una disposizione che porta al soddisfacimento della compatibilità contemporanea delle due componenti.

In questo caso, i risultati delle selezioni ricavati nella precedente applicazione numero 2, sono utilizzati per verificare se tali selezioni rispettano i requisiti di compatibilità contemporanea delle singole componenti del moto con lo spettro obiettivo. Si considera soddisfatto il requisito di compatibilità contemporaneo delle componenti quando almeno una delle 64 disposizioni soddisfa la verifica. I risultati sono riportati in Tabella 5, dove si evince che il soddisfacimento della compatibilità contemporanea mediamente avviene in circa il 70% dei casi delle combinazioni analizzate nel caso studio. Cioè, circa tre volte su quattro il soddisfacimento della compatibilità delle quattordici forme d'onda messe insieme, consente di trovare un modo di dividere le componenti delle registrazioni in due combinazioni di sette registrazioni che sono entrambe spettro-compatibili. A titolo di esempio, in Figura 7 è riportato l'esempio di una compatibilità globale e per singole direzioni, in uno dei casi riferiti a Cosenza.

Tabella 5 - Percentuale di combinazioni che, in almeno una tra le 64 disposizioni determinabili, portano al soddisfacimento della compatibilità per singola direzione oltre che globale.

Sito	SL	Suolo	Tmin – Tmax (s)	Combinazioni considerate	Percentuale di combinazioni compatibili in entrambe le direzioni (%)
Cosenza	SLC	A	0.15 – 2	51	70.59
	SLC	C	0.15 – 2	37	70.27
	SLV	A	0.15 – 2	56	71.43
	SLD	A	0.15 - 1.2	61	77.05
	SLD	C	0.15 - 1.2	86	84.88
Milano	SLV	A	0.15-2	42	80.95
	SLV	C	0.15-2	17	52.94

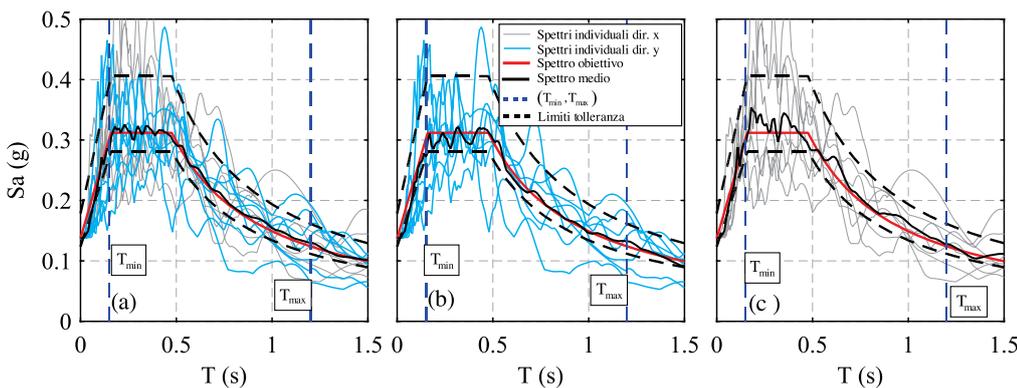


Figura 7
Compatibilità globale (a) e per entrambe le direzioni (b,c) per il sito di Cosenza, suolo C e stato limite SLD per una delle 64 disposizioni effettuate per la prima selezione delle 51 ricavate.

4. Conclusioni

Lo studio presentato ha indagato le, apparentemente differenti, indicazioni tra le NTC18 e la circolare applicativa in merito alla selezione degli accelerogrammi per l'analisi dinamica delle strutture. L'analisi è stata condotta su sette casi studio che fanno riferimento a due ipotetici siti di costruzione caratterizzati da alta e bassa pericolosità sismica in Italia. Per ognuno di essi, sono state svolte varie selezioni di quattordici accelerogrammi (sette per componente), secondo la pratica corrente e utilizzando una recente base dati costituita da più di mille registrazioni, estraendo combinazioni spettro-compatibili che è stato possibile individuare che non hanno registrazioni in comune. Ciò ha permesso di osservare che:

- nel caso di selezioni che utilizzano accelerogrammi non scalati, il soddisfacimento dei requisiti di NTC18 ha sempre portato al soddisfacimento dei requisiti della circolare;
- anche nel caso di selezioni con accelerogrammi scalati in ampiezza, il soddisfacimento dei requisiti NTC18 ha sempre implicato anche il soddisfacimento dei requisiti della circolare;
- si è osservato, inoltre, che i valori dei fattori di scala per le due componenti di ogni singola registrazione spesso differiscono poco tra di loro;
- infine, siccome le NTC18 non specificano se la spettro-compatibilità sia da verificarsi separatamente per le due componenti orizzontali, si è verificato (in un caso) come il 70% delle selezioni che soddisfano il criterio di compatibilità tra la media che non distingue tra le componenti degli spettri e lo spettro obiettivo, sia tale per cui per cui si verifica anche la spettro-compatibilità anche per le componenti separate.

Si può concludere quindi che la procedura di selezione delle registrazioni definita da NTC18 (simile allo EC8-parte 1) è di per sé compatibile con le indicazioni della circolare applicativa (simili allo EC8-parte 2) e che, di conseguenza, non sembra impellente aggiornare già consolidati algoritmi di selezione.

5. Crediti

Lo studio presentato in quest'articolo è stato sviluppato all'interno del programma di ricerca della ReLUIS-DPC 2019–2021 finanziato dalla *Presidenza del Consiglio dei Ministri - Dipartimento della Protezione Civile* (DPC) al consorzio della *Rete di Laboratori Universitari di Ingegneria Sismica* (ReLUIS).

6. Bibliografia

- Beyer K., Bommer J.J. (2006) - Relationships between median values and between aleatory variabilities for different definitions of the horizontal component of motion, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 96(4 A), pp. 1512-1522. doi: 10.1785/0120050210.
- CEN (2004) EN 1998-1 - Eurocode 8: design provisions for earthquake resistance of structures, Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgio.
- CEN (2005) EN 1998-2 - Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 2: Bridges. European Committee for Standardization, B-1050 Brussels, Belgio.
- CS.LL.PP. (2008) - Norme tecniche per le costruzioni. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 29.
- CS.LL.PP. (2018) - Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni. *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 42.
- CS.LL.PP. (2019) - Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”», *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, 35, pp. 1-337.
- Iervolino I. et al. (2017) - Seismic actions on structures in the near-source region of the 2016 central Italy sequence, *Bulletin of Earthquake Engineering*. doi: 10.1007/s10518-017-0295-3.
- Iervolino I., Cosenza E., Galasso C. (2009) - Spettri, accelerogrammi e le nuove norme tecniche per le costruzioni, *Progettazione sismica*, 1, pp. 33-50.
- Iervolino I., Galasso C. (2010) - REXELite, online record selection for the Italian ACcelerometric Archive, 14th European Conference on Earthquake Engineering, (January), p. 15.
- Iervolino I., Galasso C., Cosenza E. (2010) - REXEL: Computer aided record selection for code-based seismic structural analysis, *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8(2), pp. 339-362. doi: 10.1007/s10518-009-9146-1.
- Iervolino I., Giorgio M. (2017) - È possibile evitare il superamento delle azioni di progetto nell'area epicentrale di terremoti forti? *Progettazione Sismica*, 8(3), 25-32.
- Iervolino I., Maddaloni G., Cosenza E. (2008) - Eurocode 8 compliant real record sets for seismic analysis of structures, *Journal of Earthquake Engineering*, 12(1), pp. 54-90. doi: 10.1080/13632460701457173.
- Iervolino I., Maddaloni G., Cosenza E. (2009) - A note on selection of time-histories for seismic analysis of bridges in Eurocode 8, *Journal of Earthquake Engineering*, 13(8), pp. 1125-1152. doi: 10.1080/13632460902792428.
- Joyner W.B., Boore D.M. (1981) - Peak Horizontal Acceleration and Velocity From Strongmotion Records Including Records From the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6), pp. 2011-2038.
- Pacor F. et al. (2018) - NESS v1.0: A worldwide collection of strong-motion data to investigate near source effects. *Seismological Research Letters*, 89(6), pp. 2299-2313. doi: 10.1785/0220180149.
- Sgobba S. et al. (2019) - REXELweb: A tool for selection of ground-motion records from the Engineering Strong Motion database (ESM), 8(i), pp. 4947-4953.