



La selezione di registrazioni accelerometriche a due componenti secondo le NTC18 e la circolare applicativa

Roberto Baraschino, Georgios Baltzopoulos, Iunio Iervolino

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

Parole chiave: Input sismico, spettro di progetto, pericolosità, azione sismica.

ABSTRACT

Le moderne normative sismiche come l'Eurocodice 8 (EC8) o le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC), consentono la verifica del progetto strutturale tramite analisi dinamiche, utilizzando modelli tridimensionali delle strutture, sollecitate da due o tre componenti del moto del suolo (due componenti orizzontali ed una componente verticale). Tali registrazioni del moto sismico vanno scelte in modo che siano rappresentative della sismicità del sito di costruzione e gli spettri di risposta elastica, eventualmente scalati, devono rispettare alcuni requisiti di compatibilità con lo spettro elastico di progetto (spettro obiettivo). Le NTC impongono, come criterio di spettro-compatibilità, che la media degli spettri elastici delle componenti orizzontali dei segnali selezionati debba approssimare lo spettro elastico obiettivo entro una fissata soglia tolleranza in un determinato intervallo di periodi: tale prescrizione implicitamente permette che le due componenti orizzontali di una registrazione selezionata possano avere di fattori di scala diversi. La circolare applicativa delle NTC ha invece introdotto, similmente a quanto prescritto nello EC8–parte 2 (progettazione sismica di ponti), una procedura per cui preliminarmente vengono combinati gli spettri delle componenti orizzontali della singola registrazione tramite la radice quadrata della somma dei quadrati (SRSS) delle ordinate spettrali, viene poi calcolata la media degli spettri SRSS opportunamente scalati e confrontata con lo spettro obiettivo incrementato di una fissata quantità. Obiettivo di questo lavoro è valutare la compatibilità tra i risultati ottenuti con la procedura prescritta dalle nuove NTC e le indicazioni espresse in circolare. Un'ulteriore analisi condotta ha confrontato separatamente le medie delle componenti orizzontali con lo spettro obiettivo (e non complessivamente, come precedentemente esposto). I risultati ottenuti suggeriscono che le due procedure portano a selezioni tra loro compatibili. Inoltre, nella grande maggioranza dei casi trattati il soddisfacimento del criterio di compatibilità considerando la media complessiva di tutte le componenti delle registrazioni porta al soddisfacimento della compatibilità per componenti separate.

1 INTRODUZIONE

L'utilizzo di storie temporali del moto del terreno (artificiali, simulate o naturali) per le verifiche strutturali attraverso analisi dinamiche è un'opzione consentita dalle normative sismiche moderne e ormai consolidata. Tale possibilità era già fornita, ad esempio, per le verifiche ai vari stati limite ai sensi delle precedenti norme tecniche per le costruzioni italiane (NTC08, CS.LL.PP., 2008) e dall'Eurocodice 8 (EC8) parte 1 per gli edifici e parte 2 per i ponti (CEN, 2004, 2005). Negli ultimi anni, visto l'aumentare della disponibilità di archivi di forme d'onda accelerometriche registrate (si veda ad esempio Ancheta *et al.*, 2014; Luzi *et al.*, 2016) e di strumenti di selezione all'interno di questi archivi (ad esempio: Iervolino, Galasso e Cosenza, 2010), l'utilizzo di

accelerogrammi naturali sta diventando prevalente.

Le recenti norme tecniche per le costruzioni NTC18 (CS.LL.PP., 2018) hanno ribadito la possibilità di utilizzo di accelerogrammi naturali al fine di condurre analisi dinamiche (lineari e non). Nelle NTC18, la strategia di selezione delle registrazioni, basata su criteri di spettro-compatibilità media (di cui si parla in seguito) risulta simile a quella proposta in NTC08, con la differenza più significativa che consiste nell'aggiunta di un margine di tolleranza superiore.

Nel caso di analisi condotte su modelli strutturali tridimensionali, la selezione dell'input deve interessare registrazioni accelerometriche a due

componenti orizzontali (se si trascura quella verticale).

Secondo sia le NTC18 sia l'EC8, il numero minimo di registrazioni prescritto, affinché si possa considerare la media degli effetti strutturali di tali segnali, è pari a sette. Ciò si traduce, allorché le analisi vengano condotte su modelli tridimensionali, nella necessità di selezionare un minimo di quattordici storie temporali, nel rispetto del requisito che la media degli spettri elastici di tali segnali sia compatibile con lo spettro elastico di progetto o spettro obiettivo.

Tale media deve essere simile, entro alcune tolleranze, allo spettro obiettivo in un certo intervallo di periodi di vibrazione, T . Visto che le NTC18 e l'EC8–parte 1 non forniscono nessuna ulteriore precisazione per le selezioni di registrazioni bidirezionali, un criterio per raggiungere la compatibilità spettrale in questo caso può essere quello di confrontare la media globale dei quattordici spettri elastici ottenuti da entrambe le componenti delle registrazioni con lo spettro obiettivo.¹

Un esempio di questo tipo è riportato in Figura 1a, dove è illustrata una generica selezione di sette coppie di segnali. Nella figura sono indicati lo spettro obiettivo, 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 è allo stato attuale la prassi dell'ingegneria sismica, coerente con le prescrizioni di EC8–parte 1, e ampiamente discussa in letteratura (i.e., Iervolino, Maddaloni e Cosenza, 2008, 2009).

Data la possibilità di potere utilizzare accelerogrammi scalati in ampiezza al fine di assicurare la coerenza spettrale, può verificarsi che le due componenti di una stessa registrazione siano scalate in modo diverso fra di loro, alterando quindi i rapporti originari tra le forme spettrali. Le NTC08 e le NTC18, così come l'EC8–parte 1, non forniscono alcuna indicazione in merito a questa questione. La circolare applicativa delle NTC18 (CS.LL.PP., 2018), apparentemente rifacendosi alle prescrizioni EC8–parte 2, suggerisce invece 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, che può essere pari a 1.3. Un esempio di combinazione spettro-compatibile di questo tipo è riportato in Figura 1b, dove sono riportati gli spettri SRSS delle sette registrazioni, nonché la loro media e lo spettro obiettivo amplificato di 1.3. La combinazione rappresentata nella figura e lo spettro obiettivo sono gli stessi della Figura 1a. La procedura suggerita dalla circolare e dall'EC8–parte 2, pone quindi la doppia questione della coerenza di tali prescrizioni con quelle del corpo normativo e sull'eventuale necessità di 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).

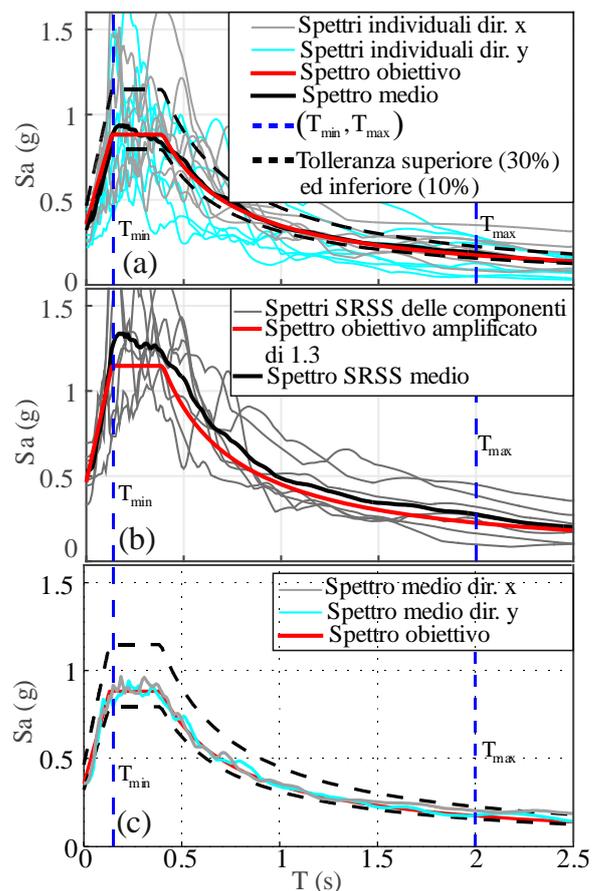


Figura 1. Selezioni in accordo con le prescrizioni delle NTC18 (a), della circolare (b) e spettro-compatibilità media delle due componenti orizzontali considerate separatamente (c).

¹ Un approccio più rigoroso richiederebbe di ragionare sulla misura di intensità considerata nel derivare lo spettro obiettivo. Tale aspetto è qui tralasciato.

Un'indagine al riguardo è già stata condotta in Baraschino, Baltzopoulos e Iervolino (2019). Lo studio presentato in questo lavoro continua questa indagine, approfondendo alcuni aspetti che vengono puntualmente discussi nelle successive sezioni. In particolare, si applica la strategia di selezione adottata in REXEL (Iervolino, Galasso e Cosenza, 2010) a sette casi studio, per ciò che attiene l'utilizzo di registrazioni a due componenti orizzontali del moto sismico, esaminando due aspetti diversi.

1. Selezione di accelerogrammi consentendo che le componenti di una stessa registrazione possano essere scalate diversamente fra loro. In questo caso, si indaga se le selezioni ottenute adottando il menzionato consolidato algoritmo di selezione, soddisfano automaticamente i criteri introdotti nella circolare. Inoltre, si valuta la differenza fra i fattori di scala delle due componenti.
2. Ancora per la stessa strategia di selezione, 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 due combinazioni ottenute separando le due componenti di ciascuna registrazione verifichino 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). Segue la descrizione dei casi studio e delle procedure di selezione delle combinazioni. Infine si discutono i risultati delle applicazioni. Alcune conclusioni chiudono il lavoro.

2 CRITERI PER LA SELEZIONE DEGLI ACCELEROGRAMMI

2.1 L'approccio delle NTC18

Al §3.2.3.6 le NTC18 affermano che l'utilizzo di storie temporali del moto del terreno naturali (le uniche qui valutate) è consentito se: *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.*² In aggiunta, 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 limiti di tolleranza (e.g., la Figura 1a) che saranno elencati da qui a poco.

Le NTC18 (così come le NTC08), nel caso di strutture non isolate, fissano $T_{\min} = 0.15s$, mentre fanno variare T_{\max} a seconda se le analisi siano condotte allo stato limite ultimo (salvaguardia della vita, SLV; collasso, SLC) o allo stato limite di esercizio (limitazione del danno, SLD). In particolare, agli SLV e SLC, T_{\max} è pari al maggiore tra $2s$ 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 (così come NTC08) 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	Tolleranze	SL	T_{\min} - T_{\max} [s]
--------	------------	----	-----------------------------

² 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 specifici scenari (e.g., Iervolino e Giorgio, 2017).

		SLV/SLC	0.15-
NTC8	90%;130%		$\max(2s;1.5 \cdot T)$
		SLD	0.15- 1.5 · T
EC8– parte 1	90%; -	tutti	0.2 · T- 2 · T

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

1. definizione dello spettro obiettivo;
2. assegnazione degli intervalli di periodi di vibrazione e delle tolleranze entro cui verificare la spettro-compatibilità;
3. 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*);
4. classificazione degli spettri preselezionati in ordine crescente del parametro di similitudine dei singoli spettri rispetto allo spettro obiettivo in Equazione (1):

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

dove $Sa(T_i)$ rappresenta l'ordinata spettrale i -esima, essendo l'intervallo tra discretizzato in N punti, e $Sa_{\text{obiettivo}}(T_i)$ 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);

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

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

con $i = \{1, 2, \dots, N\}$ e dove j rappresenta la registrazione mentre $Sa_{j,x}(T_i)$, $Sa_{j,y}(T_i)$ sono rispettivamente l'ordinata spettrale

della j -esima registrazione al periodo strutturale i -esimo per le due componenti orizzontali (x e y) di una singola registrazione;

6. 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:

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

2.2 L'approccio della circolare applicativa

Come anticipato nell'introduzione, la circolare applicativa delle NTC18 propone un criterio diverso per la selezione delle registrazioni, in alcuni aspetti simile a quello presente nello EC8-parte 2 e apparentemente diverso da quello del corpo normativo. In particolare, la circolare al §C3.2.3.6, suggerisce l'utilizzo di un unico fattore di scala per entrambe le componenti di una registrazione 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:

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

$$Sa_{j,\text{SRSS}}(T_i) = \sqrt{Sa_{j,x}(T_i)^2 + Sa_{j,y}(T_i)^2} \quad (4)$$

$$\forall i = \{1, 2, \dots, N\};$$

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

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

- 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 deve essere, nell’intervallo di periodi di interesse, sempre superiore allo spettro obiettivo amplificato del 30%. 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%. Si fa notare che 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%.

Lo EC8–parte 2 specifica 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.

3 CASI STUDIO

Al fine di investigare quanto introdotto si considera, arbitrariamente, una struttura avente periodo fondamentale elastico $T = 0.85$ 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: *stato limite di collasso* (SLC), *stato limite di salvaguardia della vita* (SLV) e *stato limite di danno* (SLD), per ciascuno dei due siti e per ciascuna condizione di suolo (Figura 2b). L’intervallo di periodi nei quali le selezioni sono effettuate è 0.15-2 s per SLC ed SLV e 0.15-1.28 s per SLD. La Tabella 2 riassume i sette casi studio risultanti.

Tabella 2. Casi studio oggetto di analisi.

Sito	SL	Suolo	$PGA_{obiettivo}(g)$
	SLC	A	0.365
	SLC	C	0.415
Cosenza	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 di 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. Sono state utilizzate circa 750 forme d’onda per le due componenti orizzontali (1500 totali circa) relative a circa 700 stazioni che hanno registrato a una massima distanza Joyner & Boore (1981), di 140 km.

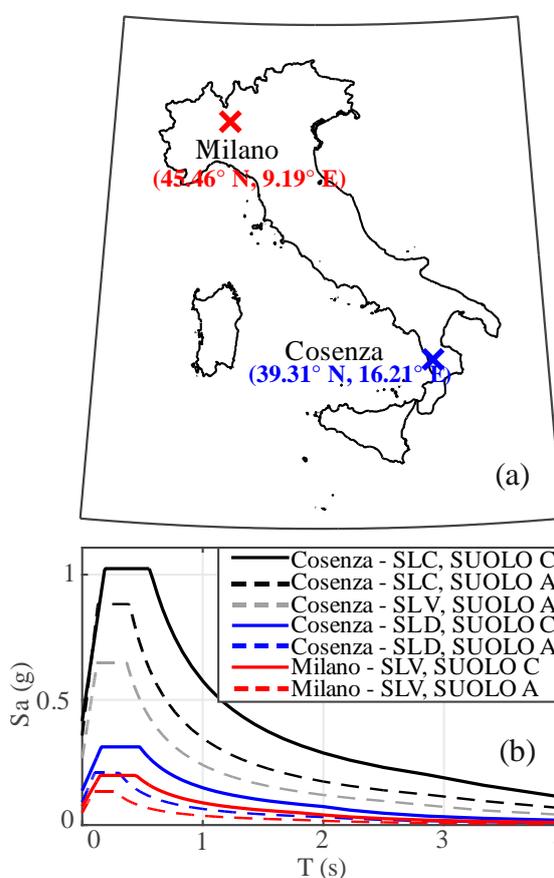


Figura 2. Localizzazione geografica dei siti (a). Spettri obiettivo (costruiti secondo NTC18) utilizzati per i casi studio di selezione degli accelerogrammi (b).

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 e, 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 3.³

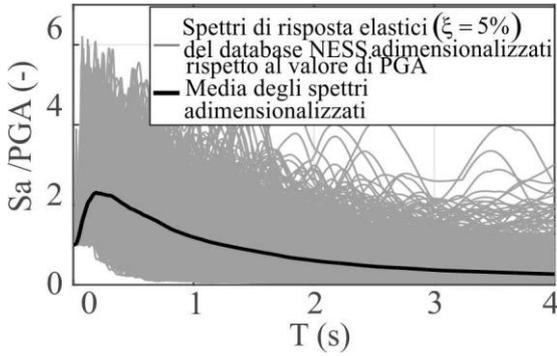


Figura 3. Spettri di risposta elastici, adimensionalizzati rispetto al valore di PGA, con smorzamento 5% delle circa 2400 di NESS e corrispondente spettro medio.

3.1 Applicazione 1: Selezione di combinazioni di accelerogrammi con i criteri delle NTC18

La prima analisi considera selezioni di 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. In particolare, si cercano combinazioni che verifichino i criteri delle NTC18 e si valuta a posteriori se queste verificano anche quelli della circolare. Preliminarmente alla selezione, gli accelerogrammi da selezionare sono 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:

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

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

I segnali utilizzati sono tutti ruotati direzione nord-sud (N) ed est-ovest (E) con i segnali disposti in x tutti orientati N e quelli in y tutti orientati E. Tutte le combinazioni considerate non hanno, prese due-a-due, alcuna registrazione in comune.

Si nota che tale 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.

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

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

$\forall i = \{1, 2, \dots, N\}$, dove $PGA_{j,x}$ e $PGA_{j,y}$ sono, corrispettivamente, le PGA delle componenti in direzione x e y della j-esima registrazione della combinazione. I risultati delle selezioni sono riportati in Tabella 3, dove, per ogni caso studio (sito, stato limite, categoria di suolo), è riportato 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). Si fa notare che pur avendo seguito la stessa procedura di selezione utilizzata in (Baraschino, Baltzopoulos e Iervolino, 2019), i risultati sono diversi in quanto il dataset di registrazioni utilizzato in quel caso era formato da circa 2400 registrazioni provenienti da NESS (rispetto alle 1500 dello studio in esame) con inoltre le componenti ruotate verso direzioni parallele e normali alla direzione dello *strike* della faglia rispetto all'orientamento casuale di tali componenti nel presente lavoro. Nel presente lavoro inoltre si sono ritenute compatibili tutte le combinazioni che rispettano i limiti di tolleranza imposti, senza limitare il valore del parametro δ_{medio} come invece fatto nel citato articolo. In quel caso un'ulteriore analisi di questo tipo è stata condotta utilizzando però combinazioni di accelerogrammi non scalati. Essa ha portato in tutti casi di selezione al soddisfacimento automatico della procedura della circolare dato il soddisfacimento dei requisiti NTC. Tale analisi è stata in questo lavoro trascurata.

Tabella 3. Combinazioni selezionate in accordo con le prescrizioni NTC18 e numero di esse che soddisfano contemporaneamente i requisiti della circolare.

Sito	SL	Suolo	NTC/circolare
	SLC	A	25/25

³ 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.

Cosenza	SLC	C	16/16
	SLV	A	28/28
	SLD	A	33/33
Milano	SLD	C	43/43
	SLV	A	18/18
	SLV	C	7/7

Si è ricavato che il soddisfacimento contemporaneo delle prescrizioni di NTC18 e delle indicazioni della circolare si verifica nella totalità dei casi analizzati. In Figura 4 sono riportati due esempi di selezione di accelerogrammi scalati, per due dei casi studio esaminati.

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 . Infatti, per la maggior parte delle registrazioni che compongono le combinazioni trovate nell'ambito dei casi studio esaminati, tale rapporto è molto vicino all'essere unitario, come si evince dalla Figura 5, 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)

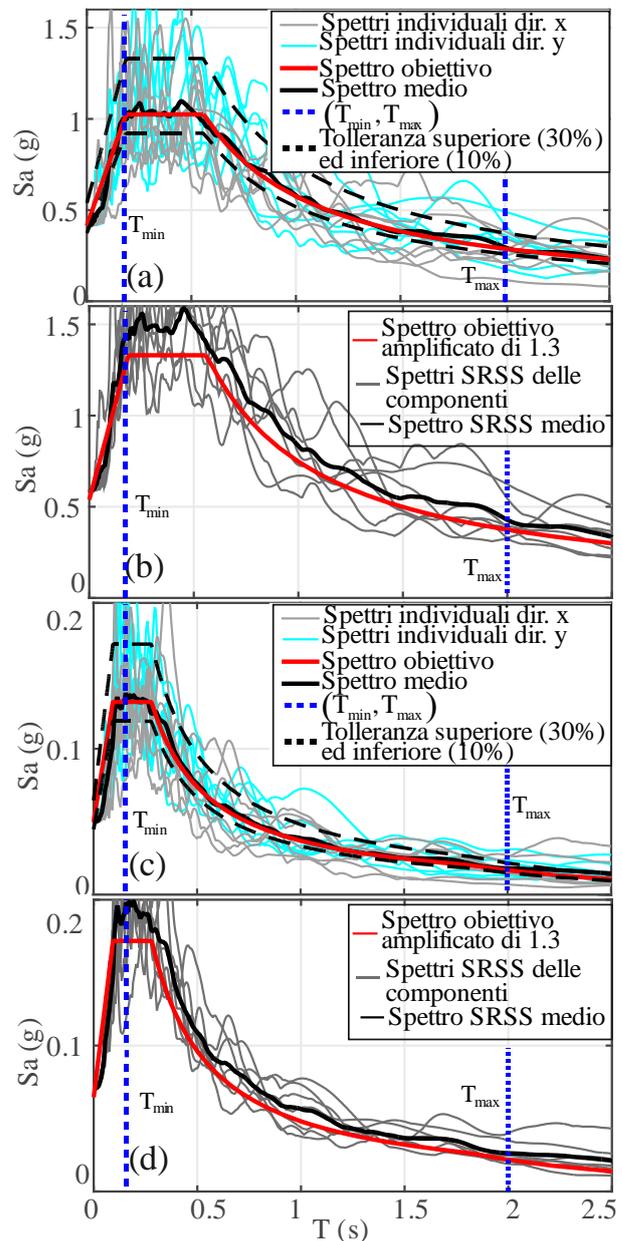


Figura 4. Esempi di combinazioni di accelerogrammi scalati che soddisfano contemporaneamente i requisiti delle NTC18 e della circolare per i due casi studio di Cosenza, suolo C, stato limite SLC (pannelli a e b) e Milano, suolo A, stato limite SLV (pannelli c e d)

In Figura 6 è riportata la mediana e i quartili dei rapporti tra le accelerazioni spettrali delle componenti costituenti le registrazioni delle combinazioni selezionate in tutto l'intervallo di periodi di interesse per gli stessi casi studio riportati in Figura 4 e Figura 5. Nella figura, sono riportati sia il rapporto fra le ordinate spettrali delle componenti come sono state originariamente registrate, $Sa_x(T)/Sa_y(T)$, sia lo stesso rapporto calcolato dopo aver scalato i segnali per farli rientrare nelle combinazioni, che risulta pari a $[PGA_y \cdot Sa_x(T)]/[PGA_x \cdot Sa_y(T)]$.

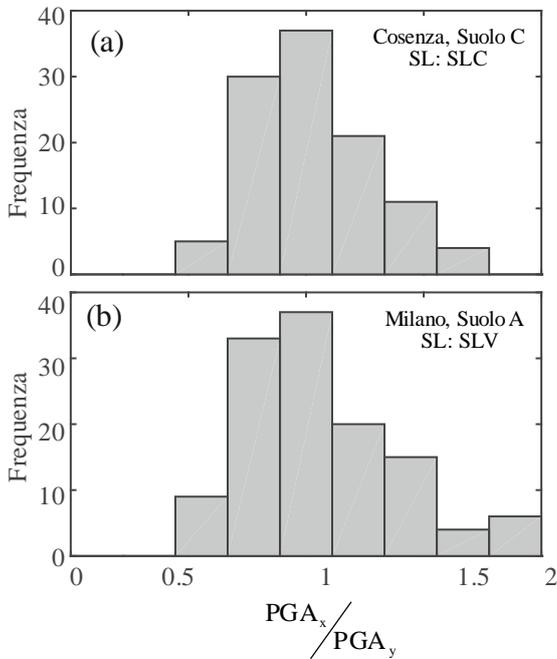


Figura 5. Rapporti fra le PGA delle due componenti orizzontali per tutte le registrazioni che compongono le 16 combinazioni selezionate per il caso di Cosenza allo SLC, considerando categoria di suolo C (a) e le 18 per il caso di Milano allo SLV, considerando categoria di suolo A (b).

Si osserva che, pur avendo scalato in ampiezza le due componenti per ottenere lo stesso valore di PGA, in tutti gli altri periodi di interesse il valore mediano del rapporto tra le accelerazioni spettrali oscilla comunque attorno al valore unitario. La procedura di scalatura non ha quindi provocato, mediamente, stravolgimenti nei rapporti tra le componenti di ogni registrazione.

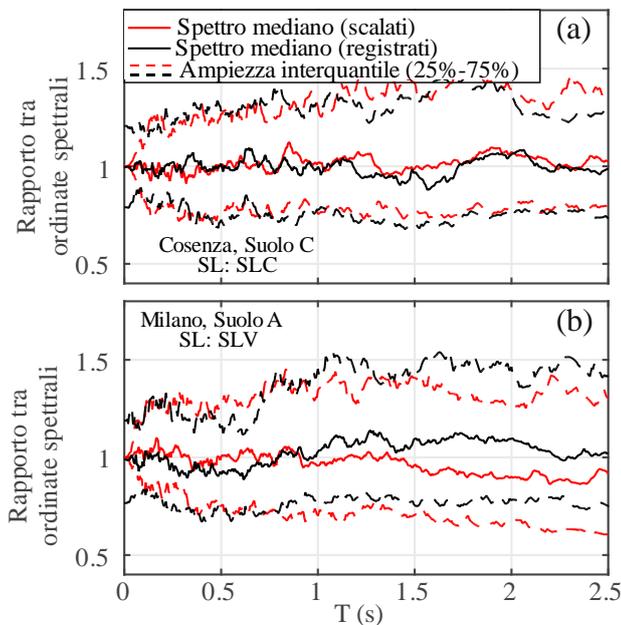


Figura 6. Mediana e quartili dei rapporti tra le accelerazioni spettrali delle due componenti orizzontali, scalate e come registrate, per le selezioni di due dei sette casi studio. Con tratteggio sono indicati il primo ed il terzo quartile

3.2 Applicazione 2: Verifica della compatibilità spettrale delle singole componenti data la compatibilità globale delle registrazioni

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 e Galasso, 2010), un'altra interpretazione potrebbe portare a verificare separatamente la spettro-compatibilità delle medie ottenute considerando separatamente le due componenti:

$$\begin{cases} Sa_{\text{MEDIA},x} = \frac{1}{7} \cdot \sum_{j=1}^7 [SF_{j,x} \cdot Sa_{j,x}(T)] \\ Sa_{\text{MEDIA},y} = \frac{1}{7} \cdot \sum_{j=1}^7 [SF_{j,y} \cdot Sa_{j,y}(T)] \end{cases} \quad (8),$$

dove $SF_{j,x}$ e $SF_{j,y}$ sono, rispettivamente, i fattori di scala della j -esima registrazione in direzione x e y .

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 e confrontando 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 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 combinazioni ottenute separando le due componenti orizzontali delle registrazioni.

In questo caso, i risultati delle selezioni ricavati nella precedente applicazione numero 1, sono utilizzati per verificare se tali selezioni rispettano i requisiti di compatibilità contemporanea delle singole componenti del moto bidirezionale 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 4, dove si evince che il soddisfacimento della compatibilità contemporanea mediamente avviene in circa l'80% dei casi delle combinazioni analizzate nel singolo caso studio. Cioè, quattro volte su cinque 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. Si conferma che, nonostante le differenze nella scelta del database già riportate con (Baraschino, Baltzopoulos e Iervolino, 2019), il soddisfacimento della compatibilità spettrale globale (quattordici forme d'onda) assicura anche il soddisfacimento della compatibilità delle sette componenti delle registrazioni valutate separatamente, nella maggior parte delle analisi condotte.

Tabella 4. Percentuale di combinazioni che portano al soddisfacimento della compatibilità per singola direzione oltre che globale.

Sito	SL	Suolo	%
Cosenza	SLC	A	81.25
	SLC	C	84
	SLV	A	89.29
	SLD	A	84.85
	SLD	C	90.68
Milano	SLV	A	94.44
	SLV	C	43

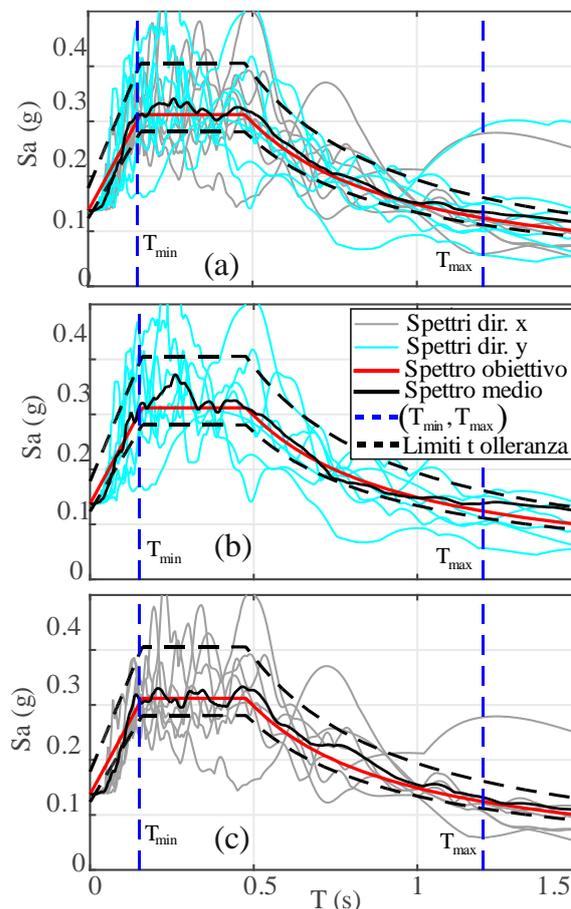


Figura 7. Compatibilità globale (a) e per entrambe le direzioni (b,c) per il sito di Cosenza, suolo C e stato limite SLD per una delle 64 disposizioni della prima selezione delle 43 ricavate.

4 CONCLUSIONI

Si è investigato riguardo le diverse prescrizioni date da NTC18 e circolare applicativa in merito alla selezione di accelerogrammi per l'analisi dinamica delle strutture. L'analisi è stata condotta su sette casi studio in riferimento a due siti di costruzione caratterizzati da alta e bassa pericolosità sismica in Italia. Per entrambi i siti, sono state svolte varie selezioni di quattordici accelerogrammi (sette per componente), al fine di ottenere combinazioni spettro-compatibili tali da non avere registrazioni in comune. Ciò ha permesso di osservare che:

- nel caso di selezioni che utilizzano accelerogrammi scalati in ampiezza, il soddisfacimento dei requisiti NTC18 ha sempre implicato anche il soddisfacimento dei requisiti della circolare;
- dato che le NTC18 non specificano se la spettro-compatibilità sia da verificarsi separatamente per le due componenti orizzontali, si è verificato come le selezioni che soddisfano il criterio di compatibilità tra la media globale degli spettri e lo spettro obiettivo, nell'80% dei casi, sono tali per

cui si verifica implicitamente anche la spettro-compatibilità per le componenti separate.

Come già osservato in (Baraschino, Baltzopoulos e Iervolino, 2019), si può concludere che le apparentemente diverse procedure di selezione di accelerogrammi bidirezionali suggerite da NTC18, simile a quella proposta in EC8-parte 1, e dalle nuove indicazioni espresse in circolare, simili ad EC8-parte 2, siano in realtà compatibili tra loro. Di conseguenza, sembra che non sia necessario cambiare consolidate metodologie 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).

BIBLIOGRAFIA

- Ancheta TD, Darragh RB, Stewart JP, Seyhan E, Silva WJ, Chiou BSJ, et al., 2014. NGAWest2 database. *Earthquake Spectra* 2014;30(3). <https://doi.org/10.1193/070913EQS197M>.
- Baraschino, R., Baltzopoulos G., Iervolino, I., 2019. Sulla selezione degli accelerogrammi secondo la circolare applicativa delle NTC18. *Progettazione sismica-Vol. 11, N.1, Anno 2019*.
- 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. e Galasso, C., 2009. Spettri, accelerogrammi e le nuove norme tecniche per le costruzioni, *Progettazione sismica*, 1, pp. 33–50.
- Iervolino, I. e 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. e 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. e 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. e 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 Strong motion Records Including Records From the 1979 Imperial Valley, California, Earthquake, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6), pp. 2011–2038.
- Luzi, L. et al., 2016. The Engineering Strong-Motion Database: A Platform to Access Pan-European Accelerometric Data. *Seismological Research Letters*, 87(4), pp. 987–997. doi: 10.1785/0220150278.
- 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.