

Un criterio di selezione dell'input sismico per l'analisi dinamica non lineare delle strutture



Piero Colajanni, Virginia Gentiluomo, Nino Spinella

Dipartimento di Ingegneria Civile, Informatica, Edile, Ambientale e Matematica Applicata, Università di Messina

Gabriele Testa

Facoltà di Architettura, Università di Palermo

Keywords: accelerogrammi naturali, NRHA, danno strutturale, correlazioni

ABSTRACT

Viene proposto un metodo di selezione di accelerogrammi naturali da impiegare nell'analisi dinamica non lineare al passo. Allo scopo di valutare la capacità dei parametri di intensità sismica di rappresentare il potenziale di danneggiamento del sisma, sono stati analizzati gli spettri delle correlazioni tra i parametri di intensità sismica che caratterizzano le registrazioni accelerometriche ed i parametri cinematici, energetici e di danno rappresentativi della risposta strutturale di un sistema ad un grado di libertà. In tale ambito, è stato definito un nuovo parametro di intensità sismica in forma integrale, l'Accelerazione di Picco Efficace per la Struttura (SEPA - Structure Effective Peak Acceleration), che è risultato fortemente correlato con i parametri di risposta della struttura in tutto il campo dei periodi e per qualsiasi livello di non linearità della risposta. Successivamente è stato proposto un metodo di selezione degli accelerogrammi, in grado di tenere conto delle due componenti di ogni accelerazione sismica, in grado di fornire set di accelerogrammi compatibili con un prefissato spettro di risposta e che singolarmente siano coerenti con l'intensità sismica da esso rappresentato, riducendo la dispersione delle caratteristiche delle registrazioni che caratterizzano i campioni scelti sulla base dei metodi presenti in letteratura.

1 INTRODUZIONE

L'analisi dinamica non lineare rappresenta il metodo più avanzato nel calcolo della risposta sismica delle strutture in quanto consente di tenere conto della natura dinamica dell'equilibrio, inserendo nel modello della struttura delle non linearità di tipo geometrico e meccanico. È noto che, in tale tipo di analisi, riveste particolare importanza la scelta dell'input sismico in quanto, in funzione di esso, cambiano gli effetti prodotti sulla struttura. In questo ambito va diventando sempre più popolare l'impiego di accelerogrammi provenienti da registrazioni di eventi sismici reali che contengono tutte le proprietà che caratterizzano un evento sismico, come non stazionarietà dell'ampiezza e del contenuto energetico alle varie frequenze.

Diversi studi sono stati volti a ricercare il metodo più appropriato di selezione degli

accelerogrammi registrati (Amiri e Dana, 2004; Elenas e Meskouris, 2001; Iervolino e Cornell, 2004; Iervolino, Maddaloni e Cosenza, 2006; Galasso e Iervolino, 2011). L'Eurocodice 8, a tal proposito, prescrive che possano essere utilizzati gruppi di accelerogrammi che nel campo di periodi compresi fra $0.2T_1$ e $2T_1$, dove T_1 è il periodo fondamentale di vibrare della struttura da analizzare nella direzione nella quale l'accelerogramma viene applicato, nessun valore medio dello spettro elastico di risposta smorzato al 5% calcolato per tutte le storie temporali sia inferiore al 90% del corrispondente valore dello spettro di risposta "target". Tale condizione rende problematica la selezione degli accelerogrammi dal database disponibile perché impone la condizione di spettrocompatibilità in ognuno dei valori di un grande campo del periodo di vibrare. È noto, infatti, che gli accelerogrammi naturali

generalmente hanno contenuto energetico concentrato in un campo limitato di frequenze e corrispondentemente gli spettri elastici di risposta presentano picchi in corrispondenza di tali frequenze. Ne consegue che per ottenere il requisito di spettrocompatibilità imposto diventa necessario ottenere lo spettro medio attraverso accelerogrammi di “intensità” molto diverse fra loro, che inducono nelle strutture a comportamento non lineare risposte molto diverse tra loro. Pertanto la stima della domanda attraverso la media delle risposte agli accelerogrammi così scelti diventa un “numero” convenzionale, ottenuto da medie di comportamenti fortemente diversi, e che non è idoneo a rappresentare la risposta della struttura a sismi di “intensità” coerente con lo spettro di risposta che si vuole approssimare.

In questo contesto, la ricerca condotta si è prefissa l’obiettivo di determinare un criterio e una procedura di selezione di set di accelerogrammi naturali da impiegare nell’analisi dinamica non lineare delle strutture nei quali il singolo campione rappresenti, in conformità con le prescrizioni della quasi totalità dei codici di progettazione sismica vigenti, il livello di eccitazione sismica definito dallo spettro di risposta, e che sia in grado di produrre il potenziale di danno dell’evento sismico atteso sul sistema in esame.

In conformità alle indicazioni normative, si vuole proporre una procedura che fornisca un set composto da 7 coppie (o terne) di accelerogrammi, considerati agenti contemporaneamente nelle due (o tre) direzioni, che producano singolarmente effetti coerenti con l’intensità sismica di progetto, evitando la dispersione che caratterizza gli accelerogrammi selezionati con i criteri attualmente proposti in letteratura.

Allo scopo di valutare la capacità del singolo parametro di intensità sismica di rappresentare il potenziale di danneggiamento del sisma su una data struttura, sono stati inizialmente analizzati gli spettri delle correlazioni tra i parametri di intensità sismica che caratterizzano le registrazioni accelerometriche ed i parametri scelti come rappresentativi della risposta strutturale di un sistema ad un grado di libertà. In tale ambito è stato introdotto un nuovo parametro di intensità sismica, definito accelerazione di picco efficace per la struttura (Structure Effective Peak Acceleration - SEPA), il quale, dipendendo dal periodo proprio di vibrare della struttura in fase elastica e a danneggiamento avvenuto,

consente di tenere in conto degli effetti che un sisma può produrre su una struttura in relazione all’entità delle escursioni attese in campo plastico. In questo ambito sono stati inoltre studiati i modelli di predizione del periodo del sistema danneggiato, il quale influenza la valutazione dell’indice di intensità definito.

Viene successivamente proposta una procedura per la selezione di accelerogrammi naturali basata sulla ricerca del set con il minimo valore del Coefficiente di Variazione (CoV) della combinazione del parametro SEPA e della velocità di picco al suolo (PGV) che consente di scegliere campioni dell’accelerazione sismica che inducono risposte della struttura da esaminare che siano singolarmente coerenti con le caratteristiche del sisma rappresentata dallo spettro di risposta.

2 SPETTRI DELLE CORRELAZIONI TRA INPUT E RISPOSTA STRUTTURALE

2.1 Scelta dell’input sismico

Per selezionare combinazioni di accelerogrammi naturali compatibili con un fissato spettro di risposta elastico in accelerazione (definito “target”) si è utilizzato il programma REXEL v 3.2 beta (Iervolino *et al.*, 2009). Il codice permette di costruire lo spettro in base alle indicazioni normative (EC8 o NTC2008) e alle caratteristiche principali del sito di interesse. Nelle analisi numeriche svolte si è scelto di fare riferimento ad uno spettro avente un valore di accelerazione al suolo $a_g=3.99 \text{ m/sec}^2$, ordinata del ramo di pseudo-accelerazioni massimo pari a 9.77 m/sec^2 , derivante da un terreno di categoria di sottosuolo B. Esplorando l’European Strong-motion Database e scegliendo accelerogrammi aventi la stessa classe del sito dello spettro target, si sono selezionati più di 50 accelerogrammi non scalati, definiti nel range di magnitudo $5.8 < M < 7.5$ e distanza $0 < R < 30$, compatibili con lo spettro di risposta target nell’intervallo di periodi compreso tra $0.2T_l$ e $2.0T_l$, con un margine di scarto non superiore a $\pm 10\%$, rispettando, così, le prescrizioni dell’Eurocodice 8. Il programma ha fornito, in questo caso, più di 100 set compatibili con lo spettro target, ognuno composto da 7 accelerogrammi, ciascuno dei quali formato da due record relativi alle direzioni orizzontali x e y . Inizialmente sono state analizzate le registrazioni diverse contenute nei 100 set; ognuna di esse è stata caratterizzata dal valore di magnitudo, distanza epicentrale R , valore di picco

dell'accelerazione PGA e della velocità PGV, intensità di Arias I_A , accelerazione effettiva di picco al suolo EPA e indice di Housner, questi ultimi definiti come segue:

$$I_A = \frac{\pi}{2g_0} \int_0^{\infty} [a(t)]^2 dt \quad (1)$$

$$EPA = \frac{\int_{0.1sec}^{0.5sec} S_a(\xi = 0.05, T) dT}{(0,5 - 0,1)} \quad (2)$$

$$I_H = \int_{0.1sec}^{2.5sec} S_v(\xi = 0.20, T) dT \quad (3)$$

In Eqq.(1)-(3) $a(t)$ è la storia temporale dell'eccitazione sismica mentre $S_a(\xi=0.05, T)$ ed $S_v(\xi=0.20, T)$ rappresentano gli spettri di accelerazione e velocità calcolati rispettivamente per uno smorzamento pari al 5% ed al 20%.

2.2 Definizione del parametro SEPA

Nello scegliere gli accelerogrammi da impiegare per valutare la risposta sismica non lineare di una data struttura, la più recente tendenza è quella di definire l'input in relazione ai periodi di vibrare di interesse per la struttura da analizzare. Come già evidenziato in lavori presenti in letteratura (es. Cantagallo C. *et al.*, 2012) tale intervallo deve estendersi fino a valori rappresentativi del periodo di vibrare della struttura danneggiata. In questo ambito si fa rilevare che l'entità del danneggiamento e quindi il valore del periodo di vibrare della struttura danneggiata è intrinsecamente legato al rapporto fra l'intensità del sisma e la resistenza della struttura, descritto dal fattore di struttura q .

Sulla base degli studi condotti in Colajanni P. (1999), viene proposta di seguito una nuova definizione della Accelerazione di Picco Efficace per la Struttura in relazione alle caratteristiche della struttura, definita SEPA (Structure Effective Peak Acceleration), calcolata con riferimento all'intervallo di periodi relativo all' i -esimo modo di vibrare della struttura in fase elastica T_i e a danneggiamento avvenuto T_{id} :

$$SEPA(T_i, T_{id}) = a_g^{target} \frac{\int_{T_i}^{T_{id}} S_a(\xi, T) dT}{\int_{T_i}^{T_{id}} S_a(\xi, T)^{target} dT} \quad (4)$$

Il parametro introdotto, valutato nel seguito assumendo $\xi=0.05$, dipende dal periodo

fondamentale della struttura, e dal valore del parametro α che è legato all'incremento previsto a seguito del danneggiamento. Per la sua valutazione, in letteratura vengono proposti valori compresi fra 1.5 e 2. Per tenere conto del diverso danneggiamento atteso per strutture rigide e strutture deformabili in relazione al rapporto fra l'intensità dell'input e la resistenza della struttura, per le quali è noto (NTC 2008) che sono attese relazioni diverse fra le ordinate spettrali e lo spostamento massimo atteso, viene proposta una legge distinta per i due range di periodi $T < T_C$ e $T \geq T_C$:

$$T_d = \alpha [T, q] T \quad (5)$$

dove

$$\alpha [T, q] = \left[1 + \frac{(q-1)}{k} \right] \quad \text{per } T \geq T_C \quad (6)$$

$$\alpha [T, q] = \left[1 + \frac{(q-1)}{k} \right] \frac{1}{q} \left[1 + (q-1) \frac{T_C}{T} \right] \quad \text{per } T < T_C \quad (7)$$

Per strutture deformabili ed a comportamento quasi lineare ($q=2$), assumendo $k=3$, α assume valore pari a 1.33, mentre per strutture rigide il valore di α aumenta di una quantità proporzionale a T e q . I valori del moltiplicatore α sono rappresentati, per $k=3$, nella successiva Figura 1 per sistemi con $T < T_C$ in funzione del periodo; nella Figura 2 è mostrata la dipendenza di α dal fattore di struttura q per $T \geq T_C$:

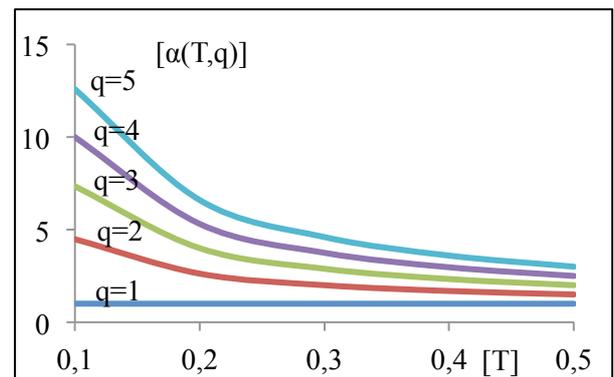


Figura 1. Moltiplicatore α al variare del periodo della struttura e del fattore di struttura per $T < T_C$ per $k=2$

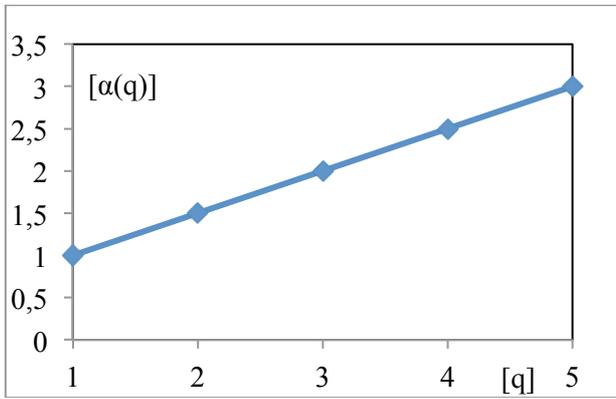


Figura 2. Andamento di α al variare di q per $T \geq T_c$ per $k=2$

2.3 Parametri rappresentativi del danno strutturale

Ogni accelerogramma selezionato è stato impiegato come input nell'analisi dinamica non lineare di sistemi SDOF per lo studio delle correlazioni fra i parametri caratteristici dell'input descritti nel paragrafo precedente e la risposta strutturale, valutata attraverso parametri cinematici (spostamento massimo x_{max}), energetici (energia dissipata E_H) e di danno, attraverso l'indice di Park & Ang $I_{P\&A}$ definito come segue:

$$I_{P\&A} = \frac{x_{max}}{x_u} + \beta \frac{E_H}{F_y x_u} \quad (12)$$

dove x_y , e F_y rappresentano lo spostamento e la forza di reazione allo snervamento e β un parametro numerico assunto pari a 0.15.

2.4 Spettri delle correlazioni per SDOF

Per stabilire quali parametri siano i più idonei per selezionare gli accelerogrammi da impiegare nella NRHA, si rende necessaria una valutazione quantitativa della capacità di prevedere effetti che gli accelerogrammi inducono su una determinata struttura. A tale scopo, per sistemi a comportamento elastico perfettamente plastico sono stati valutati gli spettri del coefficiente di correlazione fra i parametri caratteristici dell'accelerogramma x_1 , quali PGA, PGV, I_A , EPA, I_H , l'ordinata spettrale $S_e(T_1)$ ed il parametro SEPA(T_1, T_1^d) precedentemente definito, e quelli caratteristici della risposta x_2 in termini cinematici, energetici e di danneggiamento strutturale, spostamento massimo x_{max} , energia dissipata E_H e indice di Park & Ang $I_{P\&A}$, attraverso la nota espressione:

$$\rho(x_1, x_2) = \frac{\sum_{i=1}^N (x_{1i} - \bar{x}_1)(x_{2i} - \bar{x}_2)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_{1i} - \bar{x}_1)^2 (x_{2i} - \bar{x}_2)^2}} \quad (13)$$

Più precisamente, è stata valutata la risposta di sistemi ad un grado di libertà a comportamento elastico perfettamente plastico, per un campo di periodi di vibrare compreso tra 0.1 e 3.0 secondi, con soglia elastica scelta in relazione alla corrispondente ordinata dello spettro elastico target ed un prefissato valore del fattore di struttura. Per ognuno dei tre parametri di risposta x_{max} , E_H e $I_{P\&A}$ è stato valutato il coefficiente di correlazione con i parametri caratteristici dell'accelerogramma.

In Figure 3a-3c e 4a-4c sono rappresentati gli spettri delle correlazioni sopra citate per due diversi rapporti fra l'intensità dell'input e la resistenza degli oscillatori, considerando due valori del fattore di struttura, pari a $q=2$ e $q=5$, rappresentativi di strutture a comportamento debolmente e fortemente non lineare. Le curve mostrano che, per strutture deformabili ($T < T_c=0.5$ sec) i parametri $S_e(T)$, PGV, I_H e SEPA risultano quelli maggiormente correlati. Per quest'ultimo se α viene assunto costante, pari a 1.5, si riscontrano valori delle correlazioni ridotti per $q=5$ e $0.5 \text{ sec} \leq T \leq 0.9 \text{ sec}$; se il calcolo del periodo della struttura danneggiata viene stimato assumendo l'espressioni di α in Eqq. 6 e 7 anche in questo campo di periodi il parametro SEPA risulta fortemente correlato con tutti i parametri di risposta. Per strutture rigide ($T < T_c=0.5$ sec) a comportamento debolmente non lineare i parametri PGV e I_H sono poco correlati con tutti e tre i parametri di risposta considerati (x_{max} , E_H , $I_{P\&A}$), mentre per strutture a comportamento fortemente non lineare ($q=5$) gli stessi parametri PGV e I_H risultano i più correlati con lo spostamento massimo atteso (Fig. 4a), insieme al parametro SEPA valutato assumendo l'espressione di α proposta (per $k=3$); in questo campo di periodi I_H e soprattutto PGV hanno correlazioni con l'energia dissipata E_H modeste; l'espressione di α proposta consente di mantenere un adeguata correlazione fra il parametro SEPA e l'energia dissipata anche per valori estremamente ridotti del periodo di vibrare ($T < 0.3$ sec), perdendo leggermente di efficacia nell'intervallo $0.3 \text{ sec} < T < 0.6 \text{ sec}$. dove l'assunzione di $\alpha=1.5$ risulta più efficace. Va rilevato che, per strutture

rigide l'indice di Arias I_A , che notoriamente è un parametro fortemente legato al contenuto energetico del sisma, fornisce delle elevate correlazioni con la duttilità energetica per entrambi i valori del fattore di struttura considerato; tale proprietà non rimane valida nel campo delle strutture deformabili ($T > T_c$) dove la correlazione dell'indice di Arias I_A con la risposta strutturale è sempre modesta. Per l'indice di Park & Ang, che rappresenta una combinazione lineare tra spostamento massimo e energia dissipata, evidentemente il comportamento risulta intermedio fra quello dei due singoli parametri che la compongono.

In sintesi, si può affermare che i parametri $Se(T)$, SEPA, PGV e I_H possono essere scelti più degli altri per individuare l'input in modo da ottenere una stima stabile della risposta in termini di duttilità cinematica di una sistema ad un grado di libertà. In conformità a tali considerazioni, ed a quelle scaturite da altre analisi non riportate per brevità, si sono scelti come indicatori dell'intensità sismica per la ricerca di accelerogrammi registrati da impiegare nelle analisi dinamiche non lineari i parametri SEPA e PGV come di seguito specificato.

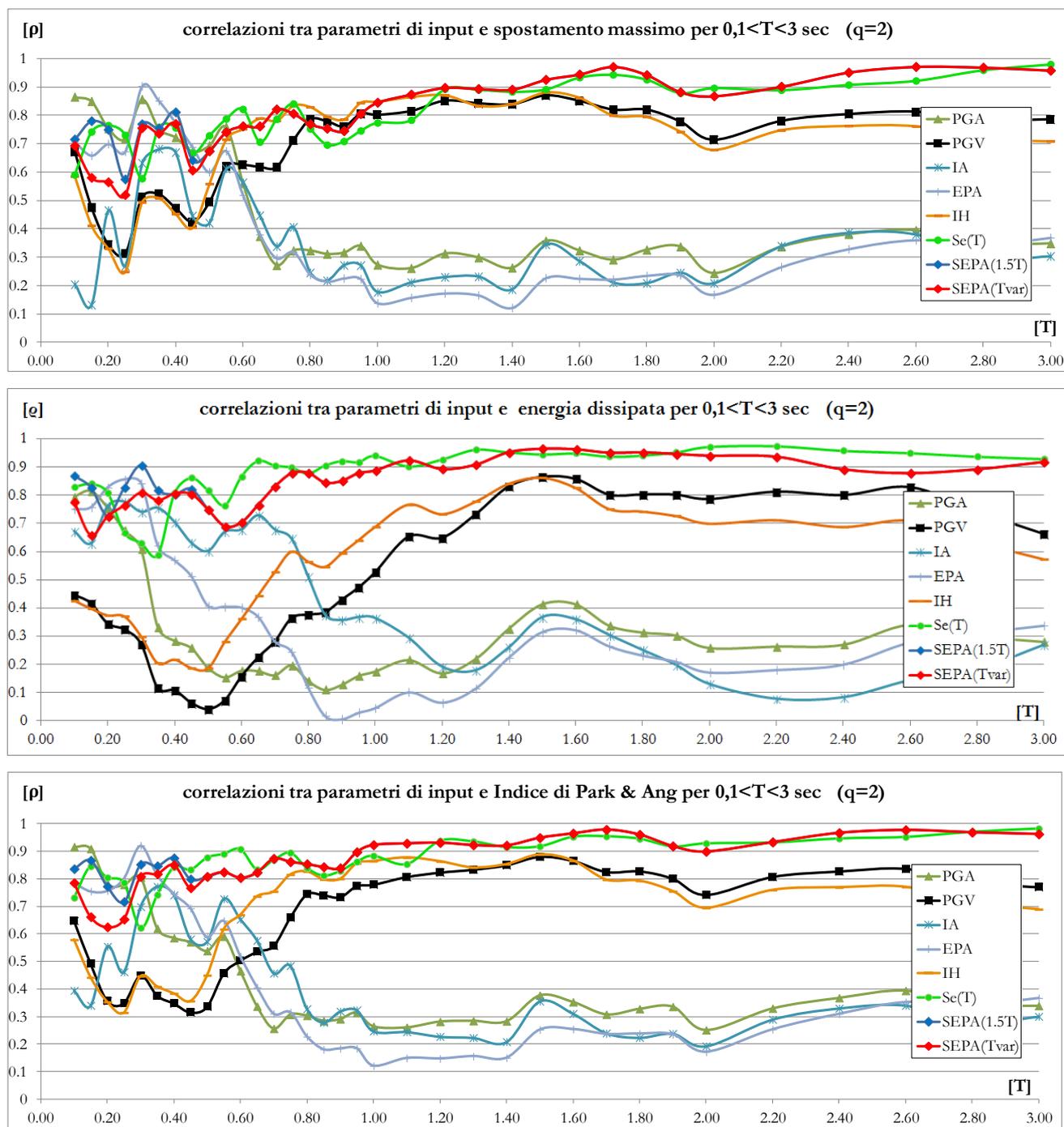


Figura 3. Spettri delle correlazioni tra parametri dell'intensità sismica e parametri di risposta per $q=2$

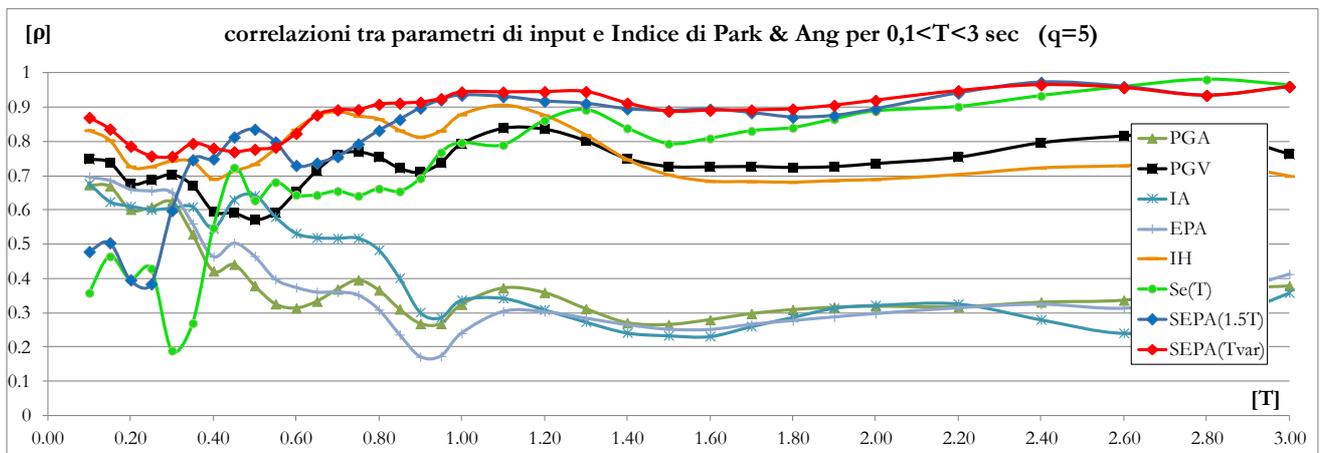
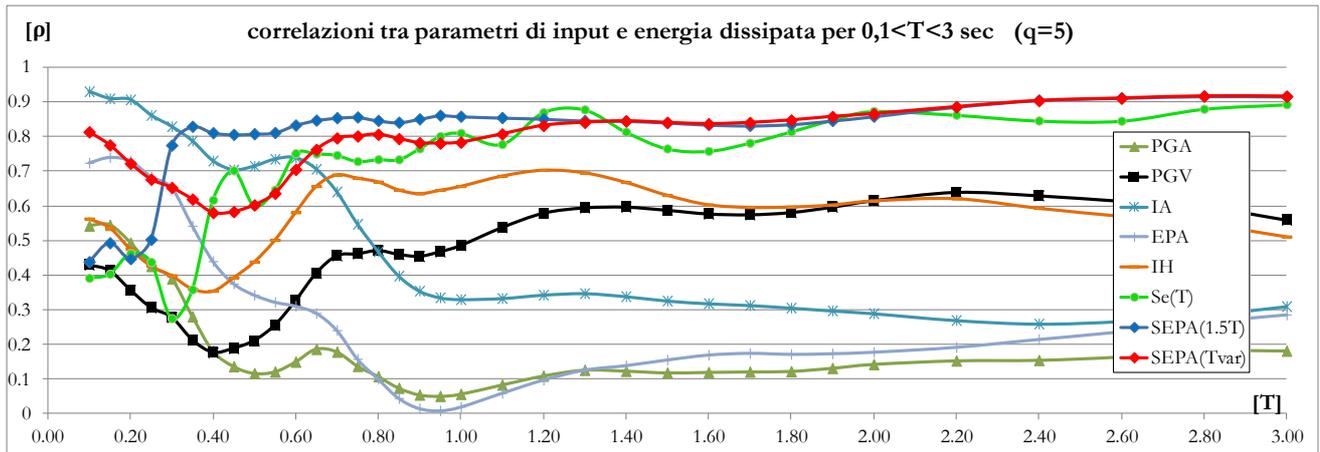
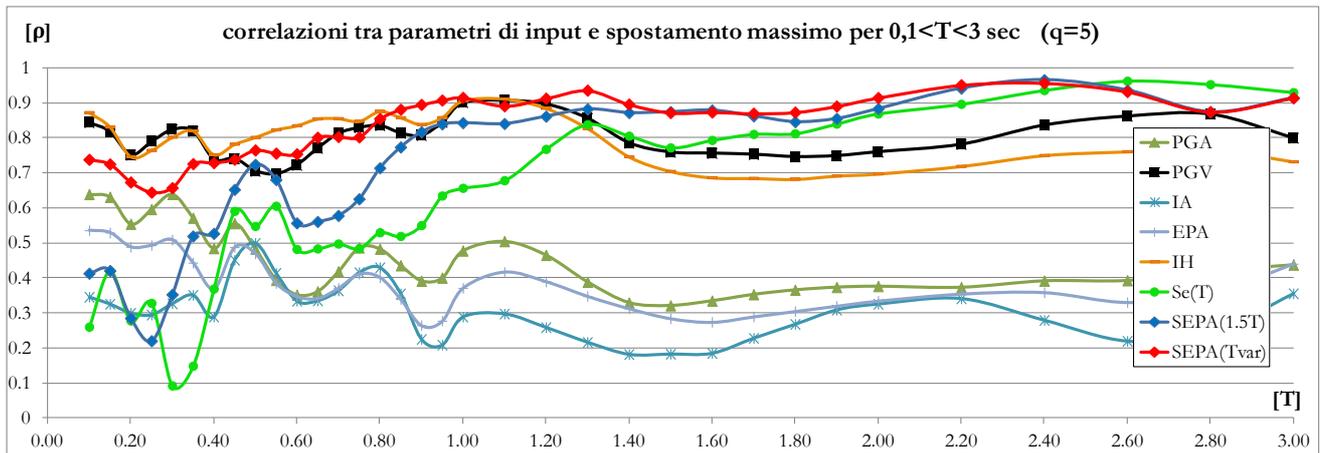


Figura 4. Spettri delle correlazioni tra parametri dell'intensità sismica e energia dissipata e indice di Park & Ang per $q=5$

3 PROCEDURA DI SELEZIONE DEGLI ACCELEROGRAMMI

Le tecniche attualmente disponibili in letteratura per la selezione di registrazioni di eventi sismici reali porta ad ottenere set di accelerogrammi, ciascuno dei quali induce effetti sulla struttura molto diversi fra loro. Si ottiene così una stima della risposta della struttura ad un prefissato livello di intensità sismica attraverso medie di risposte, ciascuna delle quali poco

coerenti con l'intensità prefissata. Ne risulta che la stima della domanda sismica avviene come media di risposte, a volte elastiche, a volte con spostamenti di ampiezza irrealistica, che non sono in grado di rappresentare il comportamento reale della struttura: Inoltre, molte volte i codici di calcolo disponibili non sono in grado di valutare la risposta per quelle registrazioni sismiche di intensità molto più elevata di quella rappresentata dallo spettro target, per i ben noti limiti relativi alle condizioni di convergenza della risposta in campo non lineare.

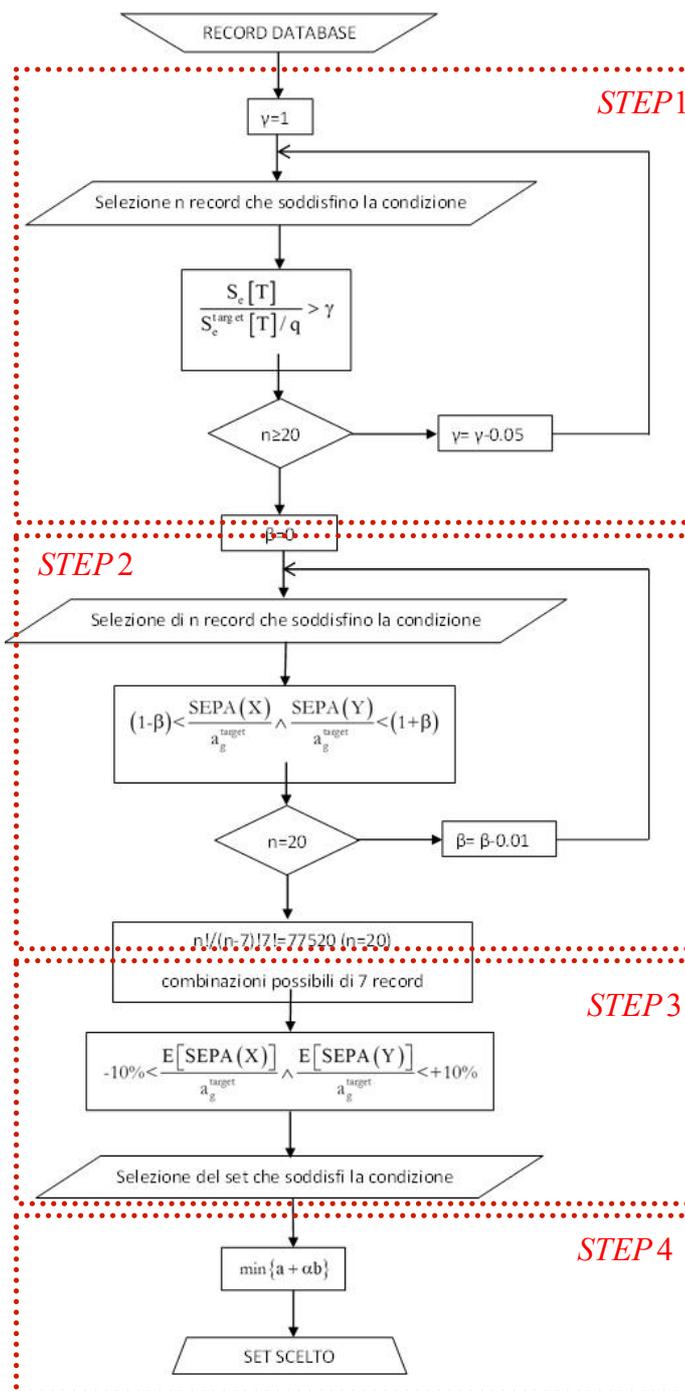


Figura 5. Diagramma di flusso del metodo SEPA+α PGV

Per ovviare a tale inconvenienti, la scelta delle registrazioni sismiche viene condotta con l'obiettivo di ottenere set di accelerogrammi per i quali il singolo campione ha una intensità il più possibile coerente con lo spettro di risposta elastico che definisce l'azione sismica, in modo da limitare il più possibile la variabilità di intensità fra i campioni del set.

La procedura proposta interpreta la compatibilità con lo spettro di risposta elastico in senso generalizzato attraverso il parametro SEPA, e consente di scegliere, in un database comunque

vasto, i set più adatti a valutare la risposta di una struttura di prefissato periodo e resistenza. La procedura è qui presentata con riferimento a strutture regolari, per le quali il moto nelle due direzioni ortogonali può essere analizzato separatamente; l'estensione a strutture spaziali irregolari è, come si vedrà, immediata.

Pertanto, per ogni evento, saranno considerate le due componenti della registrazione nelle due direzioni ortogonali separatamente.

Per l'applicazione della procedura descritta in seguito, deve essere preliminarmente stabilito in fase di progetto, o stimato o calcolato attraverso un'analisi statica non lineare per verifiche di strutture esistenti, il valore del fattore di struttura. I criteri e la procedura di applicazione proposti, che è stata implementata nel software *Mathematica*®, vengono di seguito descritti con l'ausilio del diagramma di flusso che rappresenta schematicamente i diversi step da seguire.

Step 1: al fine di garantire che il generico accelerogramma sollecciti la struttura oltre il limite elastico, vengono escluse tutte le coppie di campioni per i quali l'ordinata spettrale di una delle due componenti dell'accelerogramma in corrispondenza del periodo fondamentale di vibrare T_1 è tale da fare prevedere una risposta elastica, cioè $q S_{e,z}(T_{1,z}) \leq \gamma S_e^{\text{target}}(T_{1,z})$ con $\gamma=1$ e $z=x$ o y . Qualora tale selezione restituisca un numero di record inferiore a 20, numero minimo di record proposto per ottenere un numero adeguato di combinazioni possibili tra cui selezionare il set, il valore di γ viene via via diminuito (con passo pari a 0.05 nelle applicazioni che seguiranno) fino a raggiungere almeno il numero di record richiesti.

Step 2: tra gli $n \geq 20$ accelerogrammi rimanenti dopo la prima scrematura, si selezionano gli $n=20$ record che abbiano in ciascuna delle due direzioni, il valore di SEPA il più possibile vicino al valore $SEPA^{\text{target}} = a_g^{\text{target}}$ in maniera tale da considerare record maggiormente simili tra loro. Tale procedura assicura che i set di accelerogrammi che da essi si deriveranno, abbiano spettro di risposta nell'intervallo di periodi T di interesse per la struttura $T_1 \leq T \leq T_{1d}$ prossimo a quello target.

Step3: degli $n=20$ record trovati si effettuano tutte le combinazioni possibili in set di 7 record, ovvero si determinano 77520 combinazioni da esaminare; per ognuna di esse, vengono determinati i valori medi del parametro SEPA in ciascuna delle due direzioni X e Y , $E[SEPA(X)]$

ed $E[SEPA(Y)]$. Tra tutte le combinazioni definite, vengono, a questo punto, selezionate solo quelle per le quali viene garantita la spettrocompatibilità attraverso il parametro SEPA, contemporaneamente nelle due direzioni X e Y , con una tolleranza prefissata (per esempio di $\pm 10\%$).

Step 5: Tenendo conto che, in base alle osservazioni del paragrafo precedente, si sono scelti come parametri di intensità sismica i parametri SEPA e PGV, tra le combinazioni così ottenute, viene selezionato il set avente il minore valore della combinazione lineare delle varianze dei due parametri sopra considerati, cioè per il quale è minima la quantità $a + \alpha b$ essendo:

$$a = \sqrt{\text{CoV}(SEPA^X)^2 + \text{CoV}(SEPA^Y)^2} \quad (14)$$

$$b = \sqrt{\text{CoV}(PGV^X)^2 + \text{CoV}(PGV^Y)^2} \quad (15)$$

Tenendo conto che il parametro PGV risulta meno correlato con la risposta per sistemi a comportamento debolmente non lineare ($q=2$), e fortemente correlato con lo spostamento massimo della risposta per sistemi a comportamento fortemente non lineare ($q=5$) e strutture rigide ($T < T_c$), condizione per la quale il parametro SEPA non è così fortemente correlato come per gli altri valori dei parametri T e q , si assume per α l'espressione $\alpha = 0.1 q$ che amplifica il ruolo del parametro PGV per sistemi a comportamento fortemente non lineare ($q=5$).

Tale procedura fornisce un set per ciascun valore del periodo proprio di vibrare e del fattore di struttura q del sistema in esame, che determinano il valore del parametro SEPA associato a ciascun record e alla data struttura.

Nella Figura 6 vengono confrontati i valori medi della risposta, espressa in termini di duttilità cinematica, per i set ottenuti con la procedura proposta, assumendo che i periodi fondamentali di vibrare nelle due direzioni ortogonali siano coincidenti, con i corrispondenti valori per i set "spettrocompatibili" forniti dal programma *Rexel*. Dalla figura si evince che per sistemi a comportamento debolmente non lineare deformabili, i due criteri forniscono un medesimo valore medio della risposta attesa, con valori della duttilità coincidenti con quello del fattore di struttura, come è auspicabile in ragione della ben nota eguaglianza degli spostamenti attesi per i sistemi a comportamento lineare e non lineare in tale campo dei parametri. Per sistemi molto rigidi ($T < 0.25$ sec) la procedura proposta fornisce valori medi più piccoli di quelli ottenuti scegliendo gli accelerogrammi con le procedure presenti in letteratura; tale fenomeno può facilmente essere spiegato sulla base del noto fenomeno per il quale per sistemi rigidi la duttilità richiesta sia sensibilmente più grande del valore del fattore di struttura, e tale fenomeno è tanto più pronunciato quanto più grande è il valore del fattore di struttura; pertanto per gli accelerogrammi di grande intensità, che sono presenti nei set ottenuti con le procedure presenti in letteratura la richiesta di duttilità risulta estremamente elevata. Le curve per $q=5$ mostrano che, per periodi compresi nel campo $0.4 \text{ sec} \leq T \leq 1.4 \text{ sec}$ la stima della duttilità media con i due criteri di selezione degli accelerogrammi è pressoché coincidente. Per valori del periodo inferiori, la richiesta di duttilità assume valori così grandi da avere scarso interesse applicativo, mentre per strutture fortemente deformabili ($T > 1.4 \text{ sec}$) il criterio di selezione proposto risulta maggiormente conservativo, ottenendo valori

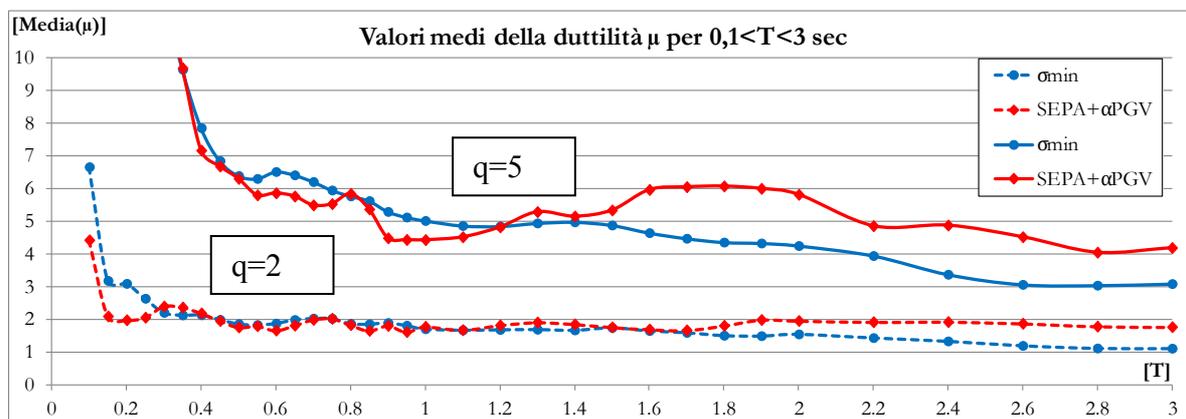


Figura 6. Spettri del valor medio della duttilità per $q=2$ e $q=5$ per diversi criteri di scelta dell'input sismico

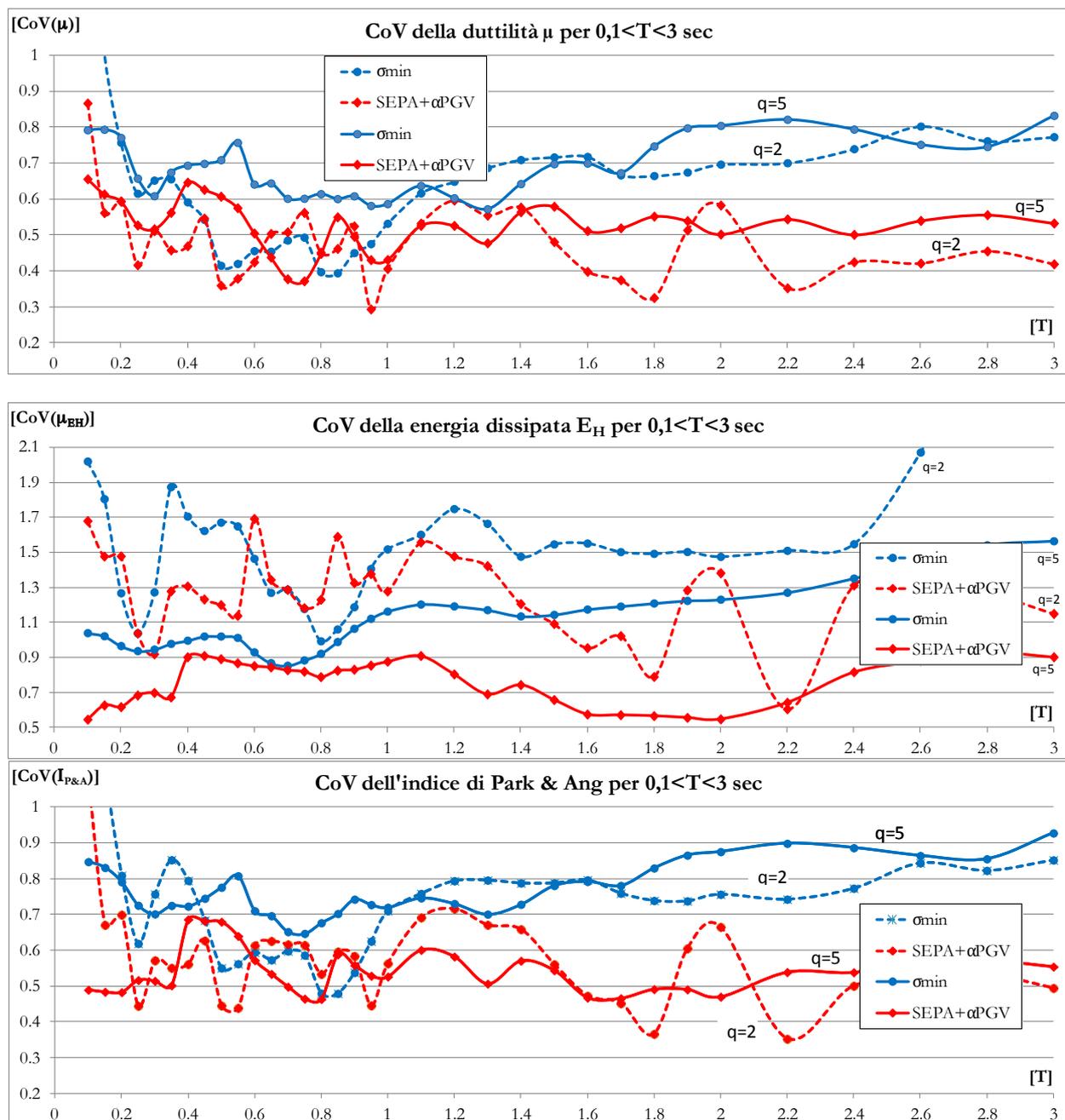


Figura 7. Spettri del Coefficiente di Variazione della risposta per diversi criteri di scelta dell'input sismico

medi della duttilità richiesta prossimi a quelli del fattore di struttura.

Nelle Figure 7a-7c vengono rappresentati gli spettri della combinazione quadratica dei Coefficienti di Variazione della risposta nelle due direzioni, secondo la relazione:

$$\text{CoV}[A] = \sqrt{\text{CoV}(A^X)^2 + \text{CoV}(A^Y)^2} \quad (16)$$

con $A = \mu, E_H, I_{P\&A}$, e A^Z ($Z=X, Y$) parametro di risposta relativo alla direzione dell'input e del moto del sistema in direzione Z .

Le curve mostrano che il CoV della duttilità ottenuto con gli accelerogrammi scelti secondo la procedura proposta è sostanzialmente il 30-40 % più piccolo di quella ottenibile scegliendo gli accelerogrammi in relazione al valore minimo del parametro σ (Iervolino, 2009), ad eccezione di sistemi a comportamento debolmente non lineare ($q=2$) e $0.4 \text{ sec} \leq T \leq 0.9 \text{ sec}$, dove i due valori sono molto simili fra loro. Il metodo proposto consente di ottenere CoV della duttilità ridotti per sistemi con $T < 1 \text{ sec}$ simili per i due diversi valori del fattore di struttura analizzati. Le riduzioni del CoV della risposta ottenibili con il metodo di

selezione degli accelerogrammi proposto sono ancora più rilevanti per l'energia dissipata e l'indice di Park & Ang, soprattutto per sistemi con comportamento fortemente non lineare.

4 CONCLUSIONI

La disponibilità di vaste banche di registrazioni di eventi sismici reali ha reso sempre più popolare l'impiego degli accelerogrammi naturali per la modellazione dell'azione sismica in analisi dinamiche non lineari al passo. In letteratura non esiste unanime consenso nel definire i criteri da adottare per la selezione degli accelerogrammi.

Inizialmente sono stati valutati gli spettri delle correlazioni fra i parametri di intensità sismica (IS) ed i parametri di valutazione della risposta strutturale di natura cinematica, energetica e funzionali di danno. In tale ambito si è definito un nuovo parametro di intensità sismica, definito come Accelerazione di Picco Efficace per la Struttura (Structure Effective Peak Acceleration SEPA), basato su una misura integrale dello spettro di risposta elastico dell'accelerogramma in un range di ampiezza dipendente dalle caratteristiche dinamiche della struttura da analizzare e dal rapporto fra la resistenza mobilitata dal sisma e la resistenza della struttura da analizzare. Le analisi hanno evidenziato che il parametro SEPA, insieme al valore di picco della velocità del terreno e l'indice di Housner sono i parametri maggiormente correlati con la risposta.

Sulla base di tale considerazione è stata messa a punto una procedura di selezione degli accelerogrammi, in grado di fornire uno o più set composti da 7 coppie (o terne) di accelerogrammi, che considerati agenti contemporaneamente nelle due (o tre) direzioni, producano singolarmente effetti coerenti con l'intensità sismica di progetto, fornendo nel complesso accelerogrammi compatibili (in senso integrale) con lo spettro di risposta. Tale risultato è stato raggiunto garantendo che ogni accelerogramma scelto sia in grado di sollecitare la struttura in campo non lineare, scegliendo il set delle 7 coppie di registrazioni accelerometriche caratterizzato dal minimo Coefficiente di Variazione (CoV) di ciascuna delle due componenti della risposta nelle direzioni principali della struttura. E' stato redatto un programma di calcolo con il codice *Mathematica* in grado di fornire il set scelto analizzando

database comunque ampi, con oneri computazionali fortemente ridotti.

Il metodo è stato applicato, nel presente lavoro, a SDOF, ma può essere facilmente applicato per la selezione di accelerogrammi per l'analisi di strutture spaziali irregolari, per le quali una valutazione dell'efficacia richiederà l'analisi della risposta attraverso modelli spaziali della struttura.

BIBLIOGRAFIA

- Amiri, G.G., and Dana, F.M. 2005. Introduction of the most suitable parameter for selection of critical earthquake, *Computer and Structures*, **83**, 613-626.
- Bommer, J.J., and Acevedo, A. 2004. The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis, *Journal of Earthquake Engineering*, **8**(1), 43-49.
- Cantagallo, C., Camata G., Spacone, E. 2012. Seismic demand uncertainty provided by ground motion intensity measures, *Proceedings of the 15rd World Conference of Earthquake Engineering*, Lisbona.
- Colajanni, P. 1999. Braced frames with hysteretic dissipative devices: seismic response and design criteria, *Journal of Earthquake Engineering*, **3**, 33-57.
- Elenas, A. and Meskouris, K. 2001. Correlation study between seismic acceleration parameters and damage indices of structures, *Engineering Structures*, **23**, 698-704.
- Gentiluomo V. 2013. Un criterio di selezione di accelerogrammi naturali per l'analisi dinamica non lineare delle strutture, Tesi di Dottorato, Dipartimento DICIEAMA Università di Messina.
- Katsanos, E.I., Sextos, A.G., Manolis, G.D. 2010. Selection of earthquake ground motion records: A state of the art review from a structural engineering perspective, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **30**, 157-169.
- Iervolino, I., and Cornell, C.A. 2005. Record selection for nonlinear seismic analysis of structures, *Earthquake Spectra*, **21**(3), 685-713.
- Iervolino, I., Galasso, C., Cosenza, E. 2009. REXEL: computer aided record selection for code-based seismic structural analysis, *Bulletin of Earthquake Engineering*, **8**, 339-362.
- Iervolino, I., Maddaloni, G., Cosenza, E. 2006. Unscaled real record sets compliant with Eurocode 8, *1th European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, Ginevra.
- Iervolino, I., Maddaloni, G., Cosenza, E. 2008. Eurocode 8 compliant real record sets for seismic analysis of structures, *Journal of Earthquake Engineering*, **12**, 54-90.