

Spettri di progetto: una rivisitazione critica (terremoti e unicorni)

Revisiting design spectra (earthquakes and unicorns)

Gian Michele Calvi¹ ■

Sommario

Sismologi ed ingegneri hanno lavorato per decenni al perfezionamento degli spettri di progetto, analizzando registrazioni di segnali e riflettendo su aspetti probabilistici. Questo intenso lavoro di ricerca ha prodotto numerosi sviluppi, per esempio suggerendo di adottare più di un periodo per definire una forma spettrale, o proponendo correzioni in funzione del periodo di ritorno del parametro che definisce la pericolosità sismica.

Tuttavia, l'assunto di base di adottare tre criteri fondamentali – accelerazione costante a bassi periodi, spostamento costante per periodi lunghi, velocità costante nell'intervallo di periodi intermedi – non è mai stato veramente messo in discussione.

In questo articolo le basi dell'ipotesi di velocità costante nell'intervallo di periodi intermedi sono messe in discussione e viene mostrato come possano essere opinabili e non abbiano un reale fondamento fisico.

Viene mostrato come forme spettrali basate su differenti logiche siano potenzialmente coerenti con le evidenze sperimentali e come possano portare a notevoli differenze in termini di domanda in spostamento ed in accelerazione per periodi che caratterizzano gran parte delle strutture. In questo contesto, lo sviluppo storico degli spettri di progetto, lineari e non lineari, viene ripercorso criticamente, proponendo numerosi spunti di discussione.

Parole chiave: spettri di progetto, forma spettrale, spettri lineari e non lineari.

Abstract

For several decades, seismologists and engineers have been struggling to perfect the shape of design spectra, analyzing recorded signals and speculating on probabilities. This research effort produced several improvements, for example suggesting to adopt more than one period to define a spectral shape, or proposing different spectral shape as a function of the return period of the design ground motion.

However, the basic assumption of adopting essentially three fundamental criteria, i.e.: constant acceleration at low periods, constant displacement at long periods, constant velocity in an intermediate period range, has never been really questioned.

In this opinion paper, the grounds of a constant velocity assumption is discussed and shown to be disputable and not physically based. Spectral shape based on different logics are shown to be potentially consistent with the experimental evidence and to lead to possible differences of 100% in terms of displacement and acceleration demand in the wide intermediate period range that characterizes the vast majority of structures.

In this framework, the historical development of linear and non linear spectra is critically revisited, proposing additional points to be possibly reconsidered.

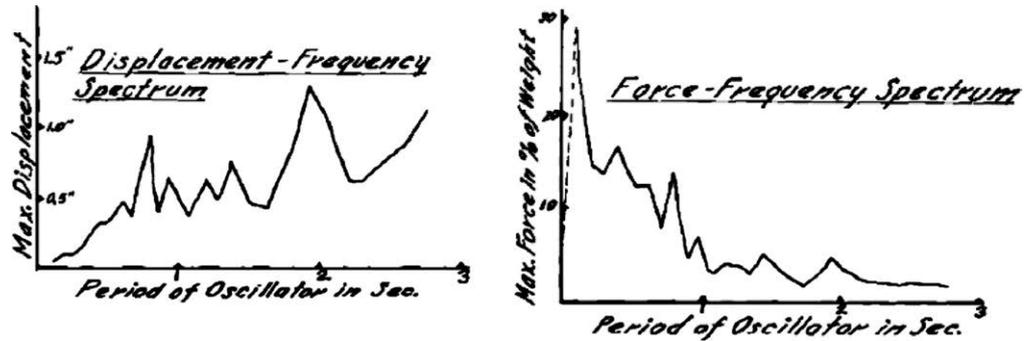
Keywords: design spectra, spectral shape, linear and non linear spectra.

1. Origine dello spettro di risposta in ingegneria sismica

È facile scoprire le origini e lo sviluppo degli spettri di progetto in ingegneria sismica, basta leggere la sintesi magistrale pubblicata da Anil Chopra (2007). Il lettore scoprirà che il concetto di spettro di risposta elastico – che descrive il massimo valore di qualsiasi parametro della risposta di un sistema ad un grado di libertà soggetto ad una specifica componente di moto al terreno – fu dapprima concepito in modo intuitivo da K. Suheiro, nel 1926. Da allora e fino agli anni cinquanta a studi basati su misure strumentali si accompagnarono sviluppi teorici, soprattutto a Caltech, con contributi di Von Karman, Biot, Hudson, Popov e altri. Chopra riporta una figura (qui riprodotta in Figura 1) da una pubblicazione di Housner (1941), dove non è difficile riconoscere i tratti essenziali degli spettri in spostamento ed in accelerazione utilizzati anche oggi.

¹ Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica (Eucentre) e Istituto Universitario di Studi Superiori di Pavia (IUSS).

Figura 1
Spettri di risposta in spostamento e accelerazione da una componente del terremoto di Los Angeles del 2 Ottobre 1933 (Chopra (2007) e Housner (1941)).



Gli sviluppi teorici di quegli anni appaiono ancora più straordinari quando si consideri la scarsità dei dati sperimentali disponibili. Di fatto, fino agli anni ottanta tutto si basava essenzialmente su una sola registrazione, quella di El Centro, del terremoto della Imperial Valley del 18 maggio 1940. Ovviamente una registrazione analogica, priva di attendibilità per periodi più lunghi di qualche secondo, che divenne il paradigma del moto al terreno prodotto da un forte evento in zone prossime all'epicentro. Il racconto di Chopra termina con gli anni settanta, quando il concetto di spettro di risposta elastico era diventato patrimonio comune, grazie a contributi di molti ricercatori, tra cui Veletsos e Newmark. In effetti quelli che nei primi anni ottanta erano studenti (come me) ricorrevano soprattutto ad un fortunato manuale, pubblicato dall'EERI in una serie fortunata, di cui Newmark era uno degli autori (Newmark and Hall, 1982).

Nella monografia, il "tipico spettro di risposta" è illustrato facendo riferimento alla Figura 2, e confrontato con gli spettri derivati dalla registrazione di El Centro, in Figura 3. Si noti l'uso della carta logaritmica a tre assi di ordinate, che consentiva la rappresentazione degli spettri in spostamento, velocità e accelerazione in un solo diagramma. Si noti anche l'uso della frequenza e non del periodo sull'asse delle ascisse: una scelta che contribuisce a confinare nella parte iniziale (a sinistra) i dati

Figura 2
Tipico spettro di risposta come riportato da Newmark and Hall (1982). Gli spostamenti sono in pollici (1 in = 25.4 mm). Le variabili con pedice m indicano i valori massimi al terreno. β indica lo smorzamento assunto (5%).

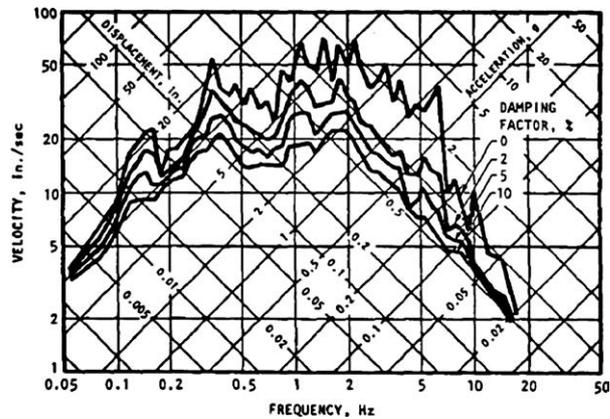
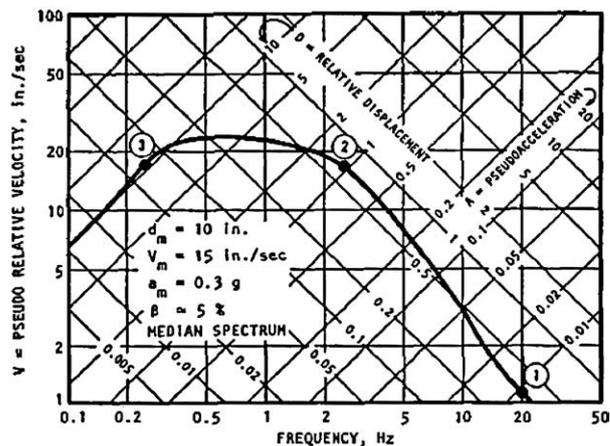


Figura 3
Spettri di risposta della registrazione NS del moto di El Centro, come riportati da Newmark and Hall (1982).



relativi a lunghi periodi di vibrazione, per i quali i dati sperimentali non erano affidabili.

Sulla base di questi dati, Newmark e Hall costruivano gli spettri di progetto. Ad esempio, in Figura 4 si vede la costruzione dello spettro di progetto partendo da una accelerazione al terreno di 0.5 g. Lo spettro di progetto è definito da un tratto a massimo spostamento, per periodi superiori a 3 s, da un tratto a massima accelerazione, per periodi tra 0.15 e 0.5 s, e da un tratto a massima velocità, tra 0.5 e 3 s.

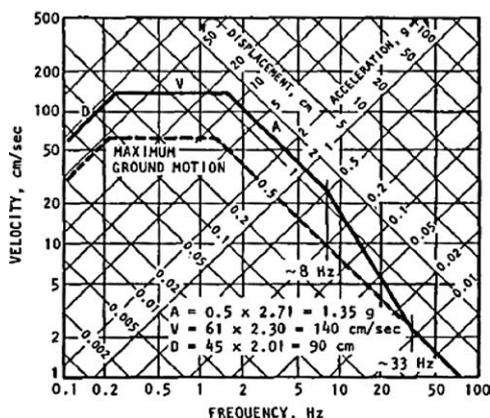


Figura 4
Spettro di risposta elastico come definito da Newmark and Hall (1982), per una accelerazione massima al terreno (PGA) di 0.5 g, smorzamento 5% e probabilità cumulata di una sigma.

È curioso come nel corso degli anni, con l'aumentare dei dati sperimentali disponibili, siano state avanzate molte proposte di variazione degli intervalli di periodi in cui mantenere costante accelerazione, velocità e spostamento e di correzione dei valori da adottare per tali variabili, in funzione di magnitudo, distanza dall'epicentro o dalla faglia, amplificazione locale, effetti orografici, effetti di direzionalità della faglia e della propagazione del moto, senza però mai discutere la forma dello spettro basato sulla costanza delle tre variabili.

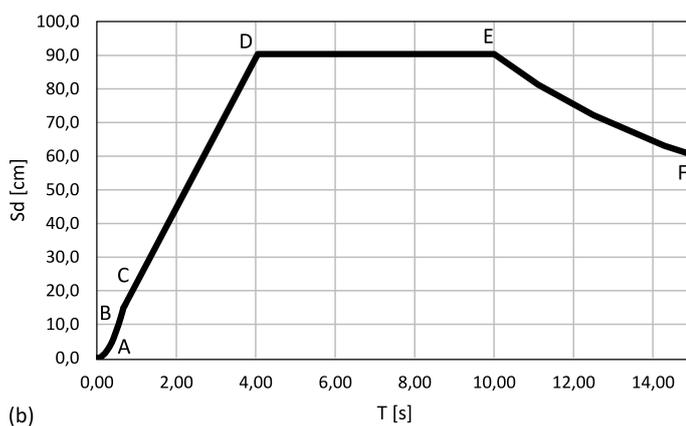
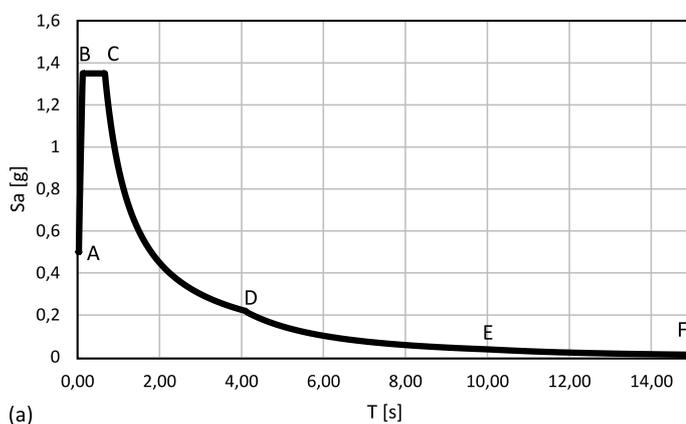
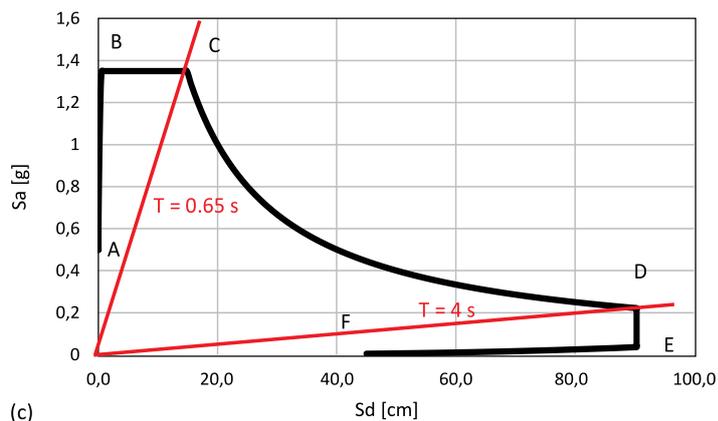


Figura 5
Lo spettro di progetto di Newmark della Figura 4, riprodotto come spettro in accelerazione, spettro in spostamento e spettro misto accelerazione - spostamento.

Figura 5
Lo spettro di progetto di Newmark della Figura 4, riprodotto come spettro in accelerazione, spettro in spostamento e spettro misto accelerazione - spostamento.



2. Rappresentazione degli spettri di progetto

Lo spettro di progetto di Newmark della Figura 4, è riprodotto in Figura 5 nelle forme di spettro in accelerazione, in spostamento e mista accelerazione – spostamento. In quest'ultima forma i diversi periodi di vibrazione sono rappresentati da rette uscenti dall'origine, come quelle rappresentate ad intersecare i punti C e D.

Oggi la forma più comune in cui si rappresenta uno spettro di progetto è quella in accelerazione (Figura 5a): in funzione di parametri locali e del periodo di ritorno del moto che si desidera rappresentare, vengono definiti i punti B, C e D e la forma spettrale risultante è ancorata alla massima accelerazione al terreno (PGA) al punto A.

Negli approcci di progetto agli spostamenti si usa lo spettro della Figura 5b, definito semplicemente da periodo e spostamento al punto D e dalle due rette risultanti.

Se si considera la rappresentazione combinata della Figura 5c, è evidente che i segmenti A-B ed E-F non rivestono alcun interesse pratico e, conseguentemente, lo spettro può essere compiutamente definito dai punti C e D, a condizione che si accetti l'ipotesi dei tre tratti ad accelerazione, velocità e spostamento costanti.

Tutto questo è ben noto, ed è stato riassunto solo per convenienza, in funzione di quanto seguirà.

In particolare, si discuterà l'assunzione di velocità costante, dimostrando che si tratta di un mito, senza basi teoriche o sperimentali, che può avere indotto in errori rilevanti.

3. Una rivisitazione degli spettri di progetto

Erano geniali, è chiaro. Si sono inventati spettri sensati, usati per mezzo secolo, quasi senza dati.

Adesso i dati ci sono, tanti e digitali, sembra ovvio usarli per una revisione critica, che ne migliori gli aspetti più discutibili.

Rapporto tra massima accelerazione spettrale e PGA

Newmark and Hall (1982) avevano stabilito moltiplicatore pari a 2.71 per ottenere la massima accelerazione spettrale ($S_{a,max}$) dalla PGA, con una probabilità cumulata di una sigma.

Valori prossimi a questo sono stati usati in quasi tutti i codici normativi, con parametri spesso uguali a 2.5 o 3.0, modificati da fattori correttivi in funzione dell'amplificazione locale.

L'analisi dei dati digitali oggi disponibili indica una grande dispersione del rapporto tra $S_{a,max}$ e PGA.

Osservando poi che il valore della PGA è del tutto irrilevante ai fini applicative (e anzi induce in errori di valutazione, in relazione alla modesta correlazione con $S_{a,max}$ e ogni altro parametro della risposta), l'ovvia conclusione parrebbe di adottare semplicemente il punto C nella Figura 5a come parametro fondamentale per la definizione dello spettro in accelerazione.

Ciò comporterebbe la derivazione di funzioni che correlino magnitudo, distanza dalla faglia ed amplificazione locale con il periodo T_C e la corrispondente accelerazione spettrale S_{aC} al punto C.

Massimo spostamento spettrale e corrispondente periodo di vibrazione

Relazioni simili a quelle ipotizzate nell'ultimo periodo per lo spettro in accelerazione sono state proposte nell'ambito della progettazione agli spostamenti (Priestley et al., 2007), suggerendo la definizione dello spettro in spostamento sulla base del solo punto D in Figura 5b.

Lo spettro in spostamento è così costituito da una retta che congiunge l'origine al punto D e rimane poi costante.

Correlazioni tra il punto D e magnitudo, distanza dall'epicentro o dalla faglia ed amplificazione locale sono state proposte,

come ad esempio nelle Equazioni (1) e (2) (riferimenti si trovano in Priestley et al., (2007). All'epoca in cui queste equazioni sono state derivate, tuttavia, ben poche registrazioni digitali affidabili erano disponibili, essenzialmente derivate dal terremoto di Kobe del 17 gennaio 1995 (e.g.: Tolis and Faccioli, 1999). Si ripropone dunque un problema di verifica tra speculazione analitica e dati empirici, non molto dissimile da quello discusso in relazione ad El Centro.

$$T_D = 1.0 + 2.5 (M_w - 5.7) \quad (\text{s}) \quad (1)$$

$$\Delta_D = C_S \cdot \frac{10^{(M_w - 3.2)}}{r} \quad (\text{mm}) \quad (2)$$

Dove M_w è la Magnitudo momento, r la distanza dalla faglia in km, C_S è un fattore di amplificazione locale, uguale a 0.7 per terreno roccioso, a 1.0 per terreno solido, a 1.4 per terreni intermedi, e ad 1.8 per terreni soffici.

Combinazione delle due componenti orizzontali del moto

Quando si vogliono derivare equazioni del tipo delle (1) e (2) da dati sperimentali, un problema si pone immediatamente. Le due componenti orizzontali dello stesso moto al terreno sono ovviamente caratterizzati dalle stesse magnitudo, distanza, terreno ecc., tuttavia, sfortunatamente, presentano di solito valori di massimo spostamento ed accelerazione spettrale diversi, spesso combinando nella medesima componente l'accelerazione spettrale più alta con lo spostamento più basso e viceversa. Si possono immaginare soluzioni diverse a questo apparente contrasto, ad esempio suggerendo di adottare lo spettro risultante dall'involuppo di quelli nelle due direzioni, oppure calcolando per ogni ascissa un'ordinata risultante dalla radice quadrata della somma dei quadrati delle ordinate dei due spettri.

Ritengo più razionale derivare un singolo segnale in accelerazione, combinando vettorialmente i valori nelle due direzioni, e da questo segnale derivare un unico spettro. È evidente che uno spettro di tal fatta non corrisponde ad alcuna direzione, ma piuttosto ad un segnale rotante, che in ogni istante utilizza il modulo del vettore di accelerazione massimo. È altrettanto evidente che lo spettro risultante potrà somigliare all'involuppo dei due spettri direzionali, in quanto dominato istante per istante dal valore di accelerazione più alto.

Si noti che un approccio di questo tipo non ha nulla a che vedere con la combinazione delle azioni su un edificio, che risultano dalla diversa risposta in due direzioni ortogonali. Come discutono Stewart et al. (2011), la necessità di considerare la combinazione della risposta in direzioni diverse per strutture non doppiamente simmetriche (azimuth-dependent) rimane indiscussa.

Perché una parte di spettro a velocità costante?

Come è stato discusso, il punto di arrivo di qualche decennio di speculazioni sulla forma più appropriata di uno spettro di progetto è stato adottare tre criteri semplici in tre campi di periodo di vibrazione: accelerazione costante a bassi periodi, spostamento costante a periodi lunghi, velocità costante nella zona intermedia.

Peccato che mentre i primi due criteri hanno un fondamento fisico e possono essere condivisi, la scelta di adottare velocità costante nella parte intermedia sembra rispondere solo a criteri di eleganza formale, anche se nessuno, credo, ne ha mai discusso la fondatezza.

Dal punto di vista della corrispondenza con i dati empirici l'assunzione di velocità costante può essere messa in discussione, non solo per il riferimento ad un solo moto, ma anche per la rappresentazione dei dati su carta tri-logaritmica, che consente ogni interpretazione (si vedano di nuovo le Figure 2, 3 (Newmark and Hall (1982)).

A titolo di esempio, si ipotizzi di adottare una linea retta tra i punti C e D della Figura 5c, come illustrato in Figura 6. Lo spettro risultante, in rosso, mostra differenze dell'ordine del 100% nella domanda di spostamento e accelerazione nella vasta zona intermedia che caratterizza la maggioranza delle strutture, con poche eccezioni, come gli edifici isolati o i ponti sospesi. Se tuttavia si considerano i medesimi dati espressi in scala tri-logaritmica (Figura 7) queste enormi differenze diventano assai meno evidenti. La differenza di circa il 30% nella velocità massima (nel caso specifico da circa 140 a circa 200 cm/s) non appaiono in evidente contrasto con i dati sperimentali.

Si noti che un effetto di questo tipo sembra anticipato nello spettro di risposta concettuale descritto da Newmark and Hall (1982, Figura 2).

Può sembrare curioso che la regola della velocità costante non sia stata messa in discussione per tanto tempo. Può essere un effetto dell'immenso rispetto che la comunità scientifica attribuisce agli straordinari personaggi che hanno ideato e sviluppato il concetto di spettro di risposta. È però altrettanto curioso notare che la curva tri-lineare descrive perfettamente la capacità di un sistema di prova dinamico, ad esempio di una tavola vibrante:

- La massima accelerazione deriva dalla capacità in forza (cioè dalla sezione del pistone moltiplicata per la pressione dell'olio) divisa per la massa totale di tavola e carico portato;

- La massima velocità risulta dal massimo flusso di olio diviso per la sezione del pistone;
- Il massimo spostamento è semplicemente la metà della corsa del pistone.

In questo contesto, il confronto tra spettro del moto e capacità della tavola consente immediatamente di verificare se un certo moto è riproducibile con un dato provino. Sfortunatamente, tutto questo non comporta affatto che lo spettro di un moto sismico debba essere caratterizzato da un tratto a velocità costante.

L'adozione di un segmento lineare tra i punti C e D non deve essere inteso come una proposta, piuttosto come una provocazione, che potrà trovare o meno fondamento nei dati sperimentali.

Figura 6
Lo spettro di progetto di Newmark (in rosso) confrontato con uno spettro in cui S_a varia linearmente con S_d nel tratto intermedio (in giallo).

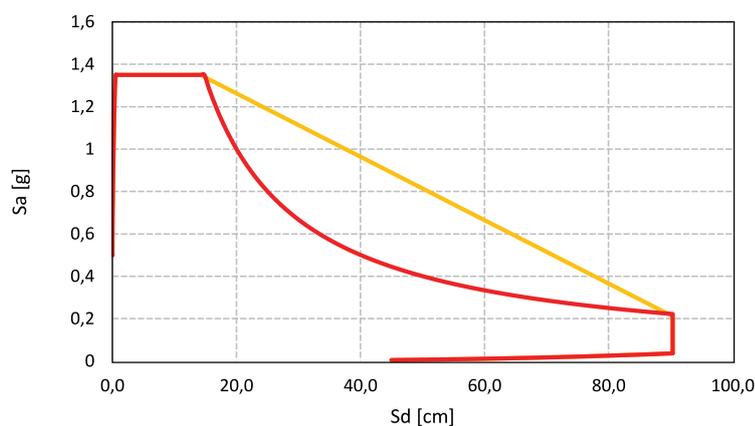
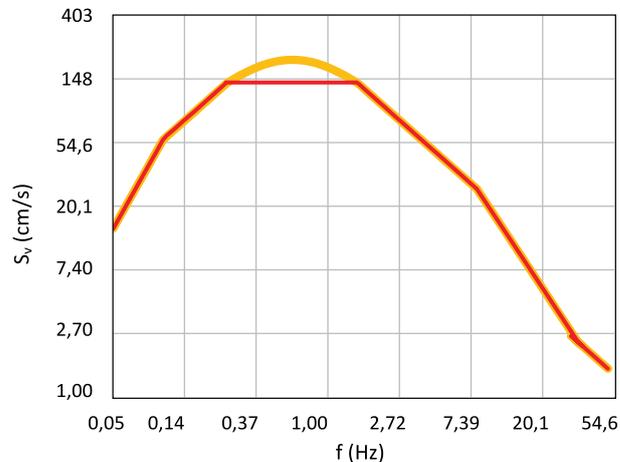


Figura 7
Lo stesso spettro della Figura 6, riportato in scala tri-logaritmica.



4. Lo spettro di risposta di El Centro

Come abbiamo discusso, il moto registrato a El Centro il 18 maggio 1940, e specificamente la sua componente NS (Figura 3) è stato il principale riferimento per la definizione di uno spettro di progetto fino agli anni ottanta. Gli spettri di entrambe le componenti sono riportate in Figura 8, utilizzando i dati digitalizzati da Irvine e assumendo smorzamento 5%. I dati della componente NS sono stati utilizzati per produrre gli spettri “mediano” e “una sigma”, come definiti in Newmark and Hall (1982), adottando i seguenti valori al terreno: $PGA = 0.35 \text{ g}$, $PGV = 26,4 \text{ cm/s}$, $PGD = 18 \text{ cm}$.

Lo spettro mediano (in blu) è quindi ottenuto amplificando i valori di picco al terreno con i seguenti fattori: $A = 2.12$ $V = 1.65$ $D = 1.39$, mentre lo spettro una sigma (in rosso) è ottenuto applicando i seguenti moltiplicatori: $A = 2.71$ $V = 2.30$ $D = 2.01$. Lo spettro in giallo è prodotto coerentemente con la discussione che precede in merito alla eliminazione del tratto a velocità costante. I punti C and D sono stati ricavati dagli spettri in accelerazione e spostamento, come $T_C = 0.53 \text{ s}$ $S_{aC} = 0.9 \text{ g}$, $T_D = 2.5 \text{ s}$, $S_{dD} = 27 \text{ cm}$ (vedi le Figure 10a e c).

Gli stessi spettri della Figura 8 sono riportati in Figura 9 nella forma combinata $S_a - S_d$.

Mentre nella Figura 8 la scala logaritmica schiaccia le curve e le fa sembrare simili, nella Figura 9 è evidente (come in Figura 6) che l'adozione di un ramo discendente iperbolico o lineare risulta in valutazioni di domande in accelerazione o spostamento completamente diverse.

Il ramo discendente iperbolico, corrispondente a velocità costante e usato per decenni, non è evidentemente superiore a quello lineare nel rispettare i dati registrati neppure nel solo caso di El Centro. Altre registrazioni dovranno essere prese in considerazione prima di esprimersi più compiutamente.

Si noti peraltro che anche per l'interpretazione di dati (inesistenti) a lunghi periodi negli anni settanta fu applicata molta ingegnosità speculativa.

Gli spettri nelle Figure 8 e 9 sono plottati singolarmente in Figura 10. Anche in queste rappresentazioni più dettagliate è difficile dire quali curve corrispondano più fedelmente alle registrazioni di EL Centro.

Nelle Figure 9 e 10, sono altresì riportati gli spettri risultanti da un accelerogramma ottenuto con la combinazione vettoriale, istante per istante, delle componenti NS ed EW. Tali spettri differiscono in modo significativo da quello della componente NS solo a lunghi periodi, dove la domanda di spostamento è dominata dallo spettro EW.

Lo spettro di progetto suggerito da Newmark and Hall (1982) sembra tenere in considerazione la domanda di spostamento della componente ES, anche se ciò non era esplicitamente indicato. Questo esteso uso di intelligenza e buon senso è stato il fondamento della longevità delle forme spettrali suggerite nella seconda metà del secolo scorso.

5. Trattare la risposta non lineare

Come descrive R. Riddell (2008), i primi tentativi di stimare la massima risposta di sistemi non lineari per mezzo di spettri di risposta inelastici, risalgono agli anni cinquanta. Si farà qui di nuovo riferimento a Newmark and Hall (1982), per commentare le scelte di allora e le necessità di oggi.

L'idea fondamentale per derivare spettri inelastici dalla loro controparte elastica si basava sulla possibilità di definire zone dello spettro in cui accelerazione, velocità e spostamento vengono "conservate" o modificate per mezzo di appropriati fattori. La

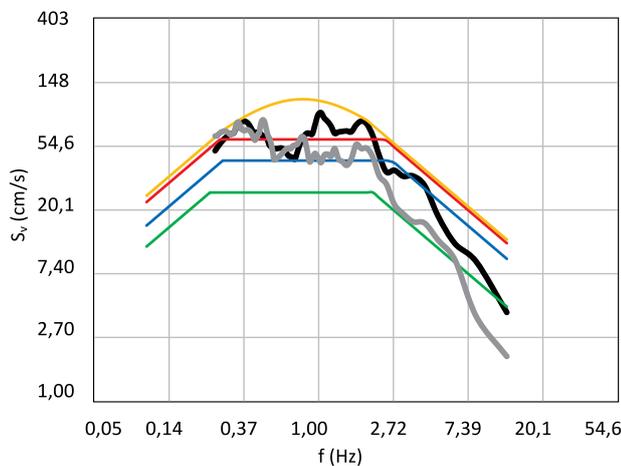


Figura 8
Spettri di risposta delle componenti della registrazione di El Centro (NS in nero, EW in grigio, dati derivati da Irvine), confrontati con i valori di picco al terreno (in verde, $PGA = 0.35 g$, $PGV = 26,4 \text{ cm/s}$, $PGD = 18 \text{ cm}$) e con gli spettri di progetto mediano (blu) e una sigma (rosso) suggeriti da Newmark and Hall (1982). Lo spettro in giallo è prodotto assumendo una variazione lineare della accelerazione spettrale in funzione dello spostamento spettrale nella regione intermedia (vedi Figura 9).

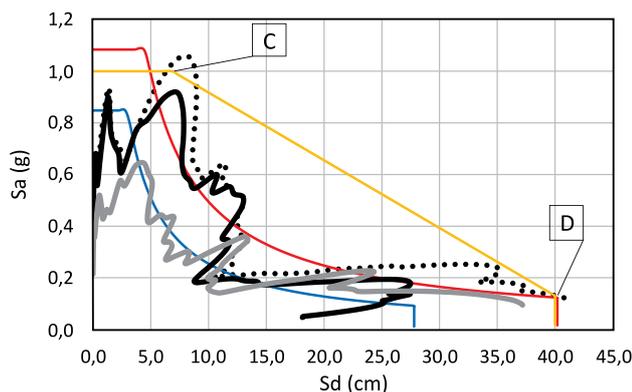


Figura 9
Gli spettri di Figura 8 plottati nella forma combinata $S_a - S_d$. I punti C e D dello spettro giallo (senza tratto a velocità costante) sono ricavati dagli spettri in accelerazione e in spostamento del segnale "rotante": $T_C = 0,53 \text{ s}$, $S_{dC} = 0,9 \text{ g}$, $T_D = 2,5 \text{ s}$, $S_{dD} = 27 \text{ cm}$ (Figura 10).

Figura 10
 Gli spettri delle Figure 8 e 9, plottati singolarmente per meglio apprezzare le differenze (nero: El Centro NS, grigio: El Centro EW, nero a punti: El Centro "rotante", rosso: Newmark one sigma, giallo: senza tratto a velocità costante).

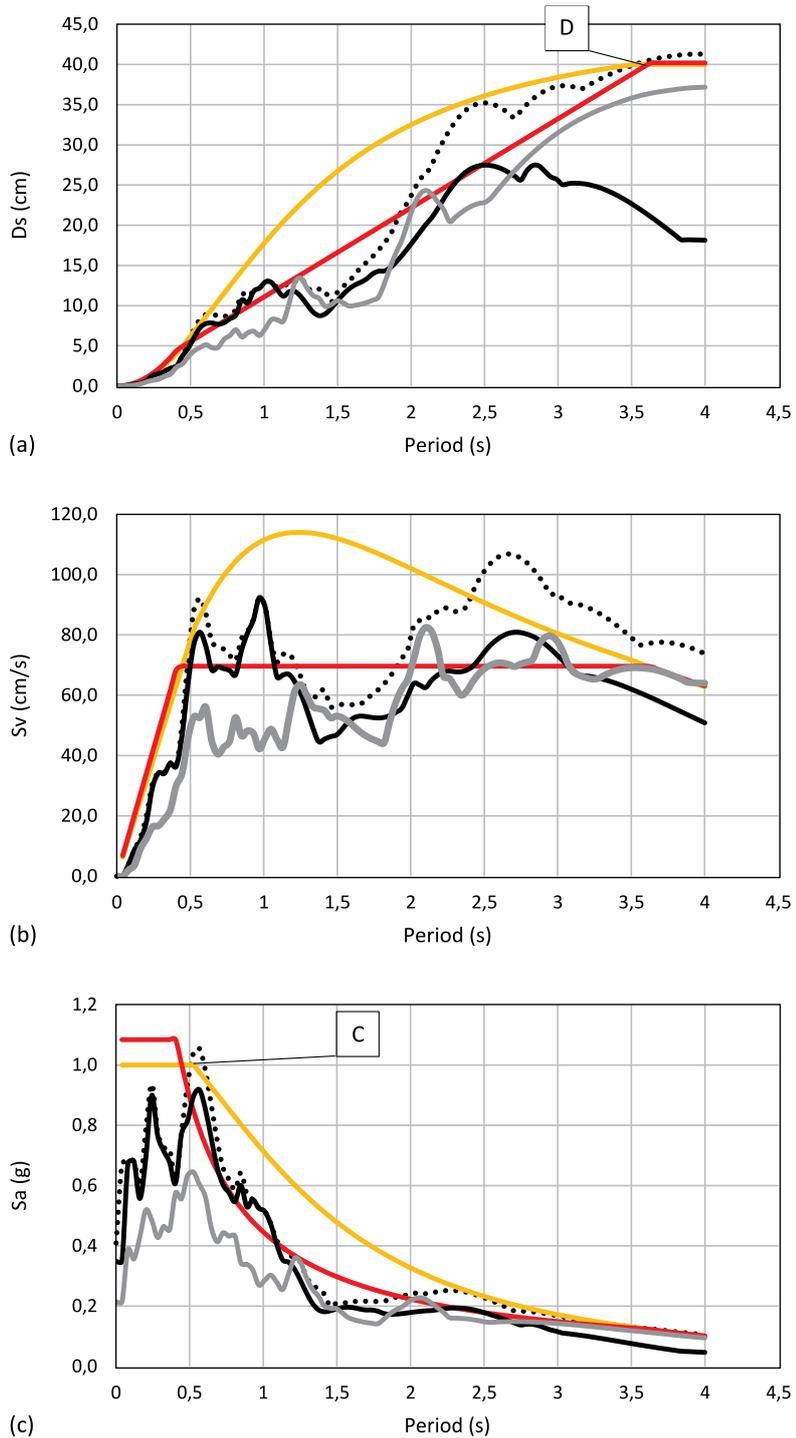


figura chiave riportata in Newmark and Hall (1982) è qui riprodotta come Figura 11. Vi si ipotizza una struttura con risposta elastica perfettamente plastica, caratterizzata da un rapporto tra capacità di spostamento e spostamento di snervamento pari alla duttilità μ . Sotto queste ipotesi, le regole da applicare per ottenere gli spettri inelastici erano così definite:

- Per frequenze fino a 2 Hz (regioni D and V in Figura 6) si divida l'ordinata dello spettro elastico per μ per ottenere lo spettro inelastico in accelerazione.
- Per frequenze comprese tra 2 e 8 Hz (regione A), si faccia la stessa cosa, ma dividendo per $(2\mu-1)^{0.5}$ invece che per μ .
- Per frequenze superiori a 33 Hz si mantenga nello spettro inelastico la stessa accelerazione dello spettro elastico.
- Si raccordino linearmente le ordinate corrispondenti a 8 e 33 Hz nel diagramma in scala logaritmica.
- Per ottenere lo spettro inelastico in spostamento si moltiplichino per μ tutte le ordinate dello spettro inelastico in accelerazione.

Questo approccio è stato discusso, corretto, modificato in aspetti minori per decenni, ma è stato utilizzato nella sua logica di base in tutti gli approcci alle forze, e conseguentemente in tutte i codici normativi, fino ad oggi.

La procedura è completamente diversa se si adotta un approccio agli spostamenti (Priestley et al., 2007).

In questo caso la correzione dello spettro elastico tiene conto solo della energia dissipata per isteresi, con una equivalenza allo smorzamento viscoso, e si usa un sistema lineare equivalente con rigidità secante allo spostamento di progetto, che corrisponde ovviamente ad un periodo di vibrazione più lungo. I dettagli sono illustrati in Priestley et al. (2007) e non verranno ripresi in questa sede. Tuttavia, al solo fine di avere una impressione circa le conseguenze di scelte diverse, un confronto concettuale tra i diversi approcci è illustrato in Figura 12.

Si ipotizzi di considerare un sistema con periodo iniziale di 0.5 s ed una duttilità $\mu = 3$. Progettando come suggerito da Newmark and Hall (1982) si ottiene un'accelerazione di circa 0.6 g e uno spostamento corrispondente di circa 18 cm. Lo stesso sistema verrebbe probabilmente progettato per uno spostamento di circa 30 cm secondo Priestley et al. (2007), stimando un fattore di correzione della domanda di spostamento pari a circa 0.64. L'accelerazione di progetto risulterebbe circa 0.28 g, circa la metà del caso precedente.

Entrambe le risposte non lineari attese (le curve gialle e verdi in Figura 12) sembrano compatibili con la domanda rappresentata dallo spettro in blu, ottenuto dallo spettro lineare applicando la sola correzione connessa allo smorzamento equivalente alla dissipazione per isteresi. Da questo punto di vista quindi, le due soluzioni sembrano corrispondere semplicemente a diverse possibili opzioni di progetto, piuttosto che una giusta ed una sbagliata. Tuttavia, se si adottasse una forma spettrale lineare nella zona intermedia (in azzurro nella figura) i due approcci porterebbero alla medesima soluzione (curva gialla e frecce nera, entrambe a punti).

Si tratta solo di un esempio, da non generalizzare. In effetti, in Priestley et al. (2007) e in Priestley (2003), è illustrato chiaramente come la resistenza di progetto risultante da un approccio agli spostamenti possa essere più alta o più bassa di quella risultante da un approccio alle forze, in funzione non solo delle caratteristiche del sistema strutturale, ma anche dalla sismicità locale.

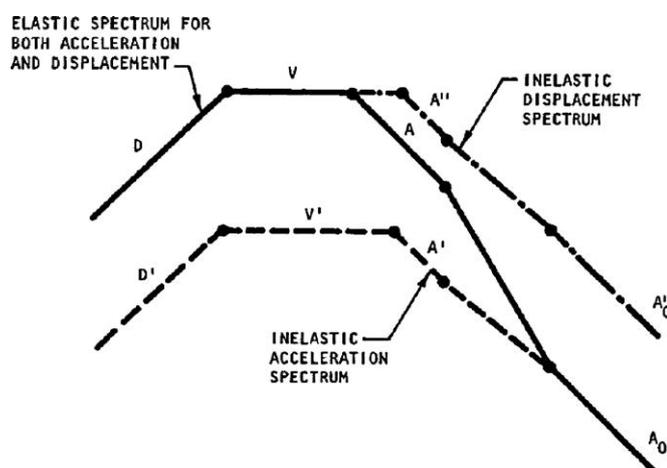


Figura 11
Derivazione degli spettri inelastici in accelerazione ed in spostamento dallo spettro elastico (Newmark and Hall (1982) and Riddel (2008))

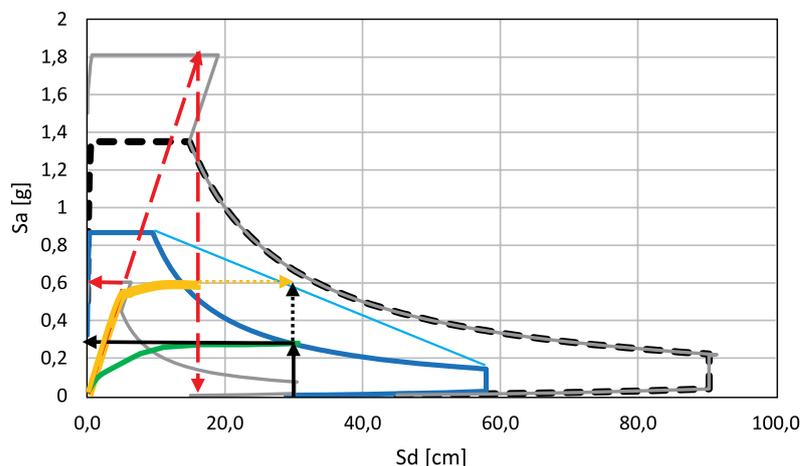


Figura 12
Domanda e risposta per spettri e strutture diversi.
 · in nero tratteggiato lo spettro elastico (di Newmark);
 · in grigio gli spettri inelastici in accelerazione e in spostamento secondo Newmark and Hall (1982);
 · in rosso tratteggiato l'accelerazione e lo spostamento di progetto di un sistema con periodo elastico di circa 0.5 s;
 · in giallo una possibile risposta non lineare di tale sistema;
 · in blu lo spettro inelastico secondo Priestley et al. (2007); in azzurro lo spettro modificato come in Figura 6);
 · in nero lo stesso sistema, progettato per uno spostamento di circa 30 cm;
 · in verde la possibile risposta non lineare di questo ultimo sistema;
 · in giallo a punti il cambiamento nella risposta attesa del primo sistema;
 · in nero a punti il cambiamento nel progetto del secondo sistema.

6. Correzione dello spettro elastico per tenere conto della dissipazione di energia

È oggi pacificamente accettato che domanda e capacità debbano essere, per quanto possibile, considerate separatamente, e che, conseguentemente, la non linearità della risposta debba essere inclusa nell'ambito della capacità.

Ciò può essere ottenuto, per esempio, applicando varie forme di analisi push-over, combinate con uno dei metodi derivati da quello originariamente proposto da Fajfar and Fishinger (1988), oppure considerando l'approccio lineare equivalente discusso da Priestley et al. (2007), originariamente proposto da Shibata and Sozen (1976). Una discussione di questi approcci esula dal presente scritto.

Se invece si esamina il lato della domanda, si preferisce tuttora correggere lo spettro elastico per tenere conto della dissipazione di energia. Questa correzione può essere ottenuta applicando (Priestley et al. (2007)) allo spettro di risposta in spostamento un fattore correttivo η_{ξ} , funzione dello smorzamento equivalente ξ_h , stimato per mezzo di equivalenze energetiche (Jacobsen (1960)). Come esempio, si consideri tra molte la formulazione raccomandata da Priestley et al. (2007):

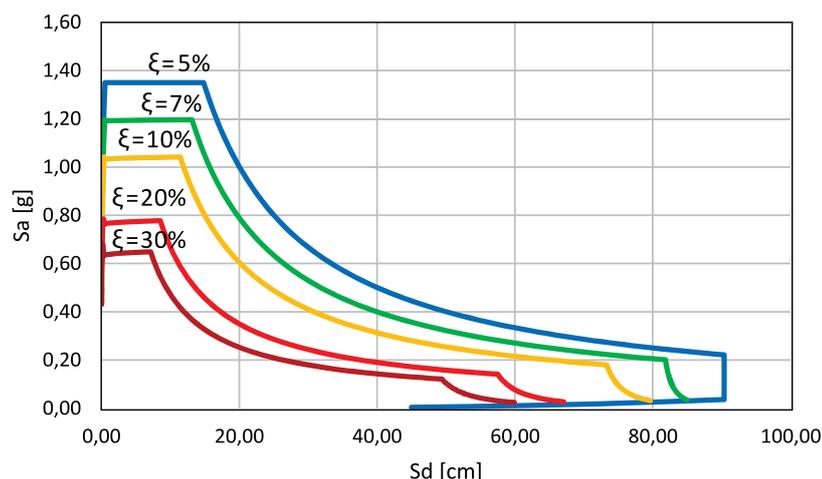
$$\eta_{\xi} = \left(\frac{0.07}{0.02 + \xi} \right)^{0.5} \quad (3)$$

$$\xi = \xi_0 + \xi_h = \xi_0 + C \left(\frac{\mu - 1}{2\pi\mu} \right) \quad (4)$$

Dove ξ è lo smorzamento totale equivalente del sistema, ξ_0 è lo smorzamento viscoso proprio del sistema (normalmente assunto come 0.05), C è funzione della forma dei cicli di isteresi (di solito compreso tra 0.3 e 0.6) e μ è la duttilità del sistema. Un'opportuna taratura di η è ancora un problema aperto, con possibili influenze di magnitudo, distanza dalla sorgente, condizioni locali, tipo di faglia, (e.g., Priestley et al. (2007) raccomandano di ridurre l'esponente da 0.5 a 0.25 in caso di prossimità all'epicentro), ma potenzialmente anche di altri parametri.

Ad esempio, sulla base di analisi di registrazioni effettuate in Turchia, Akkar (2015) suggerisce di ridurre η con l'aumentare del periodo. Gli spettri ridotti risultanti sono riportati in Figura 13, considerando lo spettro base di Figura 6. È evidente che una forma diversa del tratto a velocità costante avrebbe rilevanti effetti sulla domanda (probabilmente più significativi della correzione basata sul periodo di vibrazione).

Figura 13
Lo spettro di Figura 6 ridotto applicando il fattore di cui all'Equazione (3) e la correzione suggerita da Akkar (2015) al crescere del periodo di vibrazione.



7. Una proposta concettuale per la definizione degli spettri di progetto

Si propone dunque che uno spettro di progetto venga definito sia definito da due punti, definiti come il massimo periodo (T_C) al quale l'accelerazione spettrale (S_{aC}) è massima ed il minimo periodo (T_D) al quale lo spostamento spettrale (S_{dD}) è massimo. I quattro valori che definiscono tali punti saranno calcolati in funzione di magnitudo, distanza dall'epicentro o dalla faglia, amplificazione locale e qualunque altro parametro emergerà dall'analisi dei dati sperimentali.

Nella regione intermedia si suggerisce l'applicazione dell'Equazione (5), funzione del solo parametro α , il cui valore sarà definito sulla base degli stessi parametri utilizzati per il calcolo di T_C , S_{aC} , T_D , ed S_{dD} .

$$S_a = S_{aD} + (S_{aC} - S_{aD}) \cdot \sin^\alpha \left(\cos^{-1} \left(\frac{S_d - S_{dC}}{S_{dD} - S_{dC}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \right) \quad (5)$$

Gli altri parametri che appaiono nell'equazione (5) sono derivati da quelli già definiti, come segue:

$$S_{dC} = S_{aC} \frac{T_C^2}{4\pi^2} \quad (6)$$

$$S_{aD} = S_{dD} \frac{4\pi^2}{T_D^2} \quad (7)$$

L'Equazione (5) può sembrare complessa, ma non lo è, e consente la definizione di una famiglia di curve che possono riprodurre qualsiasi forma nella regione intermedia dello spettro S_a vs. S_d , come illustrato in via esemplificativa in Figura 14.

In essa, i due punti critici sono stati assunti come: $T_C = 0.53$ s, $S_{aC} = 0.9$ g e $T_D = 2.5$ s, $S_{dD} = 27$ cm. Si tratta degli stessi punti usati nelle Figure 8, 9 e 10 con riferimento alla registrazione di El Centro.

Le forme riportate nella figura corrispondono a: $\alpha = 1$ (verde), $\alpha = 2$ (rosso, in cui la curva si riduce ad una retta) e $\alpha = 3$ (blu). Mentre le differenze negli spettri in accelerazione, spostamento e velocità possono apparire poco rilevanti, nella forma combinata S_a vs. S_d è evidente ancora una volta che una selezione appropriata del parametro α può risultare in dati di valutazione e di progetto radicalmente diversi.

8. Conclusioni

È evidente che questo scritto verrebbe definito in inglese una opinion paper, basata su molta speculazione intellettuale e pochi dati. Le conclusioni hanno lo stesso senso e lo stesso sapore.

Solo alla prossima puntata scopriremo se i dati sperimentali disponibili sostengono quanto proposto e consentono un'appropriate taratura, verifica e validazione delle formulazioni proposte.

Queste verifiche sono in corso sugli eventi italiani recenti.

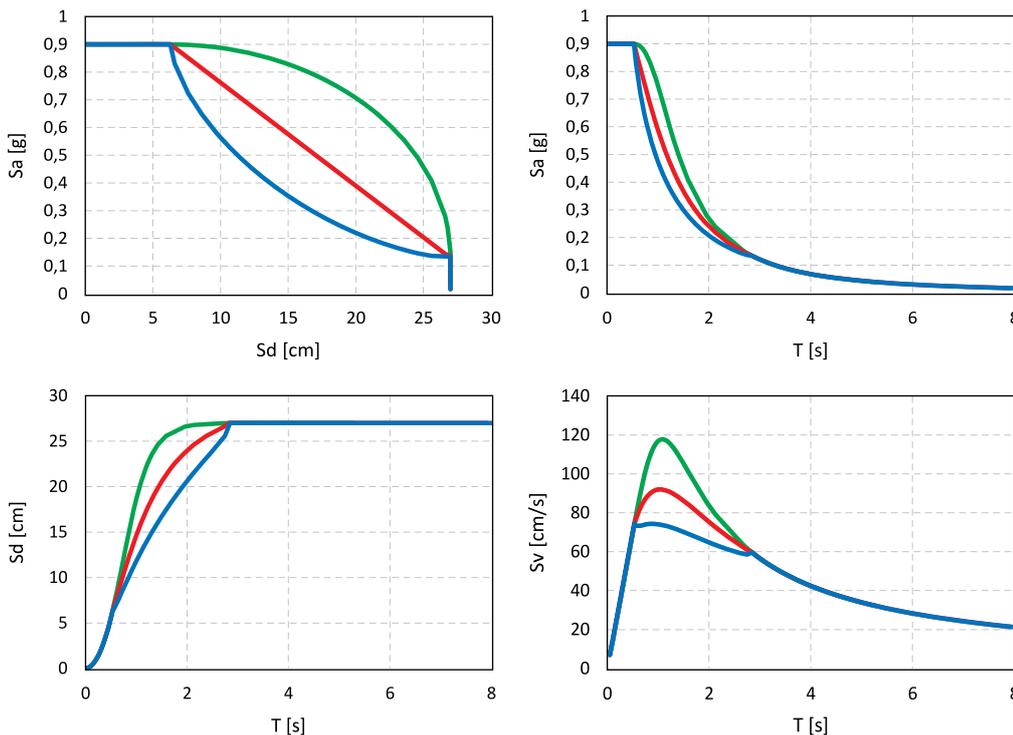


Figura 14
Spettri di progetto creati applicando l'equazione (5) ed assumendo i seguenti parametri: $T_C = 0.53$ s, $S_{aC} = 0.9$ g, $T_D = 2.5$ s, $S_{dD} = 27$ cm. Le curve nella regione intermedia corrispondono a: $\alpha = 1$ (verde), $\alpha = 2$ (rosso, in cui la curva si riduce ad una retta) e $\alpha = 3$ (blu).

Definizione di spettri elastici di progetto

Si propone che l'accelerazione di picco al terreno (PGA) non venga più utilizzata come parametro fondamentale della domanda e della pericolosità. La forma spettrale ed il suo parametro di ancoraggio possono fondarsi sulla definizione di due punti (C e D in quanto precede), ovvero sui massimi spettrali in accelerazione e spostamento e sui corrispondenti periodi di vibrazione. La forma spettrale nella regione intermedia, approssimativamente tra 0.5 e 3.0 secondi, deve essere studiata sulla base dei dati sperimentali, abbandonando il concetto di velocità costante, che non ha base teoriche né empiriche.

È qui suggerita un'Equazione (5) caratterizzata da un solo parametro variabile (α), per definire tale forma spettrale. L'equazione si fonda su pure basi speculative e dovrà essere verificata.

Le coordinate dei due punti ed il parametro α potranno essere definiti in funzione di magnitudo, distanza epicentrale, meccanismo di sorgente, durata o numero dei cicli significativi attesi, terreno locale. Altri fattori potranno ovviamente essere presi in considerazione. Gli spettri di progetto devono essere strumentali alle attività di progetto e verifica e con esse coerenti, non necessariamente derivati come media pesata o combinazione di spettri di risposta.

Parti di spettri di progetto con variazioni rapide di accelerazione o spostamento devono essere il più possibile evitate, in quanto difficilmente giustificabili sotto un profilo probabilistico e possibili sorgenti di rischio più elevato.

Effetti della forma spettrale sulla progettazione

La discussione relativa alla Figura 12 illustra in modo chiaro come la definizione della resistenza e la capacità deformativa da attribuire ad una struttura assumano spesso valori piuttosto casuali. È evidente che variazioni del 100% possono facilmente risultare dall'applicazione delle procedure di progetto, non è quindi assurdo domandarsi se i risultati possano affidabilmente assicurare un'adeguata sicurezza dell'ambiente costruito.

Credo che la risposta abbia due facce. Da un lato non c'è dubbio che sussistano enormi differenze nel rischio associato a strutture diverse, anche se non si può escludere che tutto quanto realizzato applicando un sistema coerente di norme sia comunque caratterizzato da un rischio inferiore ad una certa soglia. Dall'altro lato, è evidente che la resilienza, intesa come capacità di adattarsi ad azioni diverse da quelle ipotizzate in progetto senza variazioni drammatiche nella risposta, sia la caratteristica più importante per qualsiasi costruzione antisismica. Conseguentemente, è confermato che l'applicazione rigorosa di principi di gerarchia delle resistenze costituisce la misura più efficace.

Si noti che neppure l'applicazione di analisi dinamiche non lineari complete nel dominio del tempo garantisce l'uniformità del rischio, visto che gli accelerogrammi da applicare vengono derivati da forme spettrali che potrebbero avere poco fondamento ed anche quando si utilizzino accelerogrammi reali, questi vengono normalmente sottoposti a procedure di correzione e normalizzazione al fine di renderli compatibili con gli spettri di progetto, quantomeno in determinati campi di variazione del periodo.

Combinazione delle componenti orizzontali del moto

Al fine di produrre spettri coerenti e confrontabili, si suggerisce di derivare un solo segnale di accelerazione al terreno dalle due componenti registrate, combinando istante per istante i vettori di accelerazione. Il segnale risultante indicherà in ogni istante il massimo modulo di accelerazione, ruotando nella direzione appropriata. Lo spettro risultante appare coerente con il concetto di indicare il massimo valore della risposta attesa per ciascun valore di periodo e consentirà di definire univocamente i punti C e D. È evidente che la definizione di un spettro di progetto combinando le componenti non ha nulla a che vedere con la combinazione delle azioni su un edificio, che risultano dalla diversa risposta attesa in direzioni diverse (Stewart et al. (2011)).

Considerazione della risposta e definizione della capacità

Per quanto generalmente accettato di separare per quanto possibile domanda da capacità, l'effetto della diversa capacità dissipativa di strutture diverse è tuttora preferibilmente incluso nella domanda, con una correzione dello spettro.

Il fattore di riduzione della domanda di spostamento è comunque non superiore a 0.5, con una conseguente modesta sensibilità ad errori di valutazione.

Tuttavia, una migliore taratura di questo fattore è tuttavia auspicabile, in funzione di parametri del moto e della sorgente, del periodo di vibrazione considerato, della durata o del numero di cicli significativi attesi.

L'ancoraggio degli spettri di progetto a determinati valori e le regole di combinazione dei diversi casi e direzioni di carico deve essere tarata in funzione dei fattori di protezione compresi in ciascun documento normativo, in funzione delle probabilità accettate di raggiungimento di ciascun stato limite.

Mappe di pericolosità

Le mappe di pericolosità di uso corrente sono di solito espresse in funzione dell'accelerazione di picco al terreno. Ciò è fonte di errori, convinzioni errate e false interpretazioni.

Nel caso in cui si voglia ricorrere ad un singolo parametro di pericolosità è certo meglio adottare un'ordinata spettrale, per esempio l'accelerazione al punto C o lo spostamento al punto D.

Tuttavia, le mappe moderne (ed è così per quelle italiane) sono associate a grandi quantità di dati, che includono molte ordinate spettrali, o anche spettri di risposta completi per differenti valori della probabilità di superamento annua. Purtroppo, anche questi spettri possono essere fonte di errori ed interpretazioni sbagliate.

Si tratta infatti del prodotto di combinazioni pesate di diverse leggi di attenuazione, applicate a diversi meccanismi di sorgente. Come tali, questi spettri dovrebbero essere considerati come una forma di spettro di risposta medio, non confusi con spettri di progetto.

Validazione e taratura

L'ho ripetuto più volte, questa è un'opinion paper, il cui significato e la cui validità andrà provato dal confronto con i dati sperimentali disponibili e successivamente dalla sua utilità nell'ispirare formulazioni semplici atti ad interpretarne l'andamento. Il vero lavoro deve ancora venire, ed è in corso per i terremoti italiani recenti.

La registrazione di El Centro, terremoto di Imperial Valley, 18 Maggio 1940

Rimane una domanda, di natura filosofica e sapore un po' retorico.

Al di là della straordinaria ingegnosità di coloro che sono stati capaci di dare forma a spettri di risposta credibili ed utili partendo da un solo segnale registrato, forse al di là della prossima analisi dei dati recenti italiani, cosa va interpretata la registrazione di El Centro nello sviluppo dell'ingegneria sismica: un fortunato unicorno o il progenitore ancestrale che conteneva in qualche modo l'essenza di tutti i possibili moti?

Riconoscimenti

L'analisi dei dati sperimentali e la taratura e validazione di quanto qui proposto è in corso, insieme a Daniela Rodrigues e Vitor Silva, con cui le idee qui proposte sono state discusse. Questo articolo ed il suo compagno a carattere sperimentale saranno oggetto di pubblicazione a livello internazionale.

Bibliografia

- Akkar S. (2015) - Revised probabilistic hazard map of Turkey and its implications on seismic design. EU Workshop "Elaboration of Maps for Climatic and Seismic Actions for Structural Design in the Balkan region", Zagreb.
- Chopra A.K. (2007) - Elastic response spectrum; A historical note. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36:3-12.
- Fajfar P., Fishinger M. (1988) - N2 – A method for nonlinear analysis of regular buildings. *Proceedings of the 9th WCEE, Tokyo and Kyoto*, vol. V, 111-116.
- Housner G.W (1941) - Calculating response of an oscillator to arbitrary ground motion. *Bulleting of the Seismological Society of America*, 31:143-149.
- Irvine, T. <http://www.vibrationdata.com/elcentro.htm>, Vibrationdata, Madison, AL.
- Jacobsen L.S. (1960) - Damping in composite structures. *Proceedings of the 2nd WCEE, Tokyo and Kyoto*, vol. II, 1029-1044.
- Newmark N.M, Hall W.J. (1982) - *Earthquake Spectra and Design*, Engineering Monographs, EERI, Oakland, CA.
- Priestley M.J.N., Calvi G.M., Kowalsky M.J. (2007) - *Displacement Based Seismic Design of Structures*, IUSS Press, Pavia.
- Priestley M.J.N. (2003) - *Myths and fallacies in earthquake engineering*, IUSS Press, Pavia.
- Riddell, R. (2008) - Inelastic response spectrum; Early history. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 37:1175-1183.
- Shibata A., Sozen M. (1976) - Substitute structure method for seismic design in reinforced concrete. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 102:1, 1-18.
- Stewart J.P., Abrahamson N.A., Atkinson G.M., Baker J.W., Boore D.M., Bozorgnia Y., Campbell K.W., Comartin C.D., Idriss I.M., Lew M., Mehrain M., Mohele J.P., Naeim F., Sabol T.A. (2011) - Representation of bidirectional ground motions for design spectra in building codes. *Earthquake Spectra*, 27:3, 927-937.
- Tolis S.V., Faccioli F. (1999) - Displacement design spectra. *Journal of Earthquake Engineering*, 3:1, 107-125.

L'Autore

Gian Michele Calvi

Gian Michele Calvi è professore allo IUSS di Pavia e *Adjunct Professor* alla North Carolina State University.

Ha ottenuto un *Master of Science* alla *University of California, Berkeley*, un *PhD* al Politecnico di Milano e un Dottorato Honoris Causa alla *Universidad Nacional de Cuyo, Mendoza, Argentina*.

È stato il fondatore della Fondazione Eucentre e della *ROSE School*, è attualmente uno dei Direttori della *International Association of Earthquake Engineering*.

È autore di centinaia di pubblicazioni, tra cui due volumi di fama internazionale: *Seismic design and retrofit of bridges* (con M.J.N. Priestley and F. Seible, 1996) e *Displacement-Based Seismic Design of Structures* (con M.J.N. Priestley and M.J. Kowalsky, 2007).

È stato progettista consulente o collaudatore di centinaia di progetti strutturali, tra i quali il ponte strallato *Rion-Antirion* (2883 m, in Grecia), il viadotto di *Bolu* (119 campate, in Turchia) ed il sistema abitativo realizzato a l'Aquila dopo il terremoto del 2009, con 185 edifici isolati con oltre 7.000 apparecchi, completati in circa sei mesi.

È *associate editor* del *Journal of Earthquake Engineering*, è stato relatore invitato in decine di conferenze, tra le quali due *World* e quattro *European Conferences on Earthquake Engineering*.

Ha sempre lavorato ad innovare la progettazione sismica, concentrandosi inizialmente sulle strutture in muratura e sui ponti, l'isolamento e la progettazione basata sugli spostamenti negli ultimi vent'anni.