

AZIONE SISMICA E CONDIZIONI LOCALI DEL TERRENO *

Marco BOZZA **

* Il presente articolo fa riferimento alla normativa precedente all'entrata in vigore, a partire dal 2008, delle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC): OPCM 3274 del 20 marzo 2003

** Ingegnere Strutturale, già Direttore della Federazione regionale degli Ordini degli Ingegneri del Veneto (FOIV), Amministratore di ADEPRON

INTRODUZIONE

Le sollecitazioni agenti sulle strutture di fondazione sottoposte ad azioni dinamiche non sono direttamente determinabili una volta note le caratteristiche sismologiche di un terremoto. Ciò è dovuto al fatto che il comportamento di una fondazione soggetta a scuotimento tellurico dipende in larga misura dalle caratteristiche dell'azione sismica, dalle proprietà dinamiche della sovrastante struttura e dal modo come esse interagiscono. In particolare l'azione sismica di un generico sito sulla superficie terrestre è fortemente influenzata, oltre che dalla posizione relativa tra la sorgente tellurica e il sito stesso, anche dalle condizioni locali del terreno sottostante, come le proprietà morfologiche, litologiche, stratigrafiche, idrogeologiche e geotecniche dei terreni attraversati dalle onde sismiche durante il percorso di propagazione. Le condizioni locali di un terreno definiscono, in particolare, la sua suscettibilità a fenomeni di *amplificazione dinamica locale*. Per l'analisi dell'amplificazione locale è necessario valutare il costipamento dinamico dei terreni prevalentemente sabbiosi non interessati da falda o parzialmente saturi, la generazione e dissipazione di sovrappressioni neutre nei terreni granulari e/o coesivi, la degradazione dei parametri elastici iniziali del terreno e la liquefazione dinamica dei terreni granulari.

Le oscillazioni cicliche indotte dalla propagazione delle onde sismiche attraverso il terreno hanno infatti l'effetto di modificarne le caratteristiche. Queste modifiche possono riguardare aspetti tra loro molto diversi, ed essere all'origine di pericolose conseguenze per le strutture coinvolte. In particolare queste alterazioni possono interessare variazioni della capacità portante e della deformabilità, dar luogo a incrementi di spinta sulle opere di sostegno, ovvero causare veri e propri fenomeni di instabilità particolarmente pericolosi nei terreni suscettibili di liquefazione o posti in pendio.

Capacità portante e deformabilità

Le rocce lapidee in genere non subiscono variazioni apprezzabili, eccetto che per formazioni molto fessurate e alterate nelle quali i fenomeni vibratorii possono favorire l'insorgere di superfici di rottura. I terreni coesivi manifestano alterazioni costitutive che frequentemente determinano una diminuzione della resistenza. I cedimenti causati dall'incremento di deformabilità sono comunque molto modesti. I terreni non coesivi sono i più suscettibili a subire alterazioni di rilievo. Se sono poco addensati possono venire compattati dalle azioni cicliche del terremoto, dando luogo a cedimenti spesso importanti.

IMPORTANZA DELLO SPETTRO DI RISPOSTA

L'accelerazione, la velocità e lo spostamento massimi al suolo, nonché il tempo rappresentativo della loro durata, pur essendo importanti caratteristiche, non possono da soli descrivere l'intensità e gli effetti di danneggiamento connessi all'evento sismico. L'effetto combinato dell'ampiezza dell'accelerazione, del contenuto di frequenze e della durata può essere convenientemente descritto attraverso lo *spettro di risposta elastico*. Si ricorda che lo spettro di risposta elastico $S_e(T)$ è un diagramma che fornisce, al variare del periodo T , il valore massimo della pseudo-accelerazione dell'oscillatore elementare soggetto all'azione del sisma, per un fissato valore del rapporto di smorzamento ξ . Attraverso elaborazioni statistiche degli spettri normalizzati è possibile ottenere la risposta dello strato di terreno entro una vasta gamma di frequenze imposte e poi successivamente normalizzare e trattare statisticamente gli spettri ottenuti, al fine di pervenire ad uno spettro comprensivo di tutte le possibili frequenze predominanti.

L'importanza dello spettro di risposta risiede nel fatto che esso consente di valutare il ruolo esercitato dalla natura del sito sulla risposta del terreno libero, in quanto la forma stessa dello spettro di risposta tiene implicitamente conto sia della attenuazione delle onde sismiche in relazione alla distanza dall'epicentro, sia della risposta locale legata alle proprietà dinamiche del sito. Ciò consente di eseguire analisi di dettaglio dei fenomeni di amplificazione che si verificano in un sito durante il trasferimento di energia dalla roccia base alla superficie delle coperture sciolte. Queste analisi vengono generalmente eseguite per studi di microzonazione sismica o per particolari problemi di interazione dinamica terreno-struttura, a cui peraltro è collegato il danno alle strutture.

L'adozione poi di uno spettro di progetto basato su uno spettro di risposta elastico ridotto mediante il *coefficiente di struttura* q consente, nell'ambito di analisi strutturali di tipo elastico, di tenere implicitamente conto della capacità di dissipazione di energia della struttura legata alla plasticizzazione degli elementi strutturali.

Prescrizioni delle normative sismiche

Si può pertanto concludere, che l'assunzione di un certo "terremoto di progetto" non può prescindere dal considerare le caratteristiche stratigrafiche del terreno di fondazione e del comportamento dinamico dell'elemento di volume di ogni strato significativo di terreno. È per questo motivo che la rappresentazione base dell'azione sismica nelle norme a livello europeo (Eurocodice 8, EC8) e nazionale (Ordinanza PCM 3274) è specificata adottando lo spettro di risposta definito in funzione del profilo stratigrafico del sottosuolo del sito.

Sulla base della struttura dello spettro adottati le singole autorità nazionali possono emanare delle direttive sulla entità dei parametri da assumere per definire la forma degli spettri in relazione al tipo di suolo da considerare. Una volta calcolata l'entità dell'accelerazione di picco attesa nel sito, risulta possibile definire le ordinate dello spettro elastico di calcolo. La moderna struttura di tali norme sismiche, pertanto, risulta particolarmente utile nel caso in cui si voglia eseguire un'analisi di dettaglio dei fenomeni di amplificazione che si verificano in un sito durante il trasferimento di energia dalla roccia base alla superficie delle coperture sciolte. Tali analisi vengono generalmente condotte per gli studi di microzonazione sismica o per particolari problemi di interazione dinamica terreno-struttura.

EUROCODICE 8

Tale approccio trova piena rispondenza con quanto previsto dall'EC8. Per valutare il ruolo esercitato dalla natura del sito sulla risposta sismica del terreno l'EC8 definisce l'azione sismica introducendo lo spettro di risposta elastico normalizzato in termini di accelerazione al suolo.

Classi di suolo

L'influenza delle caratteristiche locali del terreno sul valore dell'azione sismica è generalmente tenuta in conto considerando tre classi di appartenenza per il sottosuolo, dette A, B e C, definite sulla base dei differenti profili stratigrafici (Tabella 1):

Sottosuolo di tipo A	<i>roccia o altra formazione geologica caratterizzata da una velocità di propagazione delle onde di taglio, V_S pari almeno a 800 m/s, includendo al massimo uno strato superficiale di materiale a più debole consistenza di 5 m.</i>
Sottosuolo di tipo B	<i>depositi profondi di sabbie mediamente addensate, ghiaia e argille mediamente rigide con spessori che vanno dalle diverse decine di metri alle molte centinaia, caratterizzati da valori minimi della V_S che vanno da 200 m/s ad una profondità di 10 m, fino a 350 m/s a 50 m.</i>
Sottosuolo di tipo C	<i>depositi privi di coesione con o senza qualche morbido strato coesivo, caratterizzati da valori di V_S sotto ai 200 m/s nei primi 20 m e depositi di terreni coesivi caratterizzati da rigidità basse/medie e con valori di V_S sotto ai 200 m/s nei primi 20 m.</i>

Tabella 1

Si ricorda che nell'ipotesi di propagazione monodimensionale delle onde di taglio (onde S) in un mezzo elastico omogeneo isotropo si ha che $V_S=(G/\rho)^{1/2}$, con G modulo di elasticità tangenziale del terreno e ρ densità del terreno.

Spettro di risposta elastico

Per ogni tipo di suolo vengono definiti i parametri che caratterizzano, per un dato valore di progetto a_g dell'accelerazione del terreno per il periodo di ritorno di riferimento (accelerazione di picco) e di ξ , lo spettro di risposta elastico $S_e(T)$ per quel suolo.

La struttura analitica dello spettro è la seguente:

$$\begin{aligned}
 (1) \quad 0 \leq T \leq T_B & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot \beta_0 - 1) \right] \\
 (2) \quad T_B \leq T \leq T_C & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \\
 (3) \quad T_C \leq T \leq T_D & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right]^{k_1} \\
 (4) \quad T \geq T_D & \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot \beta_0 \cdot \left[\frac{T_C}{T_D} \right]^{k_1} \cdot \left[\frac{T_D}{T} \right]^{k_2}
 \end{aligned}$$

essendo:

- $S_e(T)$ = ordinata dello spettro di risposta elastico;
 a_g = accelerazione di picco in un terreno roccioso (valore di progetto dell'accelerazione del terreno);
 S = parametro che caratterizza il profilo stratigrafico del suolo di fondazione;
 η = $(7/(2+\xi))^{1/2} \geq 0,7$ = fattore correttivo dello smorzamento;
 ξ = rapporto di smorzamento viscoso espresso in percentuale;
 T = periodo di vibrazione in secondi dell'oscillatore lineare semplice;
 β_0 = fattore di amplificazione dell'accelerazione dello spettro per $\xi = 0,05$;
 T_B, T_C, T_D = parametri che determinano la forma dello spettro in relazione al tipo di suolo;
 k_1, k_2 = esponenti che definiscono lo spettro di risposta per periodi di vibrazione superiori a T_C e T_D ;

In Figura 1 è riportato l'andamento qualitativo di uno spettro di risposta generico.

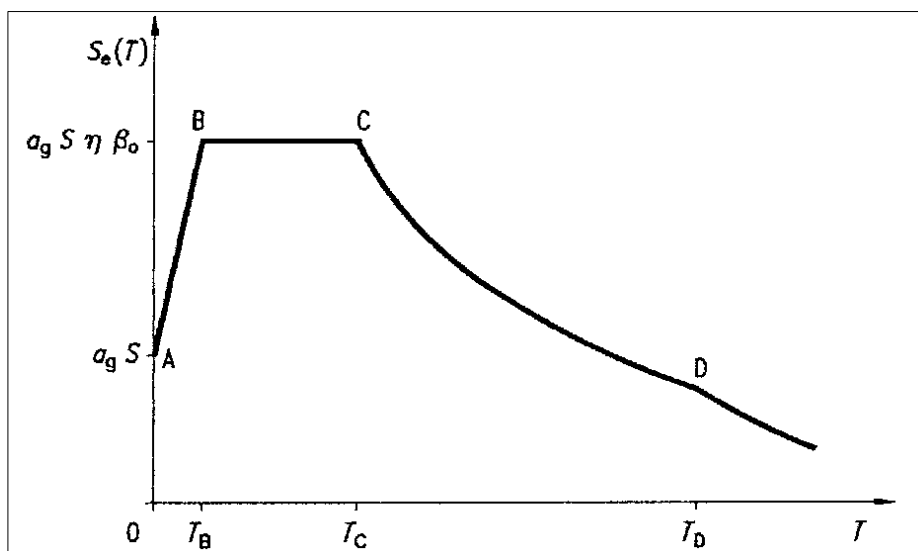


Figura 1

I parametri $S, \beta_0, k_1, k_2, T_B, T_C, T_D$, sono riportati, in funzione della classe del suolo, nella Tabella 2.

Classe	S	β_0	k_1	k_2	T_B [s]	T_C [s]	T_D [s]
A	1,0	2,5	1,0	2,0	0,10	0,40	3,00
B	1,0	2,5	1,0	2,0	0,15	0,60	3,00
C	0,9	2,5	1,0	2,0	0,20	0,80	3,00

Tabella 2

Non esistendo una procedura specifica per determinare il valore di a_g in funzione delle caratteristiche di moto del terreno, in genere esso corrisponde al valore di picco dell'accelerazione che si manifesta in terreni compatti di moderata o alta magnitudo, e che si verificano a distanza dal sito da media ad elevata. Una volta calcolata l'entità dell'accelerazione di picco attesa nel sito (peraltro specificata dall'autorità nazionale per ogni zona sismica) risulta possibile definire le ordinate dello spettro di risposta elastico da utilizzare nella progettazione.

L'EC8 fornisce dunque uno spettro per terreni rocciosi, che può servire ad eccitare la base di un modello deformabile di coperture sciolte allo scopo di determinarne la risposta in superficie sempre in termini di spettri elastici.

In genere per convenienza di soluzione, la dissipazione di energia viene messa in conto considerando un rapporto di smorzamento viscoso con valori dell'ordine del 5% dello smorzamento critico. Nel caso si ritenesse opportuno variare tale valore, l'EC8 prevede che le ordinate spettrali possano essere legate allo smorzamento moltiplicando l'ordinata spettrale per il fattore di correzione dello smorzamento η definito in precedenza.

ORDINANZA PCM 3274

La dipendenza dello spettro di progetto dalle condizioni locali del terreno è stata adottata anche dall'Ordinanza PCM 3274, che di fatto recepisce le direttive indicate dall'EC8, anche se con sostanziali differenze per quanto riguarda la definizione delle categorie di suolo di fondazione.

Categorie di suolo

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto le tipologie del suolo di fondazione vengono suddivise in due gruppi: il primo gruppo è definito da 5 categorie (A, B, C, D, E) di profili stratigrafici, mentre il secondo gruppo comprende 2 categorie (S1, S2) per le quali sono richiesti studi speciali (Tabella 3).

A	<i>Formazioni litoidi o suolo omogenei molto rigidi caratterizzati da valori di V_{S30} superiori a 800 m/s, comprendenti eventuali strati di alterazione superficiale di spessore massimo pari a 5 m.</i>
B	<i>Depositi di sabbie o ghiaie molto addensate o argille molto consistenti, con spessore di diverse decine di metri, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{S30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero con $N_{SPT} > 50$, o $c_u > 250$ kPa).</i>
C	<i>Depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate, o di argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di V_{S30} compresi tra 180 m/s 360 m/s (ovvero con $15 < N_{SPT} < 50$, o $70 < c_u < 250$ kPa).</i>
D	<i>Depositi di terreni granulari da sciolti a poco addensati oppure coesivi da poco a mediamente consistenti, caratterizzati da valori di $V_{S30} < 180$ m/s (ovvero con $N_{SPT} < 15$, o $c_u < 70$ kPa).</i>
E	<i>Profili di terreno costituiti da strati superficiali alluvionali, caratterizzati da valori di V_{S30} simili a quelli dei tipi C o D e spessore compreso tra 5 m e 20 m, giacenti su di un substrato di materiale più rigido con $V_{S30} > 800$ m/s.</i>
S1	<i>Depositi costituiti da, o che includono, uno strato spesso almeno 10 m di argille/limi di bassa consistenza, con elevato indice di plasticità ($PI > 40$) e contenuto d'acqua, caratterizzati da valori di $V_{S30} < 100$ m/s (ovvero con $10 < c_u < 20$ kPa).</i>
S2	<i>Depositi di terreni soggetti a liquefazione, di argille sensitive, o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi presedenti.</i>

Tabella 3

I terreni classificati nelle categorie elencate sono caratterizzati da parametri sismici (V_{S30} , velocità media di propagazione delle onde di taglio entro 30 m di profondità) e da parametri geotecnici (N_{SPT} , Standard Penetration Test e c_u , coesione non drenata).

Spettro di risposta elastico

Lo spettro di risposta elastico è costituito da una forma spettrale (spettro normalizzato), considerata indipendente dal livello di sismicità, moltiplicata per il valore dell'accelerazione massima ($a_g S$) del terreno che caratterizza il sito. Si riporta di seguito lo spettro di risposta elastico della componente orizzontale:

$$(5) \quad 0 \leq T \leq T_B \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \left[1 + \frac{T}{T_B} \cdot (\eta \cdot 2,5 - 1) \right]$$

$$(6) \quad T_B \leq T \leq T_C \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5$$

$$(7) \quad T_C \leq T \leq T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[\frac{T_C}{T} \right]$$

$$(8) \quad T \geq T_D \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot 2,5 \cdot \left[\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right]$$

essendo:

- $S_e(T)$ = ordinata dello spettro di risposta elastico;
- a_g = accelerazione di picco in un terreno roccioso (valore di progetto dell'accelerazione del terreno);
- S = parametro che caratterizza il profilo stratigrafico del suolo di fondazione;
- η = $(10/(5+\xi))^{1/2} \geq 0,55$ = fattore correttivo dello smorzamento;
- ξ = rapporto di smorzamento viscoso espresso in percentuale;
- T = periodo di vibrazione in secondi dell'oscillatore lineare semplice;
- T_B, T_C, T_D = parametri che determinano la forma dello spettro in relazione al tipo di suolo.

I parametri S, T_B, T_C, T_D , sono riportati, in funzione della categoria di suolo, nella Tabella 4.

Categoria	S	T_B [s]	T_C [s]	T_D [s]
A	1,00	0,15	0,40	2,00
B C E	1,25	0,15	0,50	2,00
D	1,35	0,20	0,80	2,00

Tabella 4

L'Ordinanza PCM 3274 specifica che nei casi in cui non si possa valutare adeguatamente l'appartenenza del profilo stratigrafico del suolo di fondazione ad una delle categorie elencate, ed escludendo comunque i profili S1 e S2, si deve adottare in generale la categoria D o, in caso di incertezza di attribuzione tra due categorie, la condizione più cautelativa.