

CRITERI DI PROGETTAZIONE SISMICA DELLE OPERE DI SOSTEGNO

Marco BOZZA *

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

ASPETTI GENERALI

Le azioni dinamiche generate dal verificarsi di un evento sismico determinano una sensibile alterazione dello stato di sforzo del terreno e ne influenzano le caratteristiche di deformabilità e resistenza in misura significativa, come è ampiamente dimostrato dalla vasta produzione scientifica sul tema del comportamento dei terreni sottoposti a carichi ciclici e dinamici. È pertanto evidente che gli effetti indotti dal sisma assumano estrema rilevanza nei problemi di interazione tra il terreno e le opere di ingegneria civile in generale e nello studio delle opere geotecniche in particolare.

Tra queste ultime le opere di sostegno dei terreni occupano un posto singolare per la loro ampia diffusione sul territorio e per la specifica funzione nel settore delle infrastrutture di trasporto che conferisce a tali opere una importanza strategica di prim'ordine ai fini di un'eventuale emergenza post-sismica.

I criteri per la progettazione sismica delle opere di sostegno dei terreni in zone sismiche sono ispirati sia ai noti modelli di calcolo basati sulla risultante delle pressioni del terreno sulle strutture, validi in condizioni puramente statiche, (*teoria di Coulomb* e sue estensioni), sia a modelli che valutano la spinta attiva basati su soluzioni pseudo-statiche (*teoria di Mononobe-Okabe* e sue estensioni).

Tipologie strutturali

Secondo l'Eurocodice 7 (EC7) un materiale si considera sostenuto allorché viene trattenuto ad una pendenza maggiore di quella che avrebbe assunto, se non fosse stata realizzata alcuna struttura. Le strutture di sostegno comprendono tutti i tipi di muri ed i sistemi di sostegno i cui elementi strutturali interagiscono con il terreno o con la roccia. Nell'EC7 le opere di sostegno, definite come le strutture di contenimento del terreno, di materiali simili o di acqua, sono suddivise in tre categorie (Tabella 1):

Muri a gravità	<i>sono muri di pietra o di calcestruzzo o di calcestruzzo armato che hanno fondazione piana con o senza dente, con o senza contrafforti e rinforzi orizzontali. Il peso del muro stesso, che a volte comprende una porzione stabilizzante di terreno o roccia, riveste un ruolo di primo piano ai fini del sostegno. Esempi di questo tipo di strutture sono: muri a gravità di calcestruzzo a spessore costante o variabile, i muri a mensola di calcestruzzo armato con fondazioni superficiali, i muri a contrafforte, ecc.</i>
Paratie	<i>sono pareti relativamente sottili di acciaio, calcestruzzo armato o legno, sostenute da ancoraggi, puntoni e/o dalla spinta passiva del terreno. La funzione di sostegno è influenzata in misura significativa dalla resistenza a flessione di tali strutture, mentre il loro peso ha un ruolo ininfluente. Esempi di questo tipo di strutture sono: paratie metalliche a sbalzo, le paratie metalliche o di calcestruzzo ancorate o puntionate, i diaframmi di calcestruzzo, ecc.</i>
Strutture composite	<i>sono quelle strutture composte da elementi delle due precedenti categorie. Esiste una grande varietà di strutture di questo tipo. Esempi di questo tipo di strutture sono: i cassoni formati da un doppio ordine di palancolate, le strutture di terra rinforzate da tiranti, geotessili o iniezioni, le strutture con serie multiple di ancoraggi o chiodature, ecc.</i>

Tabella 1

DEFINIZIONE DELL'AZIONE SISMICA

La risposta esibita all'azione sismica di siti differenti è funzione dell'intensità del terremoto, della distanza del sito dalla sorgente del terremoto, delle formazioni geologiche attraversate dalle onde di volume lungo il percorso di propagazione dalla sorgente al sito e degli effetti locali prevalentemente legati alle caratteristiche meccaniche dei terreni nel sito considerato.

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 2):

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 rigidezze basse/medie e con valori di V_S sotto ai 200 m/s nei primi 20 m.</i>

Tabella 2

In funzione della stratigrafia di massima del sito considerato l'Eurocodice 8 (EC8) definisce tre spettri di progetto in termini di pseudo-accelerazione. In Figura 1 è riportato l'andamento qualitativo di uno di questi spettri di risposta.

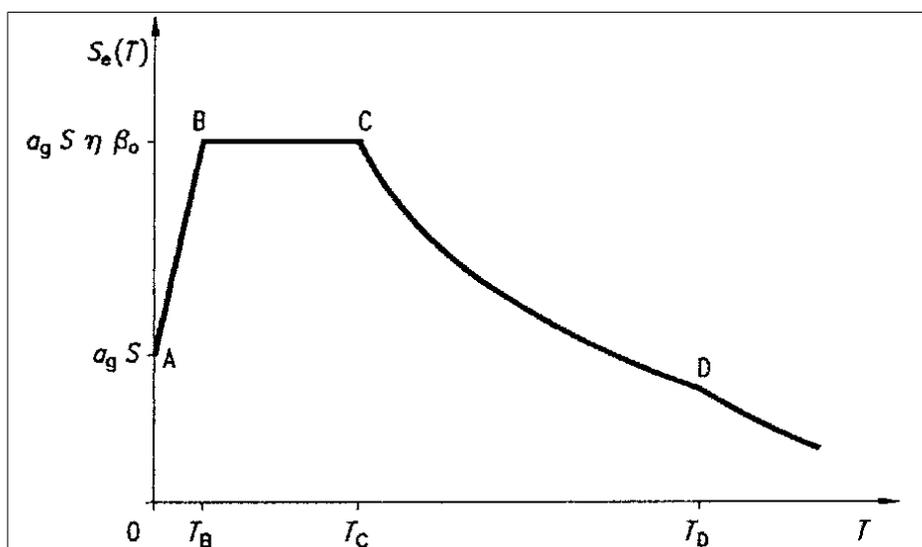


Figura 1

PROGETTAZIONE: REQUISITI E CRITERI GENERALI SECONDO L'EC8

Requisiti generali di progetto

Secondo quanto riportato nell'EC8, le opere di sostegno devono essere concepite e progettate in modo tale da espletare la loro funzione sia durante che dopo il terremoto di progetto, senza subire danni strutturali significativi. Possono essere ammessi eventuali spostamenti permanenti, sotto forma di scorrimento combinato a rotazione, causati da deformazioni irreversibili del terreno di fondazione, a patto che tali spostamenti siano compatibili con i requisiti funzionali e/o estetici della struttura.

Criteri generali di progetto

La scelta del tipo strutturale deve essere di solito basata sulle condizioni di esercizio, seguendo i principi generali dell'EC7, prestando opportuna attenzione al fatto che il soddisfacimento degli ulteriori requisiti richiesti dalla progettazione sismica può condurre al miglioramento del tipo strutturale, e talora ad una sua scelta più appropriata. Il materiale di riporto dietro la struttura deve avere granulometria scrupolosamente controllata ed essere addensato in sito, in modo da ottenere la maggiore continuità possibile con la massa di terreno esistente, mentre i sistemi di drenaggio dietro la struttura devono essere in grado di assorbire movimenti transitori e permanenti, senza che venga pregiudicata la loro funzione. In particolare, nel caso di terreni non coesivi in presenza di acqua, il drenaggio dovrebbe risultare efficace fino ad una profondità ben maggiore di quella della superficie potenziale di rottura dietro l'opera di sostegno. Infine si deve assicurare che, sotto il terremoto di progetto, il terrapieno non giunga ad una condizione prossima a quella di liquefazione.

PROGETTAZIONE: METODI E ASPETTI DELLA MODELLAZIONE

Calcolo della spinta attiva

Alla base delle tradizionali procedure di calcolo della spinta esercitata dal terreno sulle opere di sostegno risiede il *Metodo dell'Equilibrio Limite (MEL)*, che costituisce una semplificazione del *Metodo delle Curve Caratteristiche* sviluppato da V.V. Sokolovskii, ed è stato ampiamente utilizzato nella meccanica dei terreni per la determinazione di soluzioni approssimate nei problemi di stabilità.

Secondo il MEL (*metodo pseudo-statico*), ipotizzando che il terreno si trovi in condizioni di rottura per una prefissata forma della superficie di scorrimento, si ricerca la posizione di tale superficie che risulta più gravosa ai fini dell'equilibrio del sistema costituito dal terreno e dall'opera. In particolare il modello di calcolo si basa sulla ricerca della inclinazione della superficie piana di rottura del terrapieno a tergo del muro che rende massima la spinta in condizioni attive, tenendo conto della presenza delle azioni dovute al sisma.

Tale spinta viene valutata mediante la teoria di Mononobe-Okabe sviluppata in Giappone nella seconda metà degli anni Venti in seguito ad alcuni terremoti disastrosi. I risultati fondamentali di questa teoria sono universalmente noti e, con piccole variazioni ed adattamenti, sono stati recepiti dalle normative antisismiche di numerosi paesi.

Interazione dinamica terreno-struttura

Una accurata definizione delle azioni esterne e delle condizioni al contorno, specifiche per ciascun caso reale, costituisce un passo imprescindibile per una corretta progettazione delle opere di sostegno. In tal senso, è necessario intendere per opera di sostegno il complesso struttura-terreno e tener conto delle azioni derivanti dalla presenza del terreno, dell'acqua, di eventuali sovraccarichi e di una eccitazione sismica di progetto, traducendone gli effetti in una spinta applicata a tergo del muro.

Attualmente, mediante l'uso di codici ad elementi finiti, è possibile, per la determinazione degli spostamenti indotti dalle azioni sismiche sulle opere di sostegno, utilizzare modelli di calcolo in grado di considerare il problema dell'interazione dinamica terreno-struttura. Utilizzando un qualsiasi metodo di analisi basato sui procedimenti della dinamica dei terreni e delle strutture, nella progettazione delle opere di sostegno devono essere tenuti appropriatamente in conto i seguenti aspetti:

- *il comportamento generalmente non-lineare del terreno durante l'interazione dinamica con l'opera di sostegno;*
- *gli effetti inerziali associati alla massa del terreno e della struttura e a tutti gli altri carichi di gravità che possono partecipare al processo di interazione;*
- *gli effetti idrodinamici generati dalla presenza di acqua nel terrapieno e/o dalla presenza di acqua sulla parete esterna del muro;*
- *la compatibilità tra le deformazioni del terreno, del muro e dei tiranti, se presenti.*

VERIFICHE CON IL METODO DEGLI STATI LIMITE

Il raggiungimento di uno stato limite può essere provocato dall'intervento concomitante di vari fattori di carattere aleatorio derivanti dalle incertezze relative alle resistenze dei materiali impiegati, alla intensità delle azioni ed alla probabilità della loro contemporanea presenza. Le verifiche sono finalizzate a mantenere la probabilità di raggiungimento dello stato limite considerato entro il valore prefissato. Come è noto, il Metodo degli Stati Limite (MSL) consiste nella introduzione, per tutte le grandezze che presentano un carattere aleatorio e, in modo particolare, per le azioni e le resistenze, dei cosiddetti *valori caratteristici*, e nella trasformazione di questi ultimi in *valori di progetto* mediante l'applicazione dei coefficienti parziali.

Il valore caratteristico di una grandezza è definito come il frattile di ordine 0,95 ovvero quello di ordine 0,05 della distribuzione statistica dei valori della grandezza considerata. Specificatamente, si fa riferimento al frattile di ordine 0,95 o a quello di ordine 0,05 a seconda che i valori rilevanti ai fini della sicurezza siano quelli più elevati o quelli più bassi. I valori di progetto si ottengono dai corrispondenti valori caratteristici moltiplicandoli, nel caso delle azioni, o dividendoli, nel caso delle resistenze, per i coefficienti parziali.

Coefficienti parziali

Per le grandezze di interesse nella progettazione geotecnica i valori dei coefficienti parziali sono riportati nella Tabella 3, relativamente ai tre casi A, B e C riportati nella *ENV 1991-1, Eurocodice 1 Basi di calcolo, prospetto 9.2*:

Caso A: *perdita di equilibrio statico; sollecitazione dei materiali strutturali o suolo non resistente;*

Caso B: *rottura di strutture o di elementi strutturali, dipendente dalla resistenza dei materiali strutturali;*

Caso C: *rottura del terreno.*

Caso	AZIONI			PROPRIETÀ DEL TERRENO			
	Permanenti		Variabili	tan φ	c'	c _u	q _u
	Sfavorevoli	Favorevoli	Sfavorevoli				
A	1,00	0,95	1,50	1,10	1,30	1,20	1,20
B	1,35	1,00	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00
C	1,00	1,00	1,30	1,25	1,60	1,40	1,40

Tabella 3

Nella Tabella 3 q_u è la resistenza a compressione del terreno o della roccia. Secondo l'EC7 i valori dei coefficienti parziali per le azioni permanenti e variabili riportati nella tabella devono essere utilizzati, in genere, per verificare gli stati limite ultimi di strutture e fondazioni di tipo convenzionale in situazioni permanenti e in situazioni transitorie. Valori più cautelativi devono essere presi in considerazione per i casi di rischio eccezionalmente elevato o di condizioni di terreno o di carico non usuali o eccezionalmente difficili. Valori meno cautelativi possono essere utilizzati per strutture temporanee o situazioni transitorie, laddove ciò possa essere giustificato dalla entità delle possibili conseguenze.

Verifica degli stati limite

Per quanto riguarda le verifiche degli stati limite, L'EC7 impone che:

1) tutti i tipi di strutture di sostegno devono essere considerati almeno i seguenti stati limite:

- *instabilità globale;*
- *rottura di un elemento strutturale - muro, ancoraggio, traverso o puntone – oppure rottura della connessione tra tali elementi;*
- *rottura del terreno e degli elementi strutturali;*
- *movimenti della struttura di sostegno che possono produrre il collasso, oppure modifiche dell'aspetto o effetti negativi sull'efficienza della struttura, di strutture adiacenti o anche dei sottoservizi interagenti con la struttura stessa;*
- *infiltrazioni inammissibili attraverso il muro o al di sotto di esso;*
- *trasporto di particelle di terreno attraverso o al di sotto del muro, ritenuto inammissibile;*
- *modifica inaccettabile del regime delle acque sotterranee.*

2) devono essere presi in considerazione i seguenti stati limite per le strutture di sostegno a gravità e per quelle miste:

- *rottura per carico limite del terreno al di sotto della fondazione;*
- *rottura per scorrimento della fondazione;*
- *rottura per ribaltamento del muro.*

3) per le paratie si devono, invece, considerare:

- *rottura per rotazione o traslazione della paratia o di parti di essa;*
- *rottura per traslazione verticale della parete.*

Per tutti i tipi di strutture di sostegno deve essere considerata, inoltre, la possibilità di combinazioni dei suddetti stati limite.