

VERIFICHE DI STABILITÀ DELLE OPERE DI SOSTEGNO IN ZONA SISMICA *

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): D.M. 11 marzo 1988, D.M. 16 gennaio 1996, OPCM 3274 del 20 marzo 2003

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

INTRODUZIONE

Secondo l'Ordinanza PCM 3274 per la verifica di sicurezza di un'opera di sostegno soggetta a terremoto può essere adottato qualunque metodo consolidato della dinamica strutturale e dei terreni, comprovato dall'esperienza o da osservazioni sperimentali. In particolare questi metodi devono considerare, tra i principali fattori che maggiormente caratterizzano il comportamento dinamico di tali strutture in condizioni sismiche, anche il comportamento non lineare del terreno, gli effetti inerziali, gli effetti idrodinamici in presenza d'acqua e la compatibilità delle deformazioni di terreno, opera e tiranti (ove presenti).

Ai fini delle verifiche, le azioni sulle opere di sostegno devono essere calcolate in modo da pervenire alle condizioni più sfavorevoli per l'equilibrio del muro e le spinte devono essere valutate sulla base di considerazioni riguardanti gli spostamenti relativi che l'opera di sostegno può subire rispetto al terreno, compatibilmente con le condizioni di vincolo. Le verifiche di stabilità da eseguire per i muri di sostegno sono:

- verifica alla traslazione sul piano di posa;
- verifica al ribaltamento;
- verifica al carico limite dell'insieme fondazione-terreno;
- verifica di stabilità globale.

VERIFICA ALLA TRASLAZIONE SUL PIANO DI POSA

Le azioni agenti previste sul sistema struttura-terreno possono essere classificate in due categorie: *azioni instabilizzanti* e *azioni stabilizzanti*.

Le azioni instabilizzanti sono le:

- azioni dovute al terreno;
- azioni dovute all'acqua;
- azioni dovute agli eventuali sovraccarichi;
- azioni derivanti dall'inerzia del terrapieno;
- azioni derivanti dall'inerzia del muro.

Le azioni stabilizzanti sono rappresentate dalla:

- reazione che per attrito si attiva all'interfaccia tra la base del muro ed il terreno di fondazione;
- reazione fornita dal terreno antistante il muro che si oppone alla traslazione.

Con la verifica alla traslazione sul piano di posa si impone l'equilibrio alla traslazione orizzontale tra tutte le azioni instabilizzanti e resistenti che intervengono nel problema, richiedendo che l'equilibrio sia soddisfatto con un fattore di sicurezza alla traslazione.

Secondo il D.M. 11.03.88 tale fattore di sicurezza, definito come il rapporto tra la risultante delle azioni resistenti e quella delle forze instabilizzanti, dev'essere non inferiore a 1,3. La forza di resistenza ad attrito viene calcolata moltiplicando la risultante delle forze verticali agenti sul muro per $\tan(\varphi_b)$, in cui φ_b è l'angolo d'attrito che caratterizza il contatto tra la fondazione del muro ed il terreno, che in generale viene assunto coincidente con l'angolo di resistenza al taglio del terreno.

Per quanto riguarda la resistenza esplicata dal terreno antistante il muro, secondo il D.M. 11.03.88 è possibile tenerne conto "solo in casi particolari, da giustificare con considerazioni relative alle caratteristiche meccaniche dei terreni ed ai criteri costruttivi del muro"; in ogni caso il suo modulo, anch'esso funzione dello spostamento sperimentato dal muro di sostegno, è fissato in misura non superiore al 50% della spinta passiva.

A questo proposito è importante precisare che secondo il Commentario al D.M. 16.01.1996 tali prescrizioni mettono in evidenza lo spirito estremamente cautelativo che le informa.

Ciò è dovuto al fatto che casi di collasso documentati e alcuni risultati sperimentali mostrano che la presenza di un riempimento di valle, seppure di altezza molto limitata rispetto all'altezza totale del muro, costituisce un vincolo efficace alla traslazione e fa sì che l'eventuale meccanismo di rottura in condizioni dinamiche si inneschi per rotazione intorno ad un punto posto ad una quota superiore rispetto alla base del muro. Perché le condizioni attive siano mobilitate è necessario che il muro subisca uno spostamento di una certa entità che nel caso di muri flessibili viene sperimentato mediante una deformazione flessionale dell'elemento strutturale, nel caso di muri a gravità si verifica per traslazione o rotazione rigida.

Inoltre, a parità di condizioni, poiché l'ampiezza dello spostamento in grado di mobilitare la resistenza passiva è notevolmente maggiore di quella relativa allo spostamento che innesca la condizione limite attiva, secondo quanto riportato nel Commentario è necessario tener conto che l'altezza del rinterro è, in generale, modesta e che sebbene non si siano riscontrati sperimentalmente casi di formazione del cuneo di rottura passivo è lecito supporre che la riduzione della resistenza al 50% del valore limite sia ampiamente conservativa.

L'Eurocodice 8, come la normativa italiana, si limita ad indicare il metodo di calcolo di Mononobe-Okabe (metodo pseudo-statico) per la valutazione della spinta del terrapieno, supponendo che il cuneo di terreno a tergo del muro sia in condizioni di equilibrio limite attivo.

VERIFICA AL RIBALTAMENTO

La *verifica al ribaltamento* viene correntemente eseguita valutando i momenti generati da tutte le forze, instabilizzanti e stabilizzanti, rispetto al piede del muro. Secondo il D.M. 11.03.88 il fattore di sicurezza al ribaltamento, definito come il rapporto tra il momento resistente totale ed il momento instabilizzante totale, deve risultare non inferiore a 1,5. Nella valutazione del fattore di sicurezza è tuttavia possibile seguire due differenti criteri, a seconda di come vengono introdotti i momenti dovuti alle componenti verticali della spinta statica, dell'incremento dinamico della spinta e della forza d'inerzia del muro. Infatti tali momenti possono essere sommati al termine dei momenti resistenti, fornendo in tal modo un risultato a vantaggio di sicurezza, oppure, più rigorosamente, possono essere detratti dal termine dei momenti instabilizzanti.

VERIFICA AL CARICO LIMITE DELL'INSIEME FONDAZIONE-TERRENO

La *verifica al carico limite dell'insieme fondazione-terreno* è finalizzata a garantire che le azioni trasmesse dall'opera di sostegno al terreno di fondazione non superino il carico limite che esso può tollerare. Al fine di cautelarsi dal raggiungimento della condizione di rottura del terreno il D.M. 16.01.1996 prescrive che il coefficiente di sicurezza, definito come il rapporto tra il carico limite ed il carico di esercizio, sia non inferiore a 2.

Particolare attenzione deve essere posta nel calcolo dei fattori che tengono conto della inclinazione e della eccentricità della risultante delle forze trasmesse dal muro al terreno di fondazione, poiché questi risultano determinanti ai fini di una corretta valutazione del carico limite delle fondazioni superficiali. Il D.M. 16.01.1996 prescrive di valutare le condizioni di stabilità del complesso opera-pendio in presenza delle azioni sismiche, lasciando ampia libertà operativa al progettista e rimandando genericamente al D.M. 11.03.88.

VERIFICA DI STABILITÀ GLOBALE

La *verifica di stabilità globale* è volta a garantire la stabilità del complesso muro-terreno nei confronti di fenomeni di scorrimento profondo e va effettuata ricorrendo ai noti metodi di calcolo della stabilità dei pendii, anch'essi basati sul concetto di equilibrio limite (per esempio i metodi di Bishop, Janbu, Bell, e di Morgenstern-Price).

Secondo questi metodi è necessario ipotizzare una superficie di scorrimento del terreno di forma qualsiasi (per semplificare il problema la superficie di scorrimento viene generalmente assunta di forma circolare), passante al di sotto del muro e valutare, rispetto ad un generico polo, i momenti instabilizzanti generati dalle forze peso ed i momenti resistenti generati dalle reazioni del terreno. Il rapporto tra il momento stabilizzante totale e quello instabilizzante fornisce il coefficiente di sicurezza. Il procedimento di calcolo va ripetuto per diverse potenziali superfici di scorrimento per determinare il valore minimo del coefficiente di sicurezza che, secondo il D.M. 11.03.88, non deve essere inferiore ad 1,3.