

ASPETTI GENERALI DEL PROGETTO DELLE FONDAZIONI SOGGETTE AD AZIONE SISMICA

Marco BOZZA *

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

PROBLEMATICHE GENERALI

Il progetto strutturale delle fondazioni costituisce un aspetto fondamentale e delicato nell'iter progettuale delle costruzioni in zona sismica. Le fondazioni infatti rappresentano la *zona di transizione* tra il suolo, sollecitato dinamicamente dal sisma, e la struttura in elevazione. In generale, tenuto conto delle forze trasmesse dalla sovrastruttura al terreno e delle deformazioni permanenti del terreno indotte dal sisma, esse dovranno essere concepite, progettate e realizzate in modo da limitare i rischi legati all'incertezza della risposta sismica. A tal fine, la progettazione strutturale delle fondazioni va intesa come un processo nel quale si deve tenere conto opportunamente della dipendenza delle proprietà dinamiche del terreno, dell'ampiezza delle deformazioni, nonché degli effetti legati alla natura ciclica del carico sismico.

Le difficoltà maggiori nello studio delle fondazioni sottoposte ad azioni di tipo dinamico sono connesse al fatto che le sollecitazioni agenti su tali strutture non sono direttamente determinabili una volta note le caratteristiche sismologiche di un terremoto. Infatti, il comportamento di una data fondazione dipende in larga misura dalle caratteristiche geotecniche del terreno sottostante, dalle caratteristiche dinamiche della sovrastante struttura e dal modo come esse interagiscono.

Pertanto per poter effettuare la verifica sismica di una fondazione non è sufficiente conoscere l'intensità di un sisma, ma occorre ricostruire lo stato di tensioni e deformazioni da esso indotte nel terreno, esprimibili, rispettivamente, attraverso la *time-history* della accelerazione, della velocità e dello spostamento massimi.

Peraltro a parità di valore che queste grandezze vengono ad assumere nel movimento della roccia entro cui ha origine il sisma, esse possono variare considerevolmente, per un dato strato di terreno sciolto entro cui poggiano le fondazioni, in relazione alle frequenze e alla durata del sisma, per effetto di una interazione del moto di base con le caratteristiche dinamiche dello strato di terreno di ricoprimento.

SPETTRO DI RISPOSTA E NATURA DEL SITO

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.

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

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 del rapporto di smorzamento ξ , lo spettro di risposta elastico $S_e(T)$ per quel suolo. 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 di ξ . In Figura 1 è riportato l'andamento qualitativo di uno spettro di risposta generico.

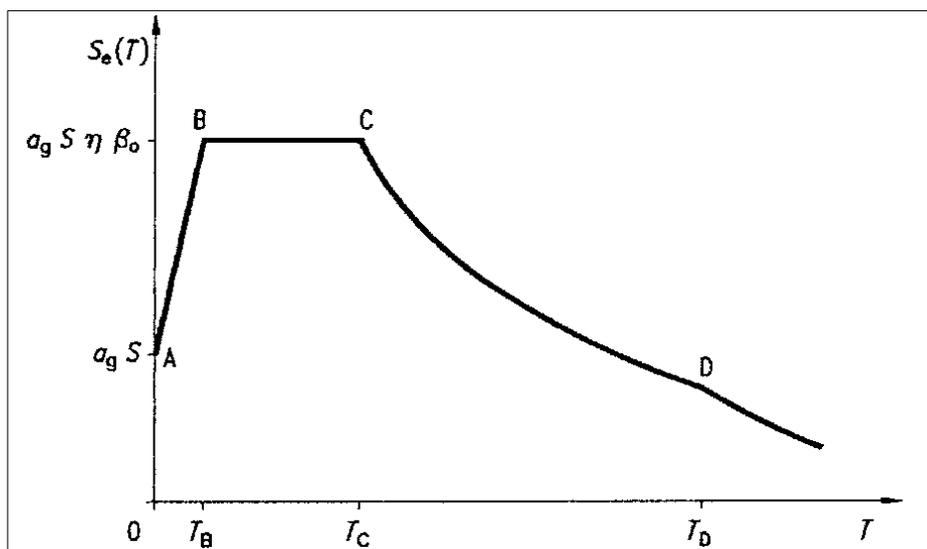


Figura 1

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'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.

REQUISITI DEL TERRENO DI FONDAZIONE

Oltre alla conoscenza delle proprietà dinamiche dei terreni, mediante studi ed indagini appropriate, l'EC8 prescrive che il sito di costruzione deve essere tale da minimizzare il rischio di rottura relativo alla presenza di faglie attive, alla instabilità di pendii, alla liquefazione ed all'addensamento dei terreni dovuto ad un dato terremoto.

Presenza di faglie attive

Per quanto riguarda la presenza di faglie attive, gli edifici di importanza strategica per la protezione civile (ospedali, caserme, centrali elettriche, ecc.), quelli con notevole affollamento (scuole, teatri, chiese, biblioteche, ecc.) e quelli di medie dimensioni ad uso comune (uffici, abitazioni, ecc.), non possono essere costruiti in vicinanza di quelle riconosciute tali dalle Autorità competenti.

Instabilità dei pendii

Per la stabilità dei pendii l'EC8 prescrive una verifica sismica della stabilità dei pendii su cui insistono gli edifici sopra citati, al fine di accertarne la stabilità, valutando eventuali spostamenti permanenti non accettabili con la funzionalità della struttura. La risposta del pendio all'azione sismica può essere calcolata sia con i metodi pseudo-statici dell'Eurocodice 7 (EC7), sia con i metodi dinamici quali quelli agli elementi finiti. La verifica allo stato limite deve essere eseguita almeno per la superficie di potenziale scorrimento. Nella determinazione della resistenza meccanica del terreno si deve tenere conto dell'eventuale decremento di valore per deformazioni elevate, come nel caso di riattivazione di vecchie frane a causa di un sisma. Infine si deve tenere conto della degradazione della resistenza del terreno e dell'incremento di pressione interstiziale dovuti alla ciclicità del carico.

Liquefazione del terreno

Si definisce liquefazione la riduzione di resistenza e/o di rigidità causata durante il moto sismico dall'aumento di pressioni interstiziali in terreni saturi non coesivi, tale da provocare deformazioni permanenti significative o persino da indurre nel terreno una condizione di sforzi efficaci quasi nulli. Per quanto riguarda il fenomeno della liquefazione l'EC8 richiede la valutazione del potenziale di liquefazione ogni volta che ci si trovi in presenza di un terreno di fondazione costituito da strati di sabbia posti al di sotto della falda idrica.

In questi casi il potenziale di liquefazione deve essere valutato sulla base dei risultati di una appropriata indagine geotecnica (prove SPT, CPT, granulometria del terreno, ecc.). Per la valutazione del potenziale di liquefazione devono essere impiegati i metodi dell'Ingegneria Geotecnica basati su correlazioni tra i risultati delle misure in situ e lo sforzo di taglio ciclico critico che ha causato liquefazione durante i terremoti passati.

Addensamento del terreno

La possibilità di addensamento del terreno, con conseguenti elevati cedimenti causati dalle sollecitazioni cicliche indotte dal terremoto, deve essere investigata valutando tali cedimenti potenziali nel caso di presenza di terreni sabbiosi sciolti e nel caso di presenza di argille molto soffici, che a causa della sollecitazione ciclica possono mostrare una degradazione della loro resistenza al taglio. Nel caso in cui da tale calcolo risultino cedimenti significativi, è opportuno procedere al miglioramento del terreno secondo i metodi descritti nell'EC7.

CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE

Per quanto riguarda i criteri generali di progettazione, l'EC8 fa riferimento all'EC7, nel quale sono fissati i criteri propri del metodo degli stati limite, il concetto di coefficienti di sicurezza parziali, definiti su basi statistiche, da applicare alle diverse grandezze. In merito alle verifiche da condurre nel caso delle fondazioni superficiali e su pali, l'EC8 fa riferimento prevalentemente a metodi di tipo pseudo-statico, precisando che:

- *le forze trasmesse dalla sovrastruttura al terreno di fondazione non devono generare deformazioni permanenti significative;*
- *le deformazioni indotte nel terreno dal terremoto devono essere compatibili con la funzionalità della struttura;*
- *la tipologia di fondazione deve essere tale da limitare i rischi associati all'incertezze nella valutazione della risposta sismica.*

Viene precisato inoltre di tenere conto delle non linearità del terreno, del decadimento dovuto alla ciclicità dei carichi e di eventuali miglioramenti del terreno necessari per evitare rischi di liquefazione o addensamento dei terreni. Inoltre i pali di fondazione devono essere progettati tenendo conto anche delle forze cinematiche derivanti dalle deformazioni del terreno attorno ai pali dovute al passaggio delle onde sismiche.

Interazione terreno-struttura

Il problema dell'*interazione terreno-struttura* si pone quando si vuole introdurre nei calcoli sismici la deformabilità del terreno, riconoscendo distinte la componente orizzontale dell'accelerazione sulla superficie libera del terreno, lontano da ogni costruzione, dalla componente orizzontale dell'accelerazione che ne risulta all'intradosso della fondazione per effetto della deformazione subita dal terreno sottostante esercitata dalle fondazioni stesse. Gli aspetti della risposta determinati dalla presenza del terreno, inteso come un continuo deformabile dotato di geometria e condizioni al contorno proprie, devono essere condotti accoppiando il terreno di fondazione al manufatto ed eseguendo quindi una vera e propria analisi di interazione dinamica terreno-struttura.

Non meno importanti sono gli aspetti relativi al comportamento dinamico dell'elemento di volume di terreno, e quelli relativi al comportamento dinamico dell'ammasso al finito, una volta nota la storia delle sollecitazioni applicate al terreno. Tali aspetti non sono secondari rispetto allo studio dell'interazione terreno-struttura: basti pensare ai molti manufatti che pur resistendo a forti azioni sismiche hanno superato lo stato limite di utilizzazione in conseguenza di rilevanti cedimenti differenziali o assoluti delle fondazioni per l'instabilità manifestata dai terreni stessi sottoposti ai carichi dinamici, come per esempio nel caso della liquefazione.

A tal fine assumono una particolare importanza le indagini e le valutazioni geologiche e geotecniche per la caratterizzazione del sito di costruzione, con l'obiettivo di ottimizzare, in sede di progetto, la modellazione numerica dell'interazione dinamica terreno-struttura. L'EC8 prescrive che si tenga conto dell'interazione terreno-struttura nel caso in cui:

- *le strutture siano soggette ad un effetto del 2° ordine $P-\delta$ significativo;*
- *le strutture siano poste su fondazioni con elevata massa inerziale o su fondazioni profonde, come nel caso di pile di ponti, silos e strutture off-shore fondate su cassoni;*
- *le strutture siano snelle, come nel caso di torri e ciminiere, fondate su terreno molto soffice, con valori delle velocità di propagazione delle onde di taglio $V_S < 100$ m/s.*

SICUREZZA E VERIFICA SISMICA DELLE FONDAZIONI

Per quanto riguarda la verifica sismica è importante specificare che in un'eventuale condizione di rottura del terreno (definita come la condizione per la quale i livelli di deformazione eccedono uno stato limite di servizio) non è il grado di sicurezza a dover essere valutato, ma l'entità dell'amplificazione che le onde sismiche subiranno propagandosi verso la superficie. Tale amplificazione è quantificabile mediante lo spettro di risposta al sito, essendo ciò in relazione all'eventuale aggravio di azioni dinamiche che può derivarne sulle strutture.

Se sul terreno agiscono forze destabilizzanti statiche (come ad esempio in uno strato in pendio) la verifica sismica consiste in tal caso nel valutare il grado di sicurezza nei riguardi della rottura. In alcune situazioni, per la natura transitoria della sollecitazione sismica, la condizione di rottura può essere raggiunta localmente solo per un numero finito di brevi intervalli di tempo, in ciascuno dei quali si genera un incremento di deformazione permanente che va a sommarsi ai precedenti.

Le conseguenze subite da una struttura per effetto dei cedimenti totali o differenziali dovuti ad un sisma possono ritenersi ancora accettabili se tali cedimenti non superano lo stato limite di servizio. In questi casi per valutare con maggiore attendibilità le deformazioni del terreno è necessario ricorrere ad analisi più raffinate in campo non lineare, non essendo sufficiente calcolare il fattore di sicurezza nei confronti della rottura.