

NON LINEARITÀ DEL TERRENO NEL PROGETTO DEI PALI DI FONDAZIONE

Marco BOZZA *

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

INTRODUZIONE

Il ricorso ai pali di fondazione è motivato non solo dalla necessità di limitare i cedimenti o di trasmettere in profondità i carichi applicati in sommità a strati di terreno più profondi, più resistenti e meno compressibili, ovvero da esigenze prevalentemente idrauliche, quali fondazioni di ponti o di opere off-shore. L'utilizzo della tecnologia delle fondazioni su pali ha infatti reso sempre più numerose le applicazioni costruttive nelle quali si fa ricorso ad essi, soprattutto quando si è in presenza di condizioni di carico caratterizzate da elevati valori delle componenti orizzontali, come nel caso sismico. Ciò ha dato notevole impulso in letteratura allo sviluppo di studi teorici e sperimentali riguardanti il comportamento di pali caricati in sommità, a partire dall'approccio tutt'oggi frequentemente utilizzato, per lo meno dal punto di vista progettuale, che è quello di *suolo alla Winkler*, la cui formulazione risale al 1867.

Le difficoltà maggiori nello studio delle strutture di fondazione sottoposte ad azioni orizzontali 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 sovrastruttura;
- dall'interazione tra struttura di fondazione e struttura in elevazione.

Quando un palo singolo è soggetto ad azioni orizzontali, considerate le sollecitazioni di momento e taglio che si generano nella varie sezioni, la rottura può verificarsi per raggiungimento dello stato limite ultimo sia del terreno sia del palo. E' importante precisare che il raggiungimento della resistenza limite del terreno circostante il palo può avvenire secondo un meccanismo di scivolamento lungo una superficie oppure per flusso plastico confinato man mano che ci si allontana dalla superficie.

METODI PSEUDO-STATICI

Il progetto dei pali singoli e/o in gruppo sottoposti ad azioni di tipo orizzontale viene normalmente condotto con l'ausilio dei metodi di tipo pseudo-statico, nei quali si assume che durante un terremoto le opere di fondazioni siano soggette ad un carico eccentrico ed inclinato. L'eccentricità deriva dal momento di trasporto delle forze d'inerzia orizzontali dagli elementi strutturali, dove si manifestano, al livello della fondazione. L'inclinazione del carico viene valutata componendo la forza peso con l'aliquota di esso applicata staticamente in senso orizzontale, calcolata sulla base dell'intensità sismica della zona su cui sorge la fondazione. In altre parole, nei metodi di tipo pseudo-statici, valutate le forze esterne, il calcolo sismico della fondazione si riduce alla verifica della capacità portante per carichi inclinati ed eccentrici.

Prescrizioni dell'Eurocodice 8

L'EC8, relativamente alle verifiche da condurre nel caso delle fondazioni superficiali e su pali, fa riferimento prevalentemente ai metodi di tipo pseudo-statico, largamente conosciuti ed utilizzati nella pratica professionale, precisando tuttavia 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 alle incertezze nella valutazione della risposta sismica.

NECESSITÀ DI MODELLI COSTITUTIVI NON LINEARI

I modelli geotecnici più semplici per valutare la stabilità di un palo soggetto a forze orizzontali sono per lo più basati sul concetto di *equilibrio limite*, poiché utilizzano legami costitutivi per il terreno di tipo rigido-plastico. Con tali modelli è possibile valutare il momento massimo che si verifica nel palo nella sezione di incastro con la fondazione superficiale, ma non è possibile valutare la distribuzione del momento nel palo alle varie profondità, né gli spostamenti. Per tali valutazioni generalmente si ricorre ad una modellazione dell'interazione palo-terreno di tipo elastico-lineare, che

generalizza la schematizzazione del terreno alla Winkler con la possibilità di includere nell'analisi la disomogeneità del terreno attraverso la variabilità del modulo di reazione orizzontale con la profondità.

Nella progettazione delle fondazioni su pali è importante la valutazione dei cedimenti, dello spostamento orizzontale e delle sollecitazioni indotte sui pali stessi dalle azioni di natura sismica. In questi casi il comportamento dei pali è in genere analizzato per mezzo della *Teoria dell'Elasticità*, assumendo che il terreno si comporti come un materiale di tipo elastico-lineare (*Modello di Matlock-Reese*) o, al più, di tipo rigido-plastico (*Modello di Broms*). Tuttavia le prove di carico su pali in vera grandezza evidenziano una forte non linearità del comportamento del terreno, sia esso di tipo coesivo o incoerente, e pertanto, tale aspetto non dovrebbe essere trascurato nello studio dell'interazione palo-terreno.

Una valida generalizzazione del modello di Winkler è costituita dal cosiddetto *Metodo delle curve P-y*, che offre il vantaggio di poter tener conto dei fenomeni di plasticizzazione che si verificano nel terreno circostante il palo.

Modello di Matlock-Reese

I vantaggi del modello elastico-lineare di Matlock-Reese consistono nella possibilità di determinare lo spostamento, la rotazione, il momento flettente ed il taglio che si generano nel palo, mediante coefficienti dimensionali opportunamente tabulati, mentre gli svantaggi riguardano le incertezze esistenti nella valutazione di tale grandezza, in una schematizzazione in cui il terreno interviene attraverso questo unico parametro, che rappresenta soltanto una caratteristica del modello di interazione e non il comportamento meccanico del mezzo. Inoltre l'esigenza di dovere tenere conto di fattori quali la non linearità del comportamento del terreno e la variazione del modulo di reazione orizzontale in funzione del livello di carico, come evidenziato dai risultati sperimentali, fanno sì che per una più realistica modellazione del comportamento del sistema palo-terreno sia necessario il ricorso a metodi di tipo elastico non lineare.

Modello di Broms

Particolarmente importante risulta poi la valutazione del carico limite orizzontale agente alla sommità di un palo verticale. Questo può essere raggiunto quando si supera la *pressione limite del terreno* p_{max} o quella flessionale del palo. Il modello più noto per la determinazione del carico limite è quello proposto da Broms nel quale si ipotizza che:

a) *il comportamento del terreno laterale a contatto del palo sia rigido plastico e sia funzione della dimensione trasversale D del palo;*

b) *il comportamento flessionale del palo sia di tipo rigido plastico.*

Il punto b) equivale a considerare le rotazioni elastiche del palo trascurabili fino a che il momento flettente non raggiunga il valore di plasticizzazione in una sezione, nel qual caso si forma una cerniera plastica e la rotazione aumenta con momento costante. Se il massimo momento che si genera nel palo è inferiore al valore al valore di plasticizzazione (palo rigido) il collasso si verifica secondo un cinematismo di moto rigido.

- *Per pali relativamente corti e rigidi il valore del carico limite dipende dalle caratteristiche geometriche del palo e dalla resistenza del terreno e si arriva a rottura mobilizzando la resistenza del terreno.*

- *Per pali relativamente lunghi il valore del carico limite dipende anche dalle caratteristiche di resistenza del palo.*

L'importanza della formulazione di Broms risiede nel fatto che l'esperienza acquisita dimostra con sufficiente attendibilità che la determinazione della pressione limite del terreno, relativamente ai casi di terreno argilloso e incoerente, può esprimersi in funzione rispettivamente dei valori della coesione non drenata c_u e dell'angolo di resistenza al taglio del terreno. Nel primo caso (terreno coesivo), per la pressione limite, Broms propone un diagramma semplificato con resistenza nulla fino a $1,5D$, costante al di sotto e pari a $9c_u D$. Nel secondo caso (terreno non coesivo) Broms considera che la pressione assuma una variazione di tipo lineare con la profondità z , pari a $3K_p \gamma D z$, essendo K_p il coefficiente di spinta passiva e γ il peso dell'unità di volume del terreno.

Note le distribuzioni lungo il palo dello spostamento, della reazione del terreno e del momento flettente, da semplici equazioni di equilibrio è possibile determinare il valore del carico limite orizzontale.

Metodo delle curve P-Y

L'esigenza di dover tener conto di fattori quali la non linearità del comportamento del terreno, la variazione delle caratteristiche del mezzo e del modulo di reazione in funzione del livello di carico, conferisce al metodo delle curve P-y una notevole generalità di applicazione. Infatti tramite i parametri che definiscono la *funzione di trasferimento*, ovvero la pressione limite p_{max} ed il modulo di reazione orizzontale iniziale del terreno E_{si} (pendenza delle curve), è possibile caratterizzare quest'ultimo sia dal punto di vista meccanico che resistente.

Tuttavia, come in generale succede in qualsiasi modellazione che si avvalga dell'impiego di funzioni di trasferimento, è proprio la scelta dei parametri caratterizzanti la curva a condizionare la validità dei risultati che si ottengono.

Per tenere conto degli effetti di non linearità nell'interazione della risposta mobilitata dal terreno circostante un palo soggetto a una forza orizzontale (o di gruppi di pali sottoposti ad azioni orizzontali) vengono proposti in letteratura diversi modelli analitici. L'obiettivo è quello considerare modelli costitutivi del terreno di tipo non lineare in grado di cogliere con sufficiente attendibilità l'osservazione sperimentale del comportamento di pali sottoposti a carico orizzontale. A tal fine si può ritenere sufficientemente corretto fare riferimento a curve P-y esprimibili attraverso semplici espressioni analitiche quali quelle di tipo iperbolico o parabolico.

Modellazioni semplificate possono essere condotte impiegando un legame costitutivo di tipo elasto-plastico che presenta il vantaggio di consentire l'impostazione di soluzioni numeriche in forma chiusa per la determinazione delle caratteristiche di derogazione e di sollecitazione in corrispondenza della sezione di incastro del palo nella fondazione.

COMPORAMENTO DI UN PALO SINGOLO

Funzioni di trasferimento iperboliche

Un semplice legame costitutivo per il terreno in grado di cogliere con buona approssimazione i valori sperimentali è quello di tipo iperbolico espresso nella forma:

$$(1) \quad p(z) = \frac{y(z)}{\frac{1}{E_{si}(z)} + \frac{y(z)}{p_{max}(z)}}$$

nella quale $y(z)$ è lo spostamento orizzontale del palo alla profondità z , $p(z)$ è la reazione mobilitata nel terreno circostante il palo in corrispondenza di $y(z)$, $E_{si}(z)$ è il valore iniziale del modulo di reazione orizzontale del terreno e $p_{max}(z)$ è la pressione limite del terreno.

Nella (1) l'approccio più affidabile per la determinazione di $p_{max}(z)$ è quello basato sul metodo di Broms. Per quanto riguarda il modulo di reazione orizzontale $E_{si}(z)$ si ricorre all'interpretazione di prove sperimentali eseguite su pali in vera grandezza mediante l'impiego di relazioni empiriche dedotte dalle analisi, ovvero si adottano procedure che utilizzano i risultati di moderne e sofisticate prove geotecniche in situ. In generale si assume che $E_{si}(z)$ cresca linearmente con la profondità secondo la relazione $E_{si}(z) = K_i z$, essendo K_i il gradiente del modulo iniziale. Una volta fissati E_{si} e p_{max} , l'andamento delle curve è univocamente definito.

Funzioni di trasferimento paraboliche

Impiegando per il terreno un legame costitutivo di tipo parabolico una conveniente relazione può essere data dalla seguente espressione:

$$(2) \quad p(z) = \frac{1}{2} \cdot p_{max}(z) \cdot \left(\frac{y(z)}{y_{50}(z)} \right)^{0,33}$$

nella quale $y_{50}(z)$ è lo spostamento orizzontale corrispondente alla mobilitazione del 50% della pressione limite del terreno. Quest'ultimo parametro può essere espresso da relazioni molto semplici che lo legano al diametro D del palo: ad esempio per terreni coesivi teneri può assumersi $y_{50} = 0,03D$ mentre per terreni coesivi di media consistenza si può adottare $y_{50} = 0,02D$. Per successive derivazioni dalla (2) è possibile determinare le rotazioni lungo il palo e le caratteristiche di sollecitazioni.

COMPORAMENTO DEI PALI IN GRUPPO

Analogamente al palo singolo, anche nei pali in gruppo l'effetto della non linearità del comportamento del terreno influenza in maniera determinante la risposta in termini di pressione. L'osservazione dei risultati sperimentali di prove di carico in vera grandezza condotte su pali in gruppo evidenzia che l'andamento caratteristico della curva carico orizzontale-spostamento subisce un abbassamento rispetto al caso di palo singolo, ancora più evidente nel caso di pali posti in terreni coesivi.

Per tener conto di questo aspetto, l'estensione del metodo delle curve P-y ai pali in gruppo avviene mediante l'introduzione di un moltiplicatore P_M con il quale è possibile modificare opportunamente l'andamento della funzione di trasferimento per tener conto dei mutui fattori di interazione che intervengono tra i pali del gruppo. L'obiettivo è quello di poter ridurre i valori della reazione mobilitata per i pali del gruppo, rispetto al palo singolo, così da ottenere curve carico-spostamento aderenti alla realtà sperimentale. In particolare con il moltiplicatore P_m si riducono le proprietà meccaniche del terreno in termini di pressione limite p_{max} e modulo di reazione orizzontale E_{si} per poter considerare la significativa riduzione di resistenza che subisce il terreno tra i pali del gruppo rispetto al palo singolo. Tale riduzione risulta funzione della distribuzione dei pali all'interno del gruppo.

Modellazione numerica del sistema pali-terreno

L'analisi del comportamento dei pali soggetti ad azioni orizzontali con il metodo delle curve P-y viene di norma condotta mediante modelli di calcolo costituiti da elementi finiti monodimensionali di palo, collegati tra loro da molle a comportamento elastico lineare e con il terreno circostante attraverso funzioni di trasferimento a comportamento non lineare. Valutati gli spostamenti orizzontali del palo attraverso una procedura iterativa, che tiene conto della non linearità del legame costitutivo, tramite successive derivazioni numeriche, è possibile determinare le rotazioni, il momento flettente ed il taglio in corrispondenza delle sezioni del palo poste alle varie profondità dal piano di campagna.

Per analisi di particolare importanza strutturale si utilizzano codici di calcolo ad elementi finiti dotati di sofisticati modelli costitutivi per i materiali, sia del palo che del terreno circostante, in grado di simulare effetti di plasticizzazione, del sistema pali-terreno, in presenza di complesse condizioni al contorno.

Va tuttavia precisato che una corretta progettazione sismica delle fondazioni non deve basarsi solamente sulle analisi fornite dai codici di calcolo, ma essere anche accompagnata (quando possibile e necessario) da indagini sperimentali e attente valutazioni nella scelta dei parametri geotecnici che si vanno ad utilizzare.