

## INTERAZIONE DINAMICA TERRENO-STRUTTURA \*

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. 16.01.1996

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

### DEFINIZIONE DEL PROBLEMA

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*.

Si supponga che ad una profondità  $H$  dalla superficie libera, sulla quale è edificata una struttura, esista un substrato roccioso (*bedrock*), con un forte contrasto di rigidità rispetto al terreno sovrastante, e sia  $\ddot{y}_b(t)$  la componente orizzontale dell'accelerazione agente in esso (Figura 1). Tale accelerazione dipende dall'attività delle sorgenti di energia limitrofe dell'habitat geofisico della zona e dalle leggi di attenuazione regionali. Gli strati di terreno che si trovano sopra il bedrock operano da filtro sul moto  $\ddot{y}_b(t)$  e, in generale, il moto  $\ddot{y}_s(t)$  in superficie (livello  $s$ ) risulta amplificato. Come si vede il profilo delle accelerazioni  $\ddot{y}_{max}(z)$  alle varie profondità  $z$  mostra che l'amplificazione interessa il terreno prossimo alla superficie libera. Ciò è dovuto al fatto che la superficie libera costituisce il limite del semispazio entro cui si propagano le onde sismiche.

Nell'ipotesi che tale semispazio costituisca un mezzo elastico e omogeneo, una sollecitazione impulsiva che si propaga con direzione ortogonale alla superficie libera raddoppia la sua ampiezza proprio in prossimità della superficie libera, poiché su di essa ha luogo una riflessione completa nella quale l'impulso incidente si sovrappone a quello riflesso. Questo fenomeno dell'amplificazione dell'accelerazione in prossimità della superficie libera è detto *amplificazione dinamica locale*.

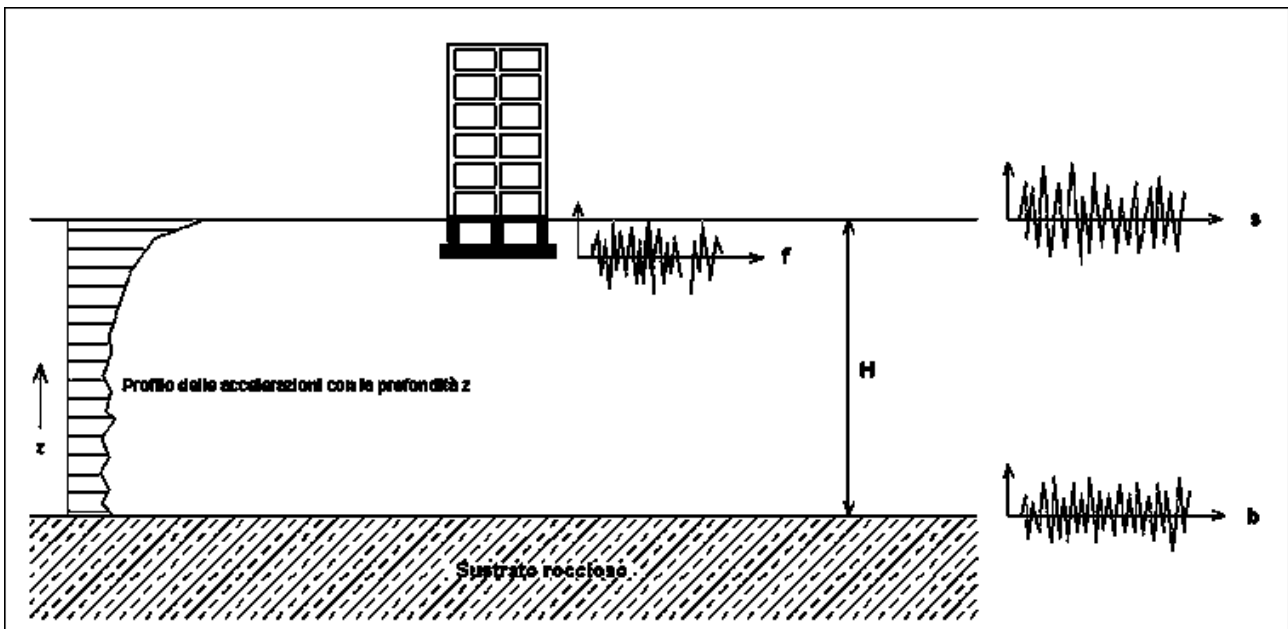


Figura 1

In termini generali il problema dell'interazione dinamica terreno-struttura si pone quando si vuole considerare nelle analisi sismiche la deformabilità del terreno, poiché le caratteristiche dinamiche del suolo sotto la fondazione variano rispetto a quelle dello stato tensionale naturale. In altre parole ciò equivale a tener conto che la componente orizzontale dell'accelerazione  $\ddot{y}_s(t)$  sulla superficie libera del terreno, lontano da ogni costruzione, è diversa dalla componente orizzontale dell'accelerazione  $\ddot{y}_f(t)$  che ne risulta al piede della fondazione (livello  $f$ ) per effetto della deformazione subita dal terreno sottostante esercitata dalle fondazioni stesse.

Da un punto di vista più globale il comportamento di una struttura rispetto ad una sollecitazione sismica può essere analizzato valutando in sequenza quattro fasi distinte:

- 1) il moto  $\ddot{y}_b(t)$  al bedrock;
- 2) l'amplificazione locale dal moto  $\dot{y}_b(t)$  al moto  $\ddot{y}_s(t)$ ;
- 3) l'interazione terreno-struttura, cioè l'alterazione dal moto  $\ddot{y}_s(t)$  al moto  $\ddot{y}_r(t)$ ;
- 4) le azioni d'inerzia sulle struttura per effetto di  $\ddot{y}_r(t)$ .

### Interazione cinematica e inerziale

Si noti che nel caso di evento sismico una certa massa di terreno sottostante la fondazione si muoverà quasi solidalmente con essa e pertanto anche quasi solidalmente con la struttura.

Segue che, anche trascurando la massa della struttura, il moto nei punti di contatto tra terreno e fondazione è diverso dal moto originario, poiché risente dei vincoli che la sovrastruttura impone ai punti considerati. Questo fenomeno è detto di *interazione cinematica* e diviene importante quando la rigidezza della fondazione è diversa da quella del terreno che essa sostituisce, e cresce all'aumentare delle dimensioni della fondazione.

Se invece la struttura ha massa diversa da zero il moto del terreno induce sulla struttura delle forze di inerzia che a loro volta causano ulteriori modifiche del moto dei punti di contatto tra terreno e struttura. Tale fenomeno detto di *interazione inerziale* è sempre più importante all'aumentare della massa ed è predominante quasi sempre rispetto al fenomeno cinematico, a meno che non si tratti di struttura rigida molto estesa in pianta o di struttura interrata.

### ANALISI CON LO SPETTRO DI RISPOSTA

L'EC8 definisce uno spettro di risposta, per un fissato rapporto di smorzamento viscoso, in funzione dell'accelerazione  $\ddot{y}_s(t)$  in superficie e del tipo di terreno secondo le classi di sottosuolo così definite:

<b>Sottosuolo di tipo A</b>	<i>roccia o altra formazione geologica caratterizzata da una velocità di propagazione delle onde di taglio, <math>V_S</math> pari almeno a 800 m/s, includendo al massimo uno strato superficiale di materiale a più debole consistenza di 5 m.</i>
<b>Sottosuolo di tipo B</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 <math>V_S</math> che vanno da 200 m/s ad una profondità di 10 m, fino a 350 m/s a 50 m.</i>
<b>Sottosuolo di tipo C</b>	<i>depositi privi di coesione con o senza qualche morbido strato coesivo, caratterizzati da valori di <math>V_S</math> sotto ai 200 m/s nei primi 20 m e depositi di terreni coesivi caratterizzati da rigidità basse/medie e con valori di <math>V_S</math> sotto ai 200 m/s nei primi 20 m.</i>

Tabella 1

Poiché queste classi di sottosuolo dipendono dalla natura (profilo stratigrafico e velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_S$ ) e dallo spessore del terreno comprendendo implicitamente quindi anche gli effetti dell'amplificazione locale, ma per l'analisi strutturale occorre considerare l'interazione 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 di  $V_S < 100$  m/s.

### CRITERI PER L'ANALISI DELL'INTERAZIONE TERRENO-STRUTTURA

I cedimenti della fondazione sotto i carichi d'esercizio, nonché gli stessi carichi trasmessi dalla struttura al terreno dipendono dall'interazione terreno-struttura, che è fortemente influenzata dalle caratteristiche di deformabilità del terreno e dalla rigidezza della struttura di fondazione e della sovrastruttura. Infatti, sulla base del comportamento manifestato dal terreno di fondazione in ragione della sua natura, tali caratteristiche di deformabilità possono modificare sensibilmente la risposta dell'intero organismo strutturale. Lo studio dell'interazione tra terreno e fondazione richiede che vengano soddisfatte le condizioni di equilibrio e congruenza all'interfaccia dei due componenti.

A tal fine è necessario schematizzare il comportamento dei due elementi con un modello che ne permetta l'analisi. La scelta di tale modello deve garantire il più possibile la fedeltà della risposta al comportamento reale, ed i parametri che lo caratterizzano devono essere determinabili sulla base di specifiche correlazioni con i parametri fisici del terreno. Mentre la struttura di fondazione, in genere, è un elemento strutturale relativamente semplice per il quale il modello di trave o piastra elastica inflessa è adeguato a descriverne il comportamento, la modellazione del terreno si presenta più complessa.

## METODI APPROSSIMATI PER LE OPERE DI FONDAZIONE

Secondo quanto riportato nel Commentario al D.M. 16.01.1996, per quanto riguarda la progettazione delle opere di fondazione nei confronti delle azioni sismiche essa può essere condotta o in maniera rigorosa con l'ausilio dei metodi di tipo dinamico, o in modo approssimato con l'impiego di:

- *metodi di tipo pseudo-statico;*
- *metodi di tipo quasi-statico.*

### Metodi di tipo pseudo-statico

Per quanto riguarda i *metodi di tipo pseudo-statico*, si assume che durante un terremoto le opere di fondazione 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 del coefficiente sismico convenzionale della zona su cui sorge la fondazione. In definitiva, nei metodi di tipo pseudo-statico, valutate le forze esterne, il calcolo sismico delle fondazioni si riduce alla verifica della capacità portante per carichi inclinati ed eccentrici.

### Metodi di tipo quasi-statico

Per quanto riguarda i *metodi di tipo quasi statico* ci si riferisce ad un tipo di calcolo in cui le forze sono ancora applicate staticamente, ma la loro entità viene determinata sulla base di modellazioni dinamiche del complesso struttura-terreno. Tale procedura trova impiego per il sotto-insieme costituito dalla sovrastruttura, mentre sorgono difficoltà nella applicazione al sotto-insieme costituito dal terreno. In quest'ultimo caso i metodi disponibili potrebbero essere chiamati in modo più appropriato di tipo pseudo-dinamico, in quanto rappresentano situazioni di problemi dinamici semplificati nei quali si trascurano gli effetti dovuti alla frequenza, allo smorzamento ed, in generale, a fattori ed a proprietà dinamiche significative. Maggiori difficoltà si presentano inoltre per l'analisi del complesso terreno-fondazione-struttura; in tal caso le forze dinamiche in gioco all'interno del terreno rappresentano soltanto un'aliquota di quelle complessive che agiscono anche al livello della sovrastruttura, per cui non è agevole individuare tali forze ed applicarle in modo quasi statico al complesso terreno-struttura.

## MODELLI PER L'ANALISI DELL'INTERAZIONE TERRENO-STRUTTURA

Per analizzare il comportamento dinamico del complesso terreno-struttura occorre pertanto fare riferimento a modelli dinamici, per il fatto che essi rappresentano l'unica via per ottenere le sollecitazioni reali sul terreno di fondazione e sugli elementi strutturali. La difficoltà di elaborazione di schemi strutturali sufficientemente dettagliati fa sì che l'analisi del comportamento dinamico miri inizialmente alla determinazione delle forze inerziali. Ma anche così formulato il problema resta complesso e può essere affrontato con diversi gradi di affinamento. Attualmente i modelli utilizzati per tenere in conto l'interazione terreno-struttura sono:

- *modelli su suolo alla Winkler;*
- *modelli a molle e smorzatori concentrati;*
- *modelli ad elementi finiti.*

### MODELLI SU SUOLO ALLA WINKLER

Le equazioni differenziali che descrivono il problema su suolo elastico, rispettivamente, della trave e della piastra sono:

$$(1) \quad EJ \cdot \frac{d^4 w(x)}{dx^4} = q(x) - p(x)$$

$$(2) \quad D \cdot \left( \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w(x,y)}{\partial y^4} \right) = q(x,y) - p(x,y)$$

essendo  $w$  è lo spostamento verticale del punto generico al contatto fondazione-terreno,  $E$  è il modulo di Young del materiale costituente la fondazione,  $J$  è il momento d'inerzia della sezione della trave,  $D$  la rigidezza flessionale della piastra,  $q$  il carico applicato e  $p$  la pressione di contatto. Alla (1) e alla (2) vanno associate le equazioni (algebriche o differenziali) che descrivono il comportamento del terreno, in particolare esprimendo gli spostamenti  $w$  all'interfaccia fondazione-terreno in funzione della distribuzione delle pressioni di contatto. Per la trave e la piastra esse si scrivono in generale come:

$$(3) \quad w(x) = f(p(x))$$

$$(4) \quad w(x, y) = f(p(x, y))$$

Per ragioni di semplicità computazionale, la modellazione del sistema fondazione-terreno viene normalmente condotta nell'ambito del comportamento elastico lineare. Dal punto di vista fisico, per simulare l'interazione terreno-fondazione, il terreno viene assimilato ad un letto di molle elastiche mutuamente indipendenti (suolo alla Winkler). Il modello di Winkler consiste nell'assumere una relazione lineare fra il cedimento in un punto e la pressione di contatto nello stesso punto:

$$(5) \quad p(x) = K \cdot w(x)$$

dove la costante di proporzionalità  $K$  [ $N/m^3$ ] è detta *coefficiente di reazione* del terreno. Il coefficiente di reazione del terreno è quindi, per definizione, il rapporto tra il carico ed il cedimento. Sostituendo la (5) nella (1) si ottiene per la trave:

$$(6) \quad EJ \cdot \frac{d^4 w(x)}{dx^4} = q(x) - K \cdot w(x)$$

che è la ben nota equazione differenziale del *Metodo di Winkler*. L'utilizzo di modelli basati sul metodo di Winkler è molto diffuso in virtù della sua semplicità, e per la possibilità che offre di impostazione di soluzioni analitiche che permettono di giungere rapidamente alla soluzione del problema. Questo è vero per l'equazione (6) per la quale esiste, note le condizioni al contorno, la soluzione in forma chiusa. È invece evidente che per la soluzione della (2), associata alla (4), è necessario il ricorso a procedure di integrazione numerica (ad esempio mediante il metodo delle differenze finite o degli elementi finiti).

#### **Valutazione del coefficiente di reazione**

L'uso del metodo di Winkler, che resta comunque il più diffuso tra i metodi per lo studio dell'interazione tra fondazione e terreno, richiede un'attenta valutazione del valore di  $K$  da utilizzare a seconda dei casi. Il tipo di indagine più semplice e più indicativo per indagare sul comportamento di una fondazione superficiale, ed in particolare sul valore del coefficiente di reazione  $K$ , è la prova di carico su modello in scala ridotta, ovvero la cosiddetta prova di carico su piastra. Tale prova, tuttavia, non sempre fornisce risultati facilmente interpretabili ed estrapolabili per la determinazione del comportamento della fondazione vera e propria e spesso il comportamento osservato durante la prova differisce in maniera sostanziale da quello della costruzione reale, se non altro a causa di inevitabili effetti di scala e di altri fattori quali l'entità dei carichi agenti, la forma e le dimensioni della fondazione, l'eterogeneità del sottosuolo, la natura e le proprietà dei terreni di fondazione.

Tuttavia, dall'applicazione delle prove di carico su piastra si possono ottenere indicazioni, oltre che su  $K$ , anche sul valore del modulo elastico equivalente per la fondazione in vera grandezza, ovvero del rapporto tra i cedimenti della fondazione reale ed i cedimenti relativi alla prova. È da precisare che in un terreno reale il cedimento dipende, oltre che dal carico applicato, dalle proprietà del terreno medesimo, nonché dalla forma e dalle dimensioni della fondazione. Ne consegue, pertanto, che il coefficiente di reazione non è una proprietà del terreno, e quindi non ha alcun senso fornirne valori tipici per terreni tipici, come in genere riportato nei vecchi manuali di ingegneria ed in alcuni codici di calcolo strutturale.

#### **MODELLI A MOLLE E SMORZATORI CONCENTRATI**

Un metodo che consente di seguire più da vicino il fenomeno sismico consiste nel sostituire agli elementi terreno, fondazione, struttura, una serie discreta di masse, molle elastiche e smorzatori viscosi concentrati. La presenza delle molle elastiche simula la deformabilità del terreno sottostante, mentre con gli smorzatori viscosi si vuole tenere in conto la dissipazione di energia.

È tuttavia doveroso precisare che raramente si dispone di un'indagine accurata delle caratteristiche elastiche del terreno. Considerando anche le incertezze relative alle correlazioni tra le misure geotecniche e i moduli elastici del terreno, è prassi ricorrente considerare il terreno omogeneo, caratterizzato da un singolo modulo di elasticità tangenziale, e attribuire a tale modulo un insieme di possibili valori attorno al valore di migliore stima. Una notevole semplificazione nell'applicazione del metodo si ha nel caso si considerino separatamente la struttura completa di fondazione da un lato, e lo strato di terreno dall'altro. Si tratta di scomporre il problema della interazione in un problema di risposta sismica locale, cioè di definizione del moto del terreno in superficie, in assenza di struttura, a partire dagli accelerogrammi rappresentativi di uno o più eventi sismici di entità prefissata, e quindi in un problema di risposta dinamica della struttura al moto del terreno libero precedentemente calcolato.

## MODELLI AD ELEMENTI FINITI

L'analisi sperimentale del comportamento delle fondazioni superficiali evidenzia la non linearità dell'interazione fondazione-terreno, per la cui modellazione, pertanto, è richiesto l'impiego di modelli di tipo elastico non lineare, o addirittura di tipo elasto-plastico con incrudimento. Peraltro oggi la facilità di applicazione dei metodi di analisi numerica resa possibile dalla sempre crescente potenzialità dei calcolatori elettronici, fa sì che sia venuto a cessare il vantaggio connesso alla prerogativa principale del metodo di Winkler, cioè la sua semplicità.

La disponibilità di soluzioni numeriche basate su modellazioni non lineari dell'interazione fondazione-terreno di tipo elasto-plastico con incrudimento, rendono oggi il metodo di Winkler certamente superato, e consentono un'analisi più realistica delle sollecitazioni e dei cedimenti indotti nel terreno dal carico trasferito da una fondazione superficiale.

Assumono una particolare importanza le indagini e le valutazioni geologiche e geotecniche per la caratterizzazione del sito, con l'obiettivo di ottimizzare, in sede di progetto, l'analisi strutturale, in particolare quella basata sulla modellazione ad elementi finiti. L'analisi ad elementi finiti del complesso terreno-fondazione-struttura costituisce la modellazione più raffinata a disposizione del progettista, in quanto consente di evidenziare sia gli effetti dell'amplificazione dinamica locale sia quelli dell'interazione terreno-struttura. Per l'utilizzo di questa procedura, noto il moto del terreno  $\ddot{y}_b(t)$  sul substrato roccioso, è necessario specificare le condizioni al contorno del volume di terreno interessato dal modello. Con questo metodo si realizzano normalmente modelli 2D, ma per analisi complesse si utilizzano anche modelli 3D.