

# INTRODUZIONE ALL'INTERAZIONE DINAMICA MURO-TERRENO

Marco BOZZA \*

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

## INTRODUZIONE

Il problema dell'interazione dinamica terreno-struttura, ovvero *DSSI (Dynamic Soil-Structure Interaction)* scaturisce dal fatto che la risposta sismica di un'opera di sostegno avente a valle e a monte un terreno deformabile, differisce sotto vari aspetti da quella della stessa struttura fondata su terreno rigido e soggetta al medesimo terremoto. Per le strutture in generale ciò è dovuto al fatto che:

- *il moto della fondazione su suolo deformabile è diverso da quello della superficie libera, e può includere una componente importante di rotazione legata al moto della struttura su suolo rigido;*
- *il periodo fondamentale di vibrazione della struttura su suolo deformabile è superiore a quello della struttura su suolo rigido;*
- *i periodi naturali, le forme modali ed i fattori di partecipazione modale della struttura su suolo deformabile sono diversi da quelli della struttura su suolo rigido;*
- *lo smorzamento complessivo della struttura su suolo deformabile include sia quello da "radiazione" che quello interno, generato all'interfaccia terreno-fondazione.*

Per tenere conto dell'influenza del DSSI nei modelli di analisi si fa riferimento sostanzialmente a due metodologie di calcolo:

- *modelli semplificati;*
- *modelli ad elementi finiti.*

Questi modelli colgono bene le principali caratteristiche della risposta dinamica di queste opere e possono essere impiegati per effettuare calcoli approfonditi che, tuttavia, si giustificano soltanto per strutture di particolare rilievo, la cui sicurezza, nei confronti di una eventuale azione sismica, assume un'importanza strategica per la Protezione Civile (ospedali, caserme, centrali elettriche, ecc.).

## MODELLI SEMPLIFICATI

Nella letteratura scientifica sono disponibili alcune soluzioni dinamiche che tengono conto di uno o due gradi di libertà per i muri rigidi e di uno o numerosi gradi di libertà nel caso di muri a mensola e di opere di sostegno flessibili. E' possibile modellare l'interazione dinamica terreno-struttura schematizzando il terreno a contatto col muro come un insieme discreto di molle equivalenti che trasmettono all'opera di sostegno le azioni indotte dal terreno durante l'eccitazione sismica, e smorzatori equivalenti che tengono conto della capacità del terreno di dissipare parte dell'energia fornita al sistema dalla forzante sismica. Tale modello è caratterizzato da due gradi di libertà, uno di spostamento ed uno di rotazione, ed è applicabile a muri a gravità posti a sostegno di terreni granulari in assenza di falda.

### **Criteri per la scelta dei valori di rigidità**

I valori da attribuire alla rigidità delle molle, funzioni del tipo di terreno e di strutture, vengono a dipendere dalla situazione specifica nella quale si opera la modellazione. In particolare si può verificare che la struttura sia schematizzabile come un corpo rigido (ad esempio un muro a gravità) su un suolo deformabile, oppure si è nella condizione in cui tutta la deformabilità sia attribuibile alla struttura (ad esempio una paratia) e che relativamente ad essa il terreno alla base sia schematizzabile come vincolo rigido. Naturalmente risultano anche possibili situazioni intermedie nelle quali la dinamica del sistema è determinata dalla deformabilità sia della struttura sia del terreno (ad esempio un muro di sostegno a mensola).

### **Criteri per la scelta dei valori di smorzamento**

Per avere dei valori da attribuire ai coefficienti di smorzamento è necessario osservare che essendo infinito lo spazio considerato, esistono onde meccaniche che partendo dalla struttura si propagano in ogni direzione e non ritornano ad essa, disperdendo quindi energia per radiazione. Al contrario, se nelle immediate vicinanze esiste uno strato di terreno che riflette le onde sismiche, come nel caso di un letto roccioso a poca profondità), la scelta dei coefficienti deve essere adeguatamente valutata al caso specifico.

Tali coefficienti, assumendo valori diversi a seconda del tipo di moto coinvolto (orizzontale, verticale o flessionale), rappresentano soltanto la dissipazione di energia per radiazione di onde elastiche nel suolo. In realtà nelle applicazioni deve considerarsi anche lo *smorzamento intrinseco del terreno*, al fine di tenere conto delle dispersioni di energia nei cicli di isteresi del suolo.

## MODELLI AD ELEMENTI FINITI

Per simulare il DSSI il più fedelmente possibile sono state effettuate ampie indagini teorico-numeriche con l'obiettivo di definire i meccanismi e i parametri fondamentali (geotecnici e strutturali) che stanno alla base del comportamento dinamico delle opere di sostegno soggette ad azione sismica. Ciò ha consentito di realizzare codici di calcolo ad elementi finiti (modelli FEM) in grado di simulare, localmente, l'interazione dinamica e, globalmente, la risposta sismica del sistema muro-terreno.

### Approccio con il metodo degli elementi finiti

Il vantaggio che deriva dall'utilizzo di queste metodiche di calcolo scaturisce dalla possibilità di caratterizzare in modo dettagliato quegli aspetti che maggiormente influenzano il comportamento sismico delle strutture soggette al moto sismico. In particolare è possibile considerare:

- a) la variazione delle caratteristiche del suolo con la profondità;
- b) la variazione del moto nei diversi strati di terreno;
- c) l'effetto di strutture adiacenti;
- d) la non-linearità del legame sforzi-deformazioni del suolo;
- e) la dipendenza dell'assorbimento di energia del suolo dal livello di sforzi che s'instaura dopo il terremoto;
- f) l'effetto tridimensionale del problema.

I punti a), b) e c) costituiscono gli aspetti caratteristici dei problemi risolti mediante la formulazione per elementi finiti, poiché essa consente una rappresentazione dettagliata delle proprietà dei materiali e quindi del moto in diversi punti dello spazio. I punti d) ed e) sono invece caratteristici dei processi di iterazione nel calcolo a elementi finiti, mediante i quali si aggiorna la matrice dei termini di rigidezza e dei termini di dissipazione in funzione dello stato di sforzo indotto nella struttura o nel terreno dal sisma. Il punto f) è tipico dei problemi di dinamica del suolo e riguarda la possibilità di simulare adeguatamente lo spazio infinito mediante un modello di dimensioni finite e opportune condizioni al contorno. Ciò è di particolare interesse quando si pone il problema di restringere l'analisi ad una porzione limitata di spazio S, attorno alla struttura, e la modellazione del restante spazio è richiesta soltanto per fornire ai fenomeni che si verificano in S le necessarie condizioni al contorno.

### Modellazione FEM del sistema muro-terreno

Il problema del calcolo degli spostamenti indotti dal sisma sulle opere di sostegno comporta la definizione di un legame costitutivo del terreno, il quale, deformandosi per effetto dell'azione sismica, interagisce reciprocamente con il moto del muro. In questi particolari problemi di DSSI si utilizzano modelli a soluzione numerica nei quali il sistema muro-terreno viene discretizzato con una mesh a elementi finiti, nei cui nodi sono localizzati gli spostamenti (incogniti) del sistema.

Se si indica con  $\mathbf{x}(t)$  il vettore degli spostamenti nodali l'equilibrio dinamico globale di tale sistema si ottiene scrivendo l'equazione del moto (equazione matriciale) nella forma seguente:

$$(1) \quad [\mathbf{M}] \cdot \ddot{\mathbf{x}}(t) + [\mathbf{C}] \cdot \dot{\mathbf{x}}(t) + [\mathbf{K}] \cdot \mathbf{x}(t) = -\mathbf{F}_s(t)$$

nella quale  $[\mathbf{M}]$  è la *matrice di massa*,  $[\mathbf{C}]$  è la *matrice di smorzamento*,  $[\mathbf{K}]$  è la *matrice di rigidezza* e  $\mathbf{F}_s(t)$  è il vettore dei carichi dinamici esterni (i puntini sopra la  $\mathbf{x}$  indicano l'ordine della derivata rispetto al tempo). La determinazione dei coefficienti che compongono le matrici dipende dalle ipotesi alla base del modello dinamico considerato, nonché dai gradi di libertà che il sistema possiede.

La definizione della massa che partecipa al moto, il meccanismo di dissipazione dell'energia, che a rigore dovrebbe tener conto sia dello smorzamento materiale che di quello geometrico, e la valutazione della rigidezza del terreno, il cui comportamento è marcatamente non lineare, rendono il problema dinamico estremamente complesso e risolvibile solo a condizione di porre ipotesi semplificative. Le soluzioni ottenute mediante la modellazione dell'interazione muro-terreno con il metodo degli elementi finiti comporta tuttavia l'introduzione di particolari elementi di giunto all'interfaccia tra il terreno e la struttura.