

# Evaluación

de los efectos inerciales de interacción dinámica  
suelo-estructura para edificaciones ubicadas en Medellín

## Juan Carlos Botero Palacio

Doctor en Ingeniería. Profesor del Departamento de Ingeniería Civil  
de la Universidad EAFIT.  
jcbotero@eafit.edu.co

## Juan Diego Jaramillo Fernández

Doctor en Ingeniería. Profesor del Departamento de Ingeniería Civil  
de la Universidad EAFIT.  
jjarami@eafit.edu.co

## Roberto Rochel Awad

Maestro en Ingeniería. Profesor del Departamento de Ingeniería Civil  
de la Universidad EAFIT.  
rrochel@eafit.edu.co



Recepción: 19 de septiembre de 2003 | Aceptación: 7 de mayo de 2004

## Resumen

Se presenta un modelo dinámico que permite evaluar la importancia de los efectos inerciales de interacción suelo-estructura (ISE) medidos en términos de la variación del período y del amortiguamiento del sistema para estructuras ubicadas en las diferentes zonas homogéneas de la ciudad de Medellín. Los resultados indican que los efectos ISE pueden ser o no favorables dependiendo de las combinaciones paramétricas que se tengan en cada zona y de las propiedades dinámicas del sistema modificadas por la presencia de los efectos ISE. La evaluación de los posibles beneficios se puede medir en función de la variación de las ordenadas espectrales.

## Palabras Claves

Interacción suelo-estructura (ISE)  
Efectos ISE  
Comportamiento dinámico

## Evaluation of the inertial effects of the soil-structure dynamic interaction for building constructions located in Medellín

### Abstract

Presenting a dynamic model that evaluates the importance of the inertial effects of soil-structure interaction (SSI) measured in terms of variation of the period and the shock absorption of the system for structures located in the different homogeneous zones of the city of Medellín. The results show that the SSI effects can be favorable or not depending on the parametrical combinations of each zone and the dynamic properties of the system that are modified by the presence of SSI effects. The evaluation of the possible benefits can be measured by the function of the variation of the spectral ordinates.

### Key Words

Soil Structure Interaction  
SSI effects  
Dynamic behavior

### Introducción



Recientemente, se han desarrollado muchas investigaciones que permiten evaluar la importancia de las condiciones de sitio y de los efectos de interacción dinámica suelo-estructura en la respuesta de estructuras apoyadas en suelos flexibles sometidas a eventos sísmicos. Cuando una onda sísmica atraviesa un estrato de suelo flexible hace que éstas se atenúen o se amplifiquen (Sánchez-Sesma, 1987) respecto a las que se tendrían en suelo firme, como resultado de fenómenos de difracción múltiple. La importancia práctica de los efectos de sitio radica en que de ellos depende la caracterización del terreno de cimentación para fines de microzonificación, la cual es fundamental en la reglamentación sísmica (Avilés y Pérez-Rocha, 1997).

Una vez que la onda sísmica llega a la base de la estructura, ésta produce en el sistema suelo-cimentación un efecto de interacción dinámico, el cual consiste en un conjunto de efectos inerciales y cinemáticos (Kausel et al., 1978) producidos en la estructura y el suelo como resultado de la flexibilidad de éste ante solicitaciones dinámicas. El alargamiento del período fundamental de vibración, el incremento o reducción del amortiguamiento, la modificación de la demanda de la ductilidad estructural, son producidos por la interacción inercial debido fundamentalmente a la inercia y elasticidad del

sistema acoplado. Por otra parte, la interacción cinemática reduce la traslación de la cimentación e induce torsión y cabeceo en ella, a la vez que filtra los componentes de alta frecuencia de la excitación, debido a la rigidez y geometría de la cimentación.

La interacción modifica los parámetros dinámicos de la estructura así como las características del movimiento del terreno en la vecindad de la cimentación. Estas variaciones pueden producir reducciones en el cortante basal, en las derivas de entrepiso y en los momentos de volteo calculados para la estructura supuesta con base indeformable, e incrementará los desplazamientos laterales (NEHRP, 1988). Cuando se logran estas reducciones, se pueden lograr diseños más económicos.

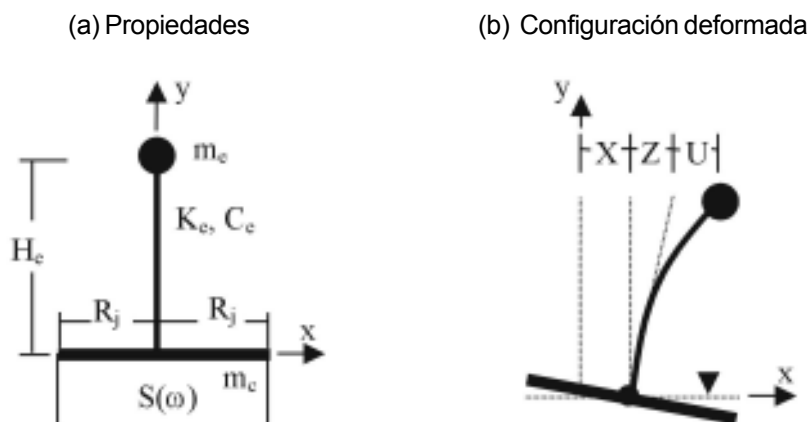
Recientemente, la norma colombiana de diseño y construcción sismo resistente (NSR-98, 1998) incluyó un capítulo que permite evaluar, con fines de diseño, la variación de las propiedades dinámicas de la estructura que interactúa con el suelo a través de su cimentación. Por tal motivo se inició una investigación con el fin de determinar, en forma preliminar, la influencia que presentan los efectos ISE en diversos tipos de sistemas estructurales ubicados en las diferentes zonas de Medellín, de tal forma que se puedan recomendar las condiciones bajo las cuales es importante considerar o despreciar dichos efectos, con miras a obtener diseños más seguros.

### 1. Modelo dinámico equivalente

Para tomar en cuenta los efectos ISE debidos a la interacción inercial en la respuesta de una estructura, se emplea un modelo que consiste en un oscilador simple en el cual se colocan resortes y amortiguadores que sustituyen el suelo a lo largo de una base infinitamente rígida. El sistema estudiado se muestra en la Figura 1, donde  $m_e$  es la masa equivalente de la superestructura asociada al modo fundamental de vibración,  $m_c$  es la masa de la

cimentación,  $H_e$  es la altura equivalente de la estructura medida de la base de la cimentación al centro de gravedad de la primera forma modal,  $K_e$  y  $C_e$  son la rigidez y el amortiguamiento de la estructura, respectivamente, y  $S(\omega)$  es la rigidez dinámica o función de impedancia del sistema suelo-cimentación dependiente de la frecuencia circular de excitación  $\omega$ . La configuración deformada está definida por la deformación de la estructura  $U$ , el desplazamiento de traslación horizontal de la base  $X$  y el desplazamiento de  $m_e$  debido al cabeceo  $Z$ .

Figura 1. Características del modelo dinámico equivalente



Como dimensiones características de la cimentación se definen:  $R_x$  como el radio horizontal asociado a los movimientos de traslación y  $R_c$  como el radio de cabeceo asociado a los efectos de rotación. Estos valores son los radios de círculos equivalentes a la superficie de desplante con igual área de contacto,  $A$ , e igual momento de inercia tomado respecto a la dirección de análisis,  $I$ , respectivamente.

#### 1.1 Ecuaciones dinámicas del movimiento

Cuando la estructura es excitada por una historia de aceleraciones en la base, ésta describe un movimiento que está gobernado por la siguiente ecuación diferencial:

$$[M] \{\ddot{P}\} + [C] \{\dot{P}\} + [K] \{P\} = -X_g \{F\} \tag{1}$$

Donde:

$$\{F\}^T = \left\{ m_e, m_e + m_c, \frac{m_e H_e + m_c D/2}{H_e} \right\} \tag{2}$$

$$\{P\}^T = \{U, X, Z\} \tag{3}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} M_{EST} & M_{EST-ISE} \\ M_{ISE-EST} & M_{ISE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_e & m_e & m_e \\ m_e & m_e + m_c & \frac{m_e H_e + m_c D/2}{H_e} \\ m_e & \frac{m_e H_e + m_c D/2}{H_e} & \frac{m_e H_e^2 + J_c}{H_e^2} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$[C] = \begin{bmatrix} C_{EST} & C_{EST-ISE} \\ C_{ISE-EST} & C_{ISE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_e & 0 & 0 \\ 0 & C_{xx} & C_{xc}/H_e \\ 0 & C_{cx}/H_e & C_{cc}/H_e^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$[K] = \begin{bmatrix} K_{EST} & K_{EST-ISE} \\ K_{ISE-EST} & K_{ISE} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_e & 0 & 0 \\ 0 & K_{xx} & K_{xc}/H_e \\ 0 & K_{cx}/H_e & K_{cc}/H_e^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$X_g$  es el componente horizontal de la excitación en la dirección de análisis,  $D$  es la altura del cajón de cimentación (igual a cero para cimentaciones superficiales);  $[M]$ ,  $[C]$  y  $[K]$  son matrices simétricas de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente.  $J_c$  es el momento polar de inercia de la cimentación.  $C_{jk}$  y  $K_{jk}$  son los valores de las constantes de amortiguamiento y rigidez que sustituyen al suelo y que están asociados a los efectos ISE, respectivamente. Los subíndices  $j$  y  $k$ , representan los diferentes componentes del movimiento ( $x$  = horizontal y  $c$  = cabeceo).

### 1.2 Evaluación de los amortiguamientos y las rigideces de la cimentación

Cuando una cimentación de masa despreciable es sometida a una excitación armónica con frecuencia circular  $\omega$ , el vector de amplitudes de fuerza asociado a los efectos ISE  $\{F_o(a_{oj})\}_{ISE}$  será igual al producto de la submatriz de rigidez dinámica o función de impedancia  $[S(a_{oj})]_{ISE}$  multiplicada por su vector de desplazamientos  $\{U_o(a_{oj})\}_{ISE}$ :

$$\{F_o(a_{oj})\}_{ISE} = [S(a_{oj})]_{ISE} \{U_o(a_{oj})\}_{ISE} \quad (7)$$

$$[S(a_{oj})]_{ISE} = [K^e]_{ISE} (k(a_{oj}) + i a_{oj} c(a_{oj})) (1 + i 2 \xi_s) \quad (8)$$

$$a_{oj} = \frac{\omega R_j}{V_s} \quad (9)$$

Donde:  $i = \sqrt{-1}$ ,  $a_{oj}$  es la frecuencia circular de excitación normalizada para cada componente del movimiento  $j$ ,  $V_s$  es la velocidad de las ondas de cortante del suelo y  $\zeta_s$  es el amortiguamiento efectivo del sitio. Cada posición de la sub-matriz de impedancia,  $S(a_{oj})_{jk}$ , es un término complejo que se obtiene al multiplicar la rigidez estática  $K_{jk}^e$ , por los factores de rigidez y amortiguamiento dinámico  $k(a_{oj})$  y  $c(a_{oj})$ , y por el factor complejo de normalización  $(1 + i2\zeta_s)$ , que intenta aislar el efecto del amortiguamiento material en dichos factores (Gazetas, 1983). La parte real de  $S(a_{oj})_{jk}$  representa la rigidez e inercia del suelo y la imaginaria el amortiguamiento material por comportamiento histerético y el amortiguamiento geométrico por radiación de ondas. Físicamente representan los resortes y amortiguadores equivalentes del suelo asociados a los efectos ISE.

$$K_{jk} = K_{jk}^e \left( k(a_{oj}) - 2\zeta_s a_{oj} c(a_{oj}) \right) \quad (10)$$

$$C_{jk} = K_{jk}^e \left( c(a_{oj}) + \frac{2\zeta_s k(a_{oj})}{a_{oj}} \right) \frac{R_j}{V_s} \quad (11)$$

Las ecuaciones 10 y 11 permiten evaluar las rigideces y amortiguamientos del sistema suelo-estructura dependientes de la frecuencia de excitación y de las características de la cimentación, a partir de la rigidez estática y de los factores de rigidez y amortiguamiento dinámico, los cuales pueden ser calculados empleando expresiones para fundaciones circulares propuestas por Kausel et al., (1978) o por Gazetas, (1983). Teniendo en cuenta que las rigideces dinámicas dependen de la frecuencia de excitación, estos valores se deben obtener mediante un proceso iterativo descrito en CFE, (1993).

### 1.3 Evaluación del período y del amortiguamiento del sistema suelo-estructura

Una vez obtenidas las constantes de amortiguamiento y rigidez que sustituyen al suelo y definidas todas las características que intervienen en el sistema suelo-estructura, es posible calcular las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, empleadas en la ecuación 1. Con estas matrices y teniendo en cuenta que nos interesa evaluar el período,  $T_{ISE}$ , y la fracción de amortiguamiento crítico,  $\xi_{ISE}$ , asociados a los

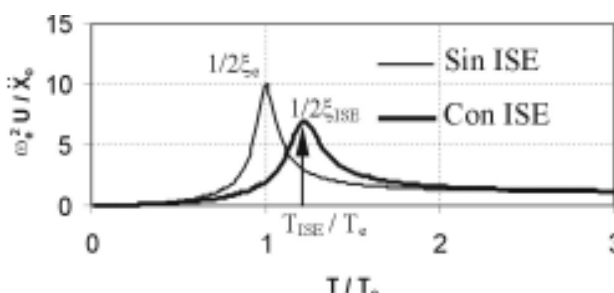
efectos ISE, como parámetros básicos de vibración del sistema, se puede emplear como excitación en la base una señal armónica, lo que implica que la respuesta del sistema también será armónica. De esta forma la ecuación dinámica del movimiento será:

$$[[K - \omega^2 [M] + i \omega [C]] \{P_o\} = -\ddot{X}_0 \{F\} \quad (12)$$

Al resolver la ecuación 12 se define la función de transferencia para movimiento del sistema equivalente, en donde el primer término del vector de solución corresponde a la amplitud de la deformación de la estructura,  $U$ . Al multiplicar este valor por el cuadrado de la frecuencia circular de la estructura,  $\omega_e$ , se obtiene la pseudoaceleración de la masa de la estructura.

Si se gráfica en las ordenadas la pseudoaceleración normalizada respecto a la amplitud de la aceleración del terreno ( $\omega_e^2 U/X_0$ ) y en las abscisas el período de la excitación normalizado respecto al período de la estructura apoyada en suelo firme ( $T/T_e$ ), se puede definir exactamente el período,  $T_{ISE}$ , y el amortiguamiento de sistema suelo-estructura,  $\xi_{ISE}$ , tal como se ilustra en la Figura 2.

**Figura 2.** Funciones de transferencia de un sistema equivalente con y sin interacción



Las frecuencias y amplificaciones resonantes de la función de transferencia, están asociadas al período y al amortiguamiento efectivos de la estructura interactuando con el suelo, respectivamente. El período y el amortiguamiento efectivo puede interpretarse como los parámetros dinámicos de un oscilador equivalente, en donde su cortante basal resonante es igual al de la estructura del sistema equivalente empotrado en su base, para la misma excitación armónica (CFE, 1993).

Una vez definidas las propiedades del modelo dinámico a utilizar, es necesario establecer cuales son las características que más influyen en la respuesta de sistemas estructurales susceptibles a la ocurrencia de los efectos ISE.

## 2. Parámetros de interacción suelo-estructura

Para conocer la influencia de los parámetros que gobiernan la respuesta estructural de edificios y determinar las características del sistema suelo-estructura que más amplifican los efectos ISE, se hace necesario realizar un estudio paramétrico mediante el uso de las funciones de transferencia, que evalúen las variaciones del período y del amortiguamiento de edificios que presentan efectos ISE, respecto a los que presentaría la misma estructura sin considerar dicho efecto.



### 2.1 Definición de parámetros adimensionales

Cuando se presenta efectos ISE es posible emplear los parámetros adimensionales que gobiernan la repuesta dinámica de edificios apoyados en suelos flexibles (Wolf, 1994; Avilés y Pérez-Rocha, 1996). Estos valores fueron definidos para cimentaciones circulares de radio  $R$ . Para aplicar estos parámetros a cimentaciones rectangulares es necesario que la relación de aspecto definida como el cociente entre la dimensión mayor,  $L$ , y la menor,  $B$ , sea inferior a 4 (Wolf, 1994). Los parámetros adimensionales que intervienen en la respuesta de sistemas suelo-estructura son:

**Relación de masas,  $R_M$ :** Es el cociente entre la masa de la cimentación,  $m_c$ , y la de la estructura,  $m_e$ , el cual puede variar entre 0 y 0.5. Para cimentaciones superficiales apoyadas en un semi-espacio y dentro de los intervalos de interés en edificios, las respuestas estructurales son insensibles a las variaciones de este parámetro (Veletsos y Meek, 1974). Esta afirmación también resulta ser válida para cimentaciones embebidas en un suelo estratificado (Avilés y Pérez-Rocha, 1996).

$$R_M = \frac{m_c}{m_e} \quad (13)$$

**Densidad relativa,  $\rho_r$ :** Es la relación entre la densidad de la estructura y la del suelo,  $\rho_r$ , y varía entre 0.1 y 0.2. Veletsos y Meek (1974) sugieren un

$\rho_R$  igual a 0.15, como valor razonable para cimentaciones superficiales apoyadas en un semi-espacio. Avilés y Pérez-Rocha (1996), consideran que este valor también es representativo para cimentaciones embebidas apoyadas en estratos de suelo. La variación de este parámetro tiene poca influencia en la respuesta de sistemas suelo-estructura (Veletsos, 1977).

$$\rho_R = \frac{m_e}{\rho_s \pi R^2 H_e} \quad (14)$$

**Relación de momentos de inercia,  $R_{MJ}$ :** Se define como el cociente entre el momento de inercia de la masa de la cimentación y el de la estructura. Por lo general, este parámetro es menor a 0.1 y tampoco influye notoriamente en la respuesta del sistema (Avilés y Pérez-Rocha, 1996):

$$R_{MJ} = \frac{J_c}{M_e (H_e + D)^2} \quad (15)$$

**Coefficientes de amortiguamiento,  $\xi_e$  y  $\xi_s$ :** Es la fracción del amortiguamiento crítico de la estructura,  $\xi_e$ , y del suelo,  $\xi_s$ . Su influencia en la respuesta de sistemas suelo-estructura es determinante. Su intervalo puede variar entre 1 y 20 por ciento tanto para el suelo como para la estructura (Novak y Hifnawy, 1983; Murià-Vila y Toro, 1998; Celebi, 1998), siendo el 5 por ciento un valor usualmente empleado.

**Relación de Poisson,  $\nu$ :** La respuesta de sistemas suelo-estructura depende significativamente de este parámetro y los valores típicos son de 0.33 para suelos granulares y de 0.45 para suelos plásticos. Sin embargo, Bishop y High (1977) recomiendan valores de esta relación cercanos a 0.5 para análisis de sistemas sometidos a eventos sísmicos, ya que por la alta velocidad con que se aplican las fuerzas, el suelo responde bajo una condición no-drenada, lo cual se asemeja a un suelo incompresible.

**Profundidad relativa,  $P_R$ :** Es el cociente entre la profundidad del estrato de suelo,  $H_{\text{estrato}}$ , y el radio

de la cimentación equivalente,  $R$ . Los efectos de sitio en la interacción inercial son parcialmente función de este parámetro. Su intervalo de variación se encuentra comprendido entre 2 y 10.

$$P_R = \frac{H_{\text{estrato}}}{R} \quad (16)$$

**Profundidad de desplante,  $P_D$ :** Es la relación entre la profundidad embebida de la cimentación,  $D$ , y el radio de la cimentación equivalente,  $R$ . El alargamiento del período y el aumento del amortiguamiento de estructuras con base flexible son función decreciente de este parámetro y su variación está entre 0 y 1.

$$P_D = \frac{D}{R} \quad (17)$$

**Relación de esbeltez,  $R_E$ :** Es la relación entre la altura de la estructura,  $H_e$ , y el radio de la cimentación equivalente,  $R$ . Sus valores típicos varían entre 2 y 5. Su influencia en la respuesta de sistemas suelo-estructura es fundamental. El período y el amortiguamiento del sistema son funciones crecientes y decrecientes de este parámetro, respectivamente. Este parámetro es directamente proporcional al período de la estructura y su relación depende del sistema estructural del edificio.

$$R_E = \frac{H_e}{R} \quad (18)$$

**Rigidez relativa,  $R_R$ :** Es la relación entre la rigidez relativa de la estructura y el suelo, la cual puede variar entre 0 y 2; para valores menores a 0.2, los efectos de la interacción inercial son despreciables.

$$R_R = \frac{H_e T_s}{H_{\text{estrato}} T_e} = \frac{R_E T_s}{P_R T_e} \quad (19)$$

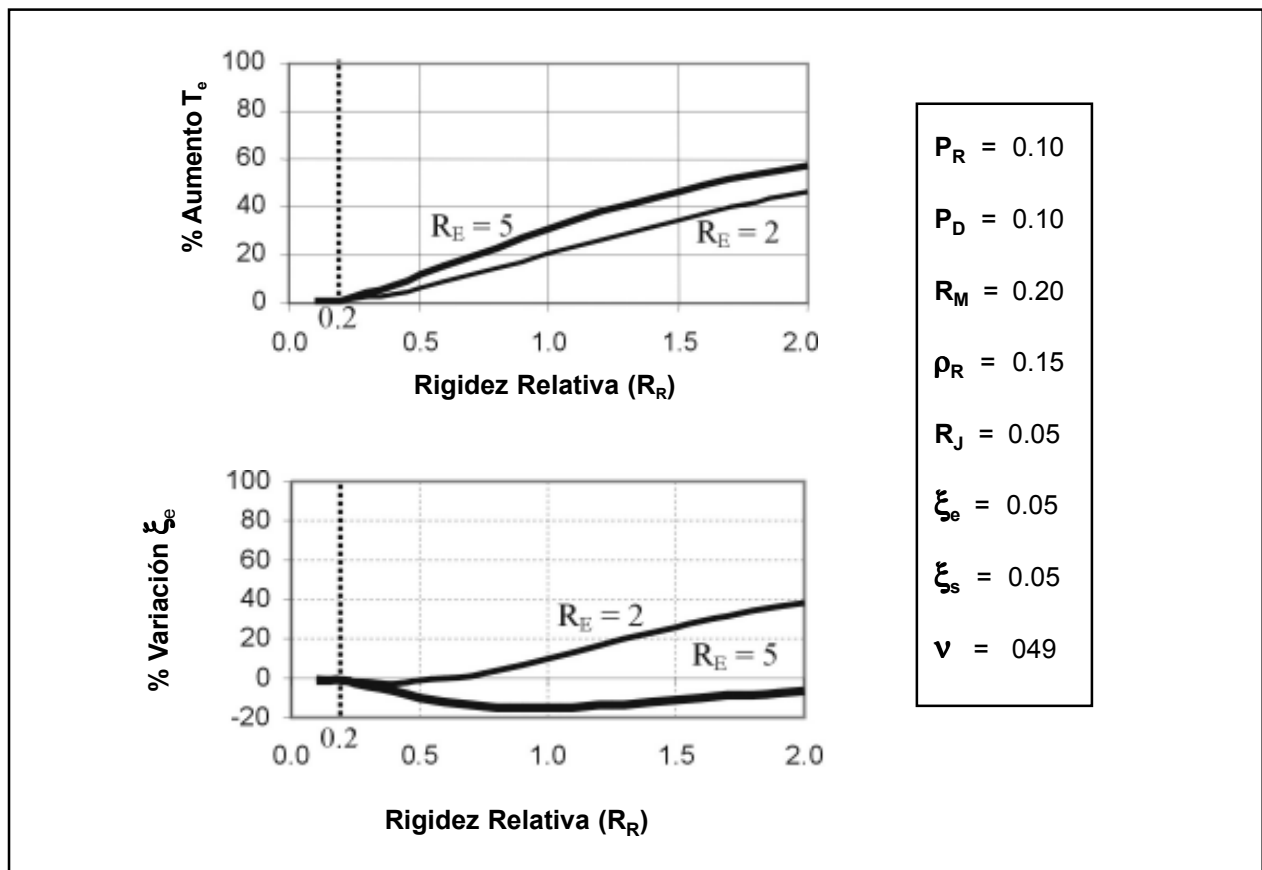
Donde  $T_s$  es el período dominante del sitio. La influencia de  $R_R$  en la respuesta de sistemas suelo-estructura es determinante y permite medir la importancia de la interacción inercial. A medida que aumenta el valor de  $R_R$ , los efectos inerciales ISE son mayores. Además, establece la proporcionalidad

entre el período de la estructura con base rígida,  $T_e$ , y su altura,  $H_e$ , lo cual implica que la relación de esbeltez,  $R_E$ , es variable en función de  $T_e$ . Esto permite representar estructuras con diferentes sistemas estructurales. También es posible modelar un edificio desplantado sobre diferentes tipos de suelo, ya que al disminuir la rigidez del sistema suelo-estructura, el valor de  $R_R$  aumenta (Botero, 1999).

### 2.2 Importancia de los efectos ISE en función del período y del amortiguamiento del sistema

Para evaluar la importancia de los efectos ISE, tomando como referencia la variación del período y del amortiguamiento, se evalúa el parámetro de rigidez relativa  $R_R$  (Figura 3). Si  $R_R$  resulta ser menor a 0.20, entonces los efectos ISE se pueden despreciar (Avilés y Pérez-Rocha, 1996), debido a que el período del sistema por efectos de la flexibilidad del suelo sólo aumenta en un cinco por ciento, aproximadamente. De igual forma se ve que para el mismo valor de  $R_R$  (0.20) el amortiguamiento de la estructura por efectos de la flexibilidad del suelo se reduce en un uno por ciento aproximadamente.

Figura 3. Porcentaje de variación de  $T_e$  y  $\xi_e$  en función de  $R_R$





### 2.3 Valores paramétricos asociados a las características geotécnicas de la ciudad de Medellín

Para la ciudad de Medellín se decidió tomar como referencia las 14 diferentes zonas homogéneas descritas en los estudios de microzonificación (EAFIT et al., 1999). Teniendo en cuenta que se pretende definir de manera sencilla los valores paramétricos que rigen la respuesta de sistemas suelo-estructura asociados a las zonas geotécnicas de Medellín para las cuales los efectos ISE son apreciables, se seleccionó un rango de valores de  $T_s$ ,  $H_{\text{estrato}}$  y  $V_s$ , que representan un estrato de suelo equivalente asociado a su primer modo de vibración. Aunque este rango de valores es amplio, permitirá evaluar inicialmente las condiciones bajo las cuales se deben considerar los efectos ISE.

### 2.4 Valores paramétricos asociados a las características de estructuras típicas de Medellín

Con los parámetros que influyen en la respuesta de sistemas suelo-estructura y las condiciones geotécnicas de la ciudad de Medellín, se seleccionaron valores típicos de los parámetros que permitan caracterizar diversas estructuras ubicadas en Medellín, los cuales se presentan en la tablas 1 y 2.

Debido a la poca influencia que presenta la relación de masas, la densidad relativa y la relación de momentos de inercia en la respuesta de un sistema suelo-estructura, sólo se utilizarán valores representativos congruentes con estructuras típicas construidas en el medio. Los amortiguamientos del suelo y de la estructura fueron seleccionados teniendo en cuenta que son valores usualmente empleados en análisis dinámicos. El coeficiente de Poisson asumido es muy cercano al que corresponde a una condición no-drenada del suelo. Los anteriores parámetros se pueden ver en la tabla 1.

**Tabla 1.** Valores paramétricos constantes de estructuras típicas de Medellín

Parámetro	Valor
Relación de masas	0.15
Densidad relativa	0.15
Relación de momentos de inercia	0.01
Amortiguamiento del suelo	0.05
Amortiguamiento de la estructura	0.05
Coficiente de Poisson	0.49

**Tabla 2.** Rango de valores paramétricos y períodos de sitio para estructuras típicas de Medellín

Zona	$P_R$		$R_D$		$R_E$		$T_s$		$R_R$	
	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior
1	2	5	0.1	0.3	1	3	0.10	0.55	0.05	2.06
2	2	5	0.1	0.3	1	3	0.20	0.35	0.10	1.31
3	3	8	0.1	0.3	1	3	0.20	0.65	0.06	1.63
4	2	5	0.1	0.3	1	3	0.10	0.60	0.05	2.25
5	3	8	0.1	0.5	1	5	0.10	0.55	0.03	1.37
6	1	8	0.1	0.5	1	5	0.10	0.45	0.03	3.36
7	1	4	0.1	0.5	1	5	0.10	0.55	0.06	4.10
8	2	6	0.1	0.3	1	3	0.10	0.70	0.04	2.63
9	2	6	0.1	0.3	1	3	0.10	0.50	0.04	1.88
10	2	6	0.1	0.3	1	3	0.10	0.45	0.04	1.69
11	3	8	0.1	0.3	1	3	0.10	0.60	0.03	1.50
12	3	8	0.1	0.5	1	5	0.15	0.65	0.03	1.44
13	3	8	0.1	0.5	1	5	0.10	0.45	0.02	1.00
14	1	4	0.1	0.5	1	5	0.10	0.50	0.04	3.33

Teniendo en cuenta que las profundidades relativas y de desplante, y las relaciones de esbeltez y de rigidez relativa, son parámetros determinantes en la respuesta de sistemas suelo-estructura, se definieron los rangos de valores de las características más comunes de las estructuras construidas en las diferentes zonas de Medellín (ver tabla 2). Para definir el rango de  $T_s$ , se asumió como extremo inferior el período donde comienza la meseta de los espectros de diseño definidos en la microzonificación sísmica de Medellín y como extremo superior el 90 por ciento de los períodos donde termina dicha meseta (EAFIT et al., 1999).

Los valores de  $P_R$ ,  $P_D$  y  $R_E$ , fueron definidos a partir de los diversos tipos de construcción existentes en cada zona. Los posibles valores de  $R_R$  se calcularon empleando la ecuación 19 y se tomó en cuenta las posibles combinaciones entre los parámetros  $P_R$ ,  $R_E$ ,  $T_s$  y  $T_e$ . Con el valor de  $R_R$  es posible observar que los efectos ISE pueden ser importantes para ciertos tipos de estructuras ubicadas en las diferentes zonas homogéneas de Medellín, tal como se describió anteriormente.

### 3. Resultados obtenidos

Para evaluar la importancia de los efectos ISE se elaboró un programa de cómputo basado en la solución rigurosa descrita en CFE (1993), la cual resuelve la ecuación 12 y calcula el período,  $T_{ISE}$ , y el amortiguamiento del sistema,  $\xi_{ISE}$ , cuando la estructura se apoya en un suelo flexible.

#### 3.1 Definición de valores paramétricos básicos

Con base en los valores paramétricos definidos en la tabla 2, se establecieron valores únicos, de tal forma que pudieran abarcar todas las características presentes en las 14 zonas homogéneas de Medellín. Estos valores son mostrados en la tabla 3.

En esta tabla se diferencian los valores de períodos de la estructura en función de la relación de esbeltez, debido a que al aumentar este parámetro la estructura tiende a ser más flexible y por lo tanto el  $T_e$  puede incrementarse.

**Tabla 3.** Selección de valores paramétricos y períodos  $T_e$  y  $T_e$

Parámetro	Valor
Profundidad relativa	2.00 – 5.00 – 8.00
Profundidad de desplante	0.10 – 0.30 – 0.50
Relación de esbeltez	1.00 – 3.00 – 5.00
Período del sitio	0.20 – 0.40 – 0.80
Período de la estructura con $R_E = 1.0$	0.10 – 0.35 – 0.50
Período de la estructura con $R_E = 3.0$	0.35 – 0.75 – 1.00
Período de la estructura con $R_E = 5.0$	0.75 – 1.25 – 1.50

#### 3.2. Resultados obtenidos

Teniendo en cuenta que existen varias zonas homogéneas que presentan valores paramétricos similares, fue posible establecer cuatro grupos semejantes:

**Grupo A.** Se reúnen las zonas en donde las estructuras alcanzan relaciones de esbeltez, profundidades de desplante y profundidades relativas iguales a 3, 0.3 y 5, respectivamente, y la rigidez relativa es cercana a 2.0. En este grupo están las zonas homogéneas 1 (Noroccidental), 4 (Flujos del sector occidental), 8 (Suelos residuales de dunita parte baja) y 9 (Suelos residuales de anfibolita). Es importante mencionar que en este grupo se pueden alcanzar valores de rigidez relativa mayores a 2.0, por lo que los porcentajes de variación del período y del amortiguamiento podrían aumentar.

**Grupo B.** En este grupo se asocian las zonas en donde las estructuras alcanzan relaciones de esbeltez y profundidades de desplante iguales a 3 y 0.3, respectivamente, y la rigidez relativa es cercana a 1.5. Este grupo está conformado por las zonas homogéneas 2 (Neis), 3 (Granodiorita), 10 (Suelos residuales de dunita parte alta) y 11 (Margen izquierda de la quebrada Santa Elena).

**Grupo C.** En este grupo se relacionan las zonas en donde las estructuras pueden alcanzar relaciones de esbeltez y profundidades de desplante iguales a 5 y 0.5, respectivamente, y la rigidez relativa es superior a 2.0. Este grupo está formado por las zonas homogéneas 6 (Depósitos aluviales gruesos), 7 (Depósitos aluviales finos - sector oriental) y 14 (Flujos parte baja de El Poblado).

**Grupo D.** En este grupo se reúnen las zonas en donde las estructuras alcanzan relaciones de esbeltez y profundidades de desplante iguales a 5 y 0.5, respectivamente, y la rigidez relativa es cercana a 1.5. Este grupo está formado por las zonas 5 (Depósitos aluviales finos-margen izquierda río Medellín), 12 (Transición anfibolita-gabro) y 13 (Flujos parte alta de El Poblado).

En la tabla 4 se presenta para cada grupo cuatro combinaciones paramétricas en las cuales se alcanzan las mayores variaciones del período del sistema. Para el grupo A se observa que el período de la estructura con base rígida puede aumentar hasta un 48.98 por ciento, y el amortiguamiento puede reducirse en un 12.36 por ciento o aumentar en un 8.26 por ciento. Los resultados obtenidos para el grupo

B muestran que el período de la estructura aumenta hasta un 38.27 por ciento, y el amortiguamiento puede reducirse en un 14.94 por ciento o aumentar en un 2.91 por ciento. Para el grupo C el período de la estructura,  $T_e$ , puede incrementarse hasta un 56.33 por ciento y el amortiguamiento puede disminuir en un 9.89 por ciento. Por último, en el grupo D las variaciones del período de la estructura con base rígida, por efectos ISE, pueden alcanzar valores del 45.65 por ciento y el amortiguamiento se puede reducir en un 13.64 por ciento

De los resultados mostrados en la tabla 4 se hace evidente que para valores altos de  $R_R$ , el sistema se hace más flexible, logrando incrementos en el período cercanos al 50 por ciento ( $R_R$  igual a 2). Para un mismo conjunto de parámetros, se puede observar que al aumentar  $P_D$ , se tienen menores valores del porcentaje de variación del período y al disminuir  $P_R$  se reducen los incrementos del período. Es importante mencionar que al aumentar el período de la estructura las ordenadas espectrales pueden disminuir, pero al reducirse el amortiguamiento, dichas ordenadas tienden a aumentar. Solamente combinando estos efectos se podrá determinar si los efectos ISE pueden ser benéficos en términos de las variaciones de las ordenadas espectrales o bien en función del cortante basal.

Con base en los anteriores resultados se puede determinar en forma preliminar que los efectos ISE, medidos en términos de la variación del período y del amortiguamiento de la estructura, pueden llegar a ser importantes, dependiendo de la combinación de los valores paramétricos y de los aumentos o reducciones que se generen en las ordenadas espectrales, producto de las variaciones del período y del amortiguamiento del sistema suelo-estructura. Teniendo en cuenta que estos resultados son preliminares, es importante profundizar este estudio con el fin lograr una mejor definición de las relaciones paramétricas de cada zona homogénea definida en los estudios de microzonificación de Medellín. Además, es necesario incluir otros tipos de cimentaciones, como son edificios soportados por zapatas o grupo de pilotes, de tal forma que se puedan obtener propiedades dinámicas más realistas que representen las estructuras existentes en la ciudad de Medellín.

**Tabla 4.** Mayores variaciones del  $T_e$  y  $\xi_e$  para estructuras del grupo A con  $R_R = 2.0$

GRUPO	$P_R$	$P_D$	$R_E$	% $T_e$	% $\xi_e$
A	5	0.1	3	48.98	8.26
	2	0.1	3	47.64	-11.11
	5	0.3	3	44.75	6.54
	2	0.3	3	42.86	-12.36
B	8	0.1	3	38.27	2.91
	5	0.1	3	37.89	1.96
	2	0.1	3	36.31	-14.94
	8	0.3	3	34.21	1.96
C	8	0.1	5	56.33	-3.09
	5	0.1	5	56.14	-7.50
	2	0.1	5	54.75	-9.89
	8	0.5	5	48.72	-7.53
D	8	0.1	5	45.65	-7.53
	2	0.1	5	43.82	-13.64
	8	0.5	5	37.50	-12.36
	2	0.5	5	34.21	-12.36

### 3.4 Ejemplo de aplicación

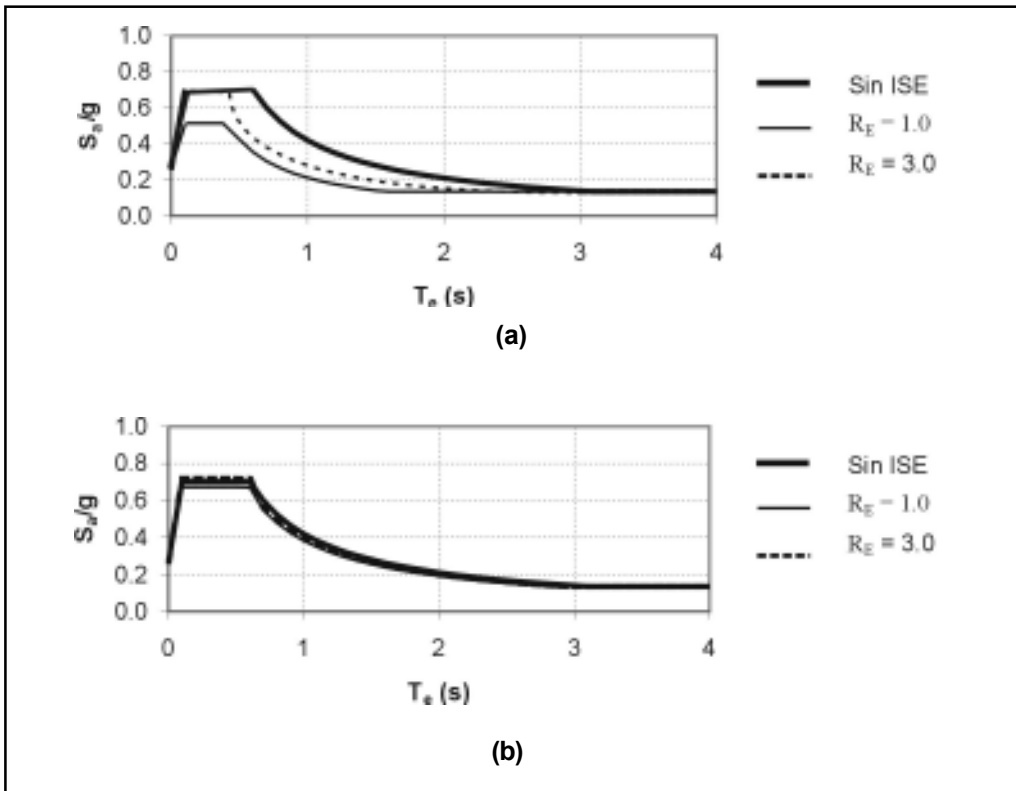
Para ilustrar las modificaciones que puede sufrir un espectro de diseño debido a la presencia de efectos ISE, se tomó como ejemplo el espectro de diseño de la zona homogénea 1 (Noroccidental) sugerido por la microzonificación de Medellín (EAFIT et al., 1999) y se obtuvo el espectro modificado por efectos ISE. Las ordenadas del espectro modificado por efectos ISE,  $S_{a\ ISE}$ , fueron obtenidas mediante la metodología recomendada por NEHRP (1988), la cual fue adoptada por la NSR-98 (1998):

$$S_{a\ ISE} = S'_a \left( \frac{\xi_e}{\xi_{ISE}} \right)^{0.4} \quad (20)$$

Donde:  $S'_a$  es la ordenada espectral obtenida mediante el empleo del período modificado por ISE,  $T_{ISE}$ ,  $\xi_e$  y  $\xi_{ISE}$  corresponden al amortiguamiento de la estructura empotrada en la base y al amortiguamiento del sistema suelo-estructura, respectiva-

mente. En la ecuación 20 se puede observar que si el período de la estructura aumenta por efectos de la flexibilidad del suelo a un valor mayor que el período asociado a la finalización de la plataforma del espectro, la ordenada espectral  $S'_a$  se reducirá. Además, si el amortiguamiento del sistema suelo-estructura aumenta, entonces la ordenada espectral asociada a los efectos ISE,  $S_{a\ ISE}$ , necesariamente disminuirá.

El anterior efecto se hace evidente en la Figura 4(a), en la cual se compara el espectro de diseño definido para la zona homogénea 1 y los espectros obtenidos por ISE para sistemas con diferentes valores de  $R_E$ . Para este caso, el amortiguamiento del sistema aumento del 5 al 11.2 y al 5.1 por ciento, para relaciones de esbeltez iguales a 1 y 3, respectivamente. En esta gráfica se ve que se pueden lograr reducciones cercanas al 50 por ciento, aproximadamente, en las ordenadas espectrales de diseño. También se puede ver que en estructuras que tienen periodos largos, los efectos ISE no son apreciables.

**Figura 4.** Variación del espectro de diseño de la zona homogénea 1

Para un caso similar al anterior, se puede ver que si el período de la estructura aumenta por efectos ISE a un valor que es menor que el período asociado a la finalización de la plataforma del espectro, la ordenada espectral  $S'_a$  no se modificará. Además, si el amortiguamiento del sistema suelo-estructura se reduce, entonces la ordenada espectral asociada a los efectos ISE,  $S_{a\text{ISE}}$ , necesariamente aumentará.

El anterior efecto se muestra en la Figura 4(b), en la cual se muestran los espectros modificados por ISE, de sistemas con relaciones de esbeltez iguales a 1 y 3, en donde el amortiguamiento estructural aumento del 5 al 5.6 por ciento y se redujo del 5 al 4.7 por ciento, respectivamente.

En esta gráfica se ve que se pueden lograr reducciones en las ordenadas espectrales de diseño cercanas al 10 por ciento, aproximadamente. Sin embargo, también se observan aumentos cercanos al 2.5 por ciento, aproximadamente, siendo este último un efecto desfavorable en el diseño de estructuras susceptibles a la presencia de efectos ISE. Esto nos indica que los efectos ISE pueden ser o no favorables, dependiendo de las combinaciones paramétricas y de las propiedades dinámicas del sistema modificadas por la presencia de los efectos ISE. La variación de las características dinámicas del conjunto suelo-estructura pueden ocasionar aumentos o reducciones en las ordenadas espectrales, que modificará en forma proporcional el cortante basal y obviamente el costo total de la estructura, ya que este valor es el que controla el diseño sísmico de una estructura.



## Conclusiones

En la presente investigación se realizaron estudios analíticos que permiten evaluar la importancia de los efectos inerciales de interacción suelo-estructura (ISE) debido a la flexibilidad del suelo para estructuras ubicadas en la ciudad de Medellín.

Se estableció un modelo matemático de un oscilador simple que considera los movimientos de traslación y rotación en la base generados por la flexibilidad del suelo ante cualquier tipo de movimiento. Este modelo evalúa los parámetros dinámicos de un sistema suelo-estructura expresados en términos del período y del amortiguamiento mediante el uso de la función de transferencia.

Se presentaron los diferentes parámetros que controlan la respuesta de sistemas suelo-estructura y se definió la importancia de cada uno de ellos en la variación del período y amortiguamiento del sistema.

Se definieron para cada zona homogénea de Medellín los posibles valores paramétricos que se pueden encontrar en los diferentes sitios de la ciudad. Con base en estos valores fue posible agrupar las 14 zonas homogéneas en cuatro grupos con propiedades semejantes.

Para evaluar la importancia de los efectos ISE se elaboró un programa de cómputo basado en los procedimientos descritos en CFE (1993) que permite calcular la variación del período y del amortiguamiento de la estructura cuando ésta se apoya en un suelo flexible. El programa realiza un análisis paramétrico y establece la importancia de los efectos ISE en términos de la variación del período de la estructura apoyada en suelo rígido.

Con base en los resultados obtenidos se puede determinar en forma preliminar que los efectos ISE, pueden ser o no favorables dependiendo de las combinaciones paramétricas que se tengan en cada zona homogénea y de las propiedades dinámicas del sistema modificadas por la presencia de los efectos ISE.

La variación de las características dinámicas del conjunto suelo-estructura pueden ocasionar aumentos o reducciones en las ordenadas espectrales, los cuales modificarán en forma proporcional el cortante basal y obviamente el costo total de la estructura.

Teniendo en cuenta que estos resultados son preliminares es importante profundizar este estudio con el fin lograr una mejor definición de las relaciones paramétricas de cada zona homogénea definida en los estudios de microzonificación de Medellín.

Se ilustró mediante un ejemplo práctico la variación que se puede presentar en el espectro de diseño cuando se consideran los efectos ISE. En este caso se pudieron observar reducciones cercanas al 50 por ciento en estructuras con períodos cortos, lo cual implica una disminución importante en el cortante basal de la estructura y consecuentemente en el costo total de la edificación. En estructuras con períodos largos los efectos ISE son prácticamente despreciables. También se pudo ilustrar casos en los cuales se detectaron aumentos en las ordenadas espectrales cercanos al 2.5 por ciento, aproximadamente, siendo este último un efecto desfavorable en el diseño de estructuras susceptibles a la presencia de efectos ISE.

Los resultados obtenidos en la presente investigación constituyen sólo un punto de partida de varios proyectos los cuales deben encaminarse al entendimiento del comportamiento dinámico de sistemas estructurales con el claro objetivo de lograr diseños de edificios más económicos y seguros.

## Bibliografía

Avilés J. y Pérez-Rocha L. E. (1996). "Evaluation of interaction effects on the system period and the system damping due to foundation embedment and layer depth". En: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 15. pp. 11-27.

Avilés J. y Perez-Rocha L. E. (1997). "Efectos de sitio e interacción suelo-estructura en el valle de México", XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Veracruz, México. Tomo 2. pp. 1215-1225.

Botero J. C. (1999). "Efectos de interacción suelo-estructura considerando la flexibilidad del suelo y el desprendimiento parcial de la cimentación". Tesis doctoral, UNAM, México.

Bishop A. W. y Hight D. W. (1977). "The value of poisson's ratio in saturated soils and rocks stressed under undrained conditions". En: *Geotechnique* 27. No. 3. pp. 369-384.

Celebi M. (1998), "Radiation damping observed from recorded seismic responses of buildings", 11<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Paris.

CFE, (1993) "Manual de diseño de obras civiles. Diseño por sismo", Sección C, Tomo I, Tema 1, Capítulo 3, México D.F.

EAFIT, INTEGRAL, INGEOMINAS y UNIVERSIDAD NACIONAL (1999). "Instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de Medellín". Informe ejecutivo, Municipio de Medellín - SIMPAD.

Kausel E., Whitman R. V., Morray J. P. y Elsabee F. (1978). "The spring method for embedded foundations". En: *Nuclear Engineering and Design*. Vol. 48. pp. 377-392.

Murià-Vila D. y Toro A. M. (1998). "Effects of several events recorded at a building founded on soft soil". 11<sup>th</sup> European Conference on Earthquake Engineering, Paris.

NEHRP, (1988). "Recommended provisions for the development of seismic regulations for new buildings". Federal Emergency Management Agency. Chapter 6. pp. 63-71.

Novak M. y El Hifnawy L. (1983). "Effects of soil-structures interaction on damping of structures". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 11. pp. 595-621.

NSR-98 (1998). "Normas colombianas de diseño y construcción sismo resistente". AIS, Ley 400 de 1997, Colombia.

Sánchez-Sesma F. J. (1987). "Site effects on strong ground motion". En: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*. Vol. 6. No. 2. pp. 124-132.

Veletsos A. S. y Meek J. W. (1974). "Dynamic behaviour of building-foundation system". En: *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. Vol. 3. pp. 121-138.

Veletsos A. S. (1977). "Dynamics of structure-foundation systems". *Structural and Geotechnical Mechanics*. New Jersey: Prentice-Hall.

Wolf J.P. (1994). "Foundation vibration analysis using simple physical models". Prentice Hall.