

# Propuesta de una metodología para el análisis dinámico de sistemas de fundación de pilas

## Rodrigo Osorio Mora

Profesor titular de la Universidad EAFIT. Ingeniero Constructor en suelos y Cimentaciones.  
riosorio@eafit.edu.co

## Carlos Andrés Cano Martínez

Ingeniero Civil. Asistente de investigación de la Universidad EAFIT.  
geodyn@epm.net.co

## Juan Fernando Mesa

Especialista en Mecánica de suelos y Cimentaciones.  
Ingeniero y socio de la firma Ingenieros Civiles Consultores.  
icc@epm.net.co

## Ricardo González Williamson

Ingeniero consultor. Especialista en Mecánica de suelos y Cimentaciones.  
rgonzal1@eafit.edu.co



Recepción: 01 de diciembre de 2004 | Aprobación: 22 de abril de 2005

## Resumen

Debido a la incertidumbre en la práctica tradicional para el análisis dinámico de sistemas de fundación de pilas, la Universidad EAFIT adelantó una investigación denominada *Propuesta de una metodología para la obtención de parámetros dinámicos de suelos en zonas de condiciones difíciles (laderas)*, con el fin de estudiar la respuesta dinámica de pilas de diferentes diámetros, emplazadas en tres perfiles geotécnicos diferentes, conformados por depósitos pertenecientes a la vertiente sur oriental de la ciudad de Medellín (Colombia). Aunque en este artículo sólo se presentan los resultados obtenidos en uno de los tres perfiles estudiados, se propone una metodología de diseño simplificada para la determinación del diámetro de pila adecuada a las solicitaciones impuestas. El desarrollo de la investigación contempló, en particular, la caracterización del comportamiento tensión-deformación del suelo bajo solicitaciones cíclicas en el equipo triaxial cíclico, bajo esfuerzo controlado.

## Palabras Clave

Módulo de elasticidad dinámico (Ed)  
Pila  
Análisis inercial  
Amortiguamiento  
Análisis cinemático  
Matriz de rigidez  
Flujo de lodo

## Proposition of a methodology for the dynamic analysis of pile foundation systems

### Abstract

Due to the existing uncertainties on traditional practice for dynamic analysis of piles foundation systems, EAFIT University carried out a research denominated *Proposal of a methodology for the obtaining of dynamic ground parameters in zones of difficult conditions (slopes)*, with the purpose of studying the dynamic response of a pile with different diameters in three different geotechnical profiles located in the South Eastern slope of the city of Medellín (Colombia), although in this article only appears the results obtained in one of the three profiles studied, and therefore proposing a simplified design methodology for the determination of the adapted pile diameter to the imposed requirements. The development of the research covered, particularly, the characterization of the behavior - tension deformation of ground under cyclical requirements in the cyclical three-dimensional equipment under controlled effort.

### Key Words

Dynamic elasticity module  
Pile  
Inertial analysis  
Sock absorption  
Kinematics analysis  
Rigidity matrix  
Mud flow

### Introducción



En las laderas circundantes que encierran al Valle de Aburrá se han venido efectuando proyectos urbanísticos en los que las edificaciones poseen alturas importantes para el medio geotécnico de la ciudad de Medellín, hecho que cobra bastante importancia ya que las fundaciones de estas construcciones, generalmente pilas profundas, se encuentran emplazadas en suelos y/o rocas con disposición heterogénea, como depósitos gravitacionales, flujos de lodos y escombros, depósitos aluvio-torrenciales, suelos residuales resistentes, entre otros; los cuales se caracterizan porque su comportamiento es de difícil evaluación e interpretación, debido fundamentalmente, a la composición de los geomateriales mencionados y a las peculiaridades topográficas del terreno.

Los diferentes tipos de estudios que se ejecutan en el medio para delimitar las dimensiones y características mecánicas de las fundaciones dejan, en ciertos casos, una sensación de incertidumbre en aspectos referentes a las solicitaciones convencionales de la fundación (profundidad de desplante, capacidad de carga o magnitud de los empujes horizontales), los parámetros dinámicos

del suelo (rigidez, amortiguamiento y degradación), así como en la respuesta estructural del sistema fundación-estructura, ya que en algunos trabajos no se aprecian diferencias significativas al evaluar la geometría de las fundaciones profundas, y sobre todo en lo referente al diámetro de las pilas, en relación con la altura de las edificaciones.

Estas razones permiten pensar que en el medio geotécnico de la ciudad de Medellín, no se practica una metodología clara de diseño de fundación de edificaciones emplazadas en laderas, que involucre, por un lado, la obtención de los parámetros dinámicos del suelo, y por otro, que integre en el análisis estructural de la edificación dichos parámetros; situación que podría disminuir, de forma considerable la incertidumbre en cuanto al comportamiento del sistema suelo-fundación-estructura.

### 1. Características geológicas del sitio

El sitio estudiado se encuentra localizado sobre la vertiente oriental del valle de Aburrá, en la jurisdicción del municipio de Medellín en el barrio Los Balsos No. 1, en el interior del cual afloran

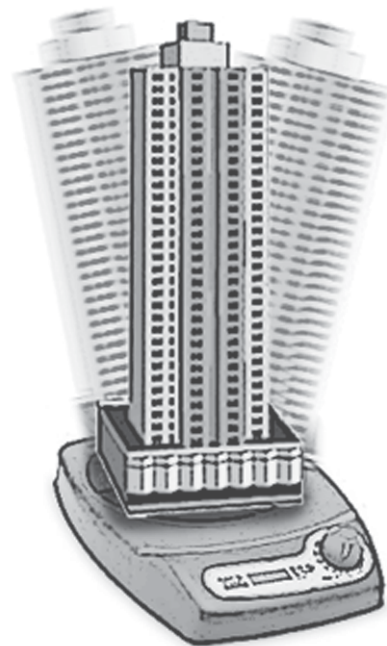
suelos y rocas en forma de depósitos de vertiente pertenecientes a varias unidades litológicas, ya que es posible encontrar materiales como anfibolitas, gabros, dunitas, neises y esquistos. Las anfibolitas y los gabros pertenecen a las unidades Anfibolitas de Medellín y Stock de San Diego, respectivamente; las dunitas pertenecen a la unidad denominada como Dunitas de Medellín (Restrepo y Toussaint, 1984). En la zona de contacto y debido posiblemente a un cabalgamiento de las dunitas sobre las anfibolitas, se generaron esquistos actinolíticos, cloríticos y talcosos. La dunita, es de tipo metamórfica debido a que presenta foliación y plegamiento, es maciza, masiva y finogranular, lo que dificulta una descripción mineralógica detallada; pero los rasgos observables permiten describirla como una roca holocristalina, no foliada y de color verde oscuro, lo que la clasifica como dunita serpentinizada, cuyo mineral componente esencial es el olivino; de manera accesoria es posible encontrar minerales de rubí y piroxeno monoclinio.

## 2. Características geotécnicas del sitio

El método de exploración geotécnico utilizado fue el de pozos excavados manualmente, de 1,40 m de diámetro y 33,0 m de profundidad, en promedio, a los cuales se les hizo inspección directa para describir el perfil del terreno, el cual se muestra en la Figura 1; así como extracción de muestras de suelo (muestras alteradas en bolsa y de probetas inalteradas en tubos de pared delgada hincados manualmente) y rocas (en las zonas donde éstas afloraban). El perfil geotécnico característico del sitio de estudio se identifica por la presencia de cuatro eventos o depósitos de vertiente, tipo “flujo de lodo”, compuestos principalmente por suelos y fragmentos de roca de anfibolita con diferentes grados de dureza, la cual aumenta en profundidad. Se destaca el depósito de vertiente (IV) que posee además, fragmentos de roca meteorizados de textura gabróica con facies néisicas.

Las características físicas y mecánicas de los suelos que componen la matriz de los depósitos encontrados, cuyos resultados se presentan en la Tabla 1, muestran que, hasta una profundidad de 13,0 m aproximadamente, el suelo se clasifica como limo, y después de esta profundidad como una arcilla.

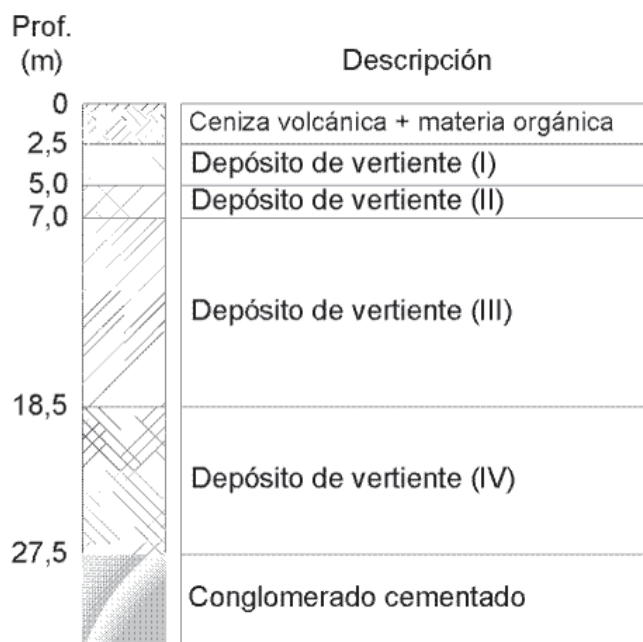
Las propiedades dinámicas de los suelos del sitio estudiado se estimaron por medio del ensayo de laboratorio triaxial cíclico, con distintas cargas cíclicas controladas o esfuerzos desviadores (desde



20 kPa, aumentando en 10 kPa hasta llegar a 130 kPa, según la resistencia de la muestra), ya que se buscaba conocer los valores de las propiedades dinámicas de los suelos ante las solicitaciones impuestas por la superestructura.

Los valores del módulo de elasticidad dinámico ( $E_d$ ) se ajustaron conforme a la carga cíclica controlada aplicada ( $\sigma_1$ ), para un coeficiente de Poisson de 0,4; se encontró que para todos los casos la ecuación que mejor se ajusta a la tendencia de los datos es de la forma  $E_d = C_0 + C_1 \cdot \exp(-C_2 \cdot \sigma_1)$ , cuyos valores se encuentran consignados en la Tabla 2.

**Figura 1.** Perfil estratigráfico general del sitio de estudio



**Tabla 1.** Propiedades índice y mecánicas de las muestras de suelo extraídas

Profundidad (m)	G	w (%)	LL (%)	IP (%)	Pasa No.200 (%)	USCS	e	$\gamma_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	c (kPa)	$\phi$ (°)
3,0	2,700	41,2	78,5	28,9	91,2	MH	1,12	1,80	1,27		
5,0	2,710	29,8	44,8	16,2	70,6	ML					
7,0	2,690	50,9	55,3	16,0	95,7	MH	1,12	1,84	1,29	107	22,2
9,0	2,720	67,5	68,8	28,2	91,2	MH	1,93	1,56	0,93		
12,0	2,700	43,2	46,9	18,8	68,6	ML					
14,0	2,720	42,1	51,1	27,8	81,8	CH	1,12	1,84	1,29	51	11,9
16,0	2,880	25,4	43,2	17,4	86,1	CL	1,17	1,82	1,32		
23,0	2,763	59,1	72,2	21,4	86,1	MH					
31,0	2,755	26,8	46,9	20,3	25,5	CL					

### 3. Análisis de interacción suelo-fundación-estructura

El procedimiento utilizado para el comportamiento del sistema suelo-fundación-estructura se hizo por medio de dos pasos alternos: primero se definieron las condiciones inerciales, que la superestructura ejerce a la fundación, y posteriormente se establecieron las características cinemáticas que despliega la masa de suelo en la fundación ante un evento sísmico.

**Tabla 2.** Coeficientes de la ecuación de ajuste de los módulos de elasticidad ( $E_d$ )

Estrato	Coeficientes de ajuste		
	$C_0$	$C_1$	$C_2$
1	14	1.985	0,165
2	608	5.375	0,400
3	3.164	9.568	0,055
4	1.063	9.962	0,315
5	1.912	8.852	0,400
6	25.000	10.000	0,050

### 4. Análisis inercial

Conocidas las cargas que transmite la superestructura a la fundación, se ejecutó el análisis inercial con el objeto de obtener los desplazamientos, giros y fuerzas para ciertos diámetros propuestos para el sistema de fundación tipo pilas. Con los datos obtenidos se define el diámetro adecuado que satisfaga las condiciones de deformación y esfuerzo en la masa de suelo. Este procedimiento de análisis se efectuó por medio de la teoría de rotura, la cual implica un factor de reducción igual a la unidad ( $R = 1$ ). La distribución de presiones del suelo alrededor del pilote se obtuvo en forma radial por medio de la creación de una malla compuesta por 10 fajas en horizontal, con una dimensión igual al radio de la pila de diseño, y en profundidad por tantas fajas como se quiera dividir el análisis a ejecutar. La metodología

utilizada para estimar dicha distribución de cargas es la desarrollada por Fröhlich (1942) y modificada para áreas de contacto pila-suelo por Zeevaert (1980).

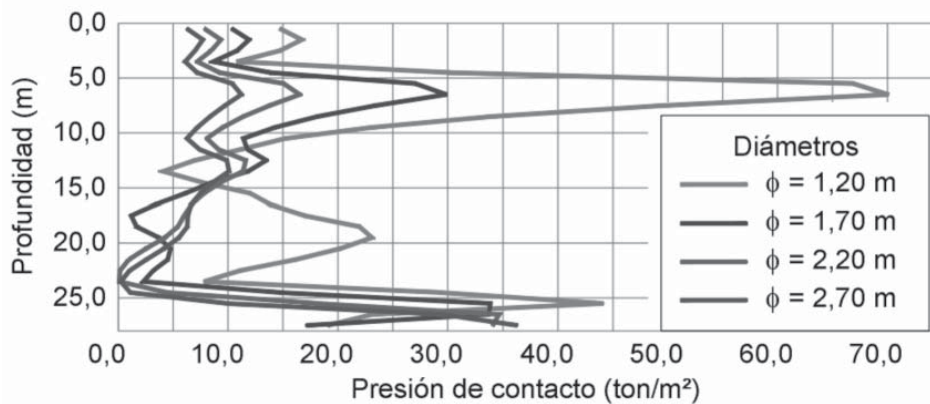
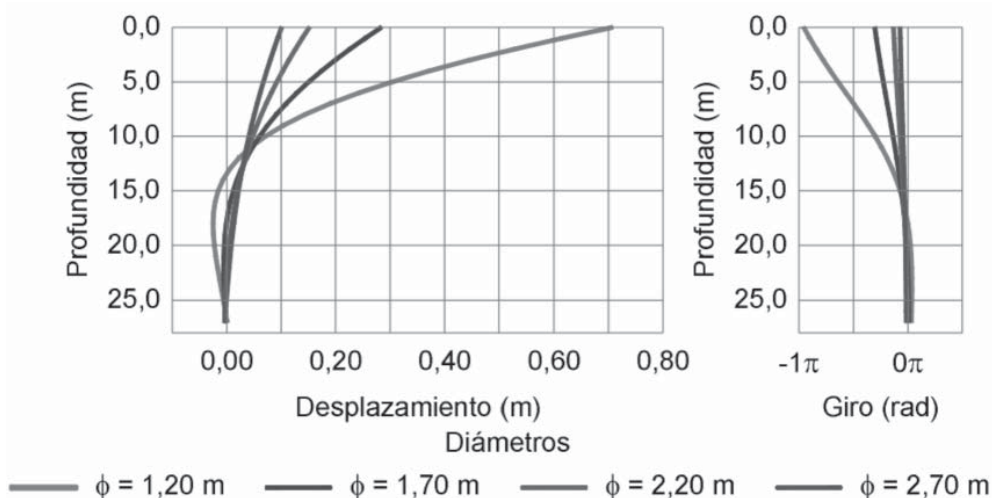
Con los datos obtenidos y las solicitaciones impuestas por la superestructura, se obtiene, para cada estrato, el resorte equivalente de respuesta del suelo ( $K$ ) mediante la metodología propuesta por Zeevaert (matriz HEMA). Luego, usando la metodología de la viga elástica, se resuelve el problema de interacción pilote-suelo, hecho que permite calcular las deformaciones en cada nudo, y con ello las presiones de contacto que se presentan entre el suelo y el pilote. Los resultados obtenidos se exponen en la Figura 2.

Conforme con esta metodología se determinaron las presiones laterales que se presentan en las distintas profundidades del suelo, así como las deformaciones laterales y giros en la cabeza del pilote. Finalmente, se obtuvo la rotación a lo largo del eje de la pila, y con la rotación de la cabeza se calcula el movimiento de la azotea, expresado como cuerpo rígido. Los datos obtenidos se grafican en la Figura 3.

Debido a que el estudio tradicional de la interacción cinemática pilote-suelo deja ciertas incertidumbres en el análisis conjunto del sistema, en el cual se calculan los movimientos sísmicos de la masa del suelo y posteriormente se somete el pilote a estos movimientos con el criterio de “acompañamiento del pilote al suelo”, para luego encontrar las solicitaciones sobre el mismo, se planteó una metodología en la cual se busca el efecto que se produce en la masa de suelo cuando se ve afectado por la presencia de un elemento de propiedades diferentes como lo es un pilote de gran diámetro dentro del mismo.

La importancia de dicha metodología radica en que los cambios que produce un movimiento en el suelo, iniciados por un evento sísmico, afectan la fundación en consideraciones muy apreciables, y los efectos a la superestructura sólo pueden llegar si pasan por el único camino que los conecta: el sistema de fundación. No tener en cuenta dentro del



**Figura 2.** Variación de la magnitud de las presiones de contacto, conforme con la profundidad**Figura 3.** Desplazamientos y giros inerciales conforme con la profundidad

análisis los cambios que se producen en el suelo, las condiciones de trabajo a las que se ve sometida la fundación y los efectos secundarios que se transmiten a la superestructura, es pretender que los efectos sísmicos pasen a la superestructura sin que la cimentación se percate de que algo ha pasado por ella.

La metodología propuesta para el estudio cinemático del sistema suelo-fundación es la siguiente:

- Se obtiene la matriz de rigidez del pilote, y utilizando el método del análisis matricial de estructuras para la viga a flexión, se condensa

la matriz de rigidez y se obtienen las rigideces a carga lateral.

- Se determina la matriz de rigidez conjunta del suelo y el pilote, indicando como parámetro dominante el área influencia del suelo donde se considera que el conjunto suelo-pilote trabaja como una unidad. En este trabajo se consideró, para el desarrollo del modelo, involucrar un área de trabajo suelo-pilote igual a 4 veces el diámetro de diseño.
- Utilizando la metodología de Lysmer, se adiciona a la matriz de rigidez del suelo el efecto de rigidez del pilote para cada estrato. Dado que

Lysmer considera una columna de suelo con área unitaria de contacto entonces se varía ésta, factorándola por el correspondiente área de suelo involucrada en el análisis.

- Se obtiene el período equivalente de la masa suelo-pilote por los métodos de lentitud, Rayleigh y Lysmer. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 3.
- Se procede a obtener los modos superiores de vibración del conjunto suelo-pilote, luego, por métodos numéricos, se resuelve la ecuación dinámica homogénea y se determinan los períodos de vibración.
- Se somete a un espectro de diseño para encontrar las solicitaciones en los sistemas de un grado de libertad equivalente. El espectro de diseño para este análisis se sugiere acompañado de un análisis detallado en cuanto a su evaluación, que presente cierto rigor en su obtención, pues

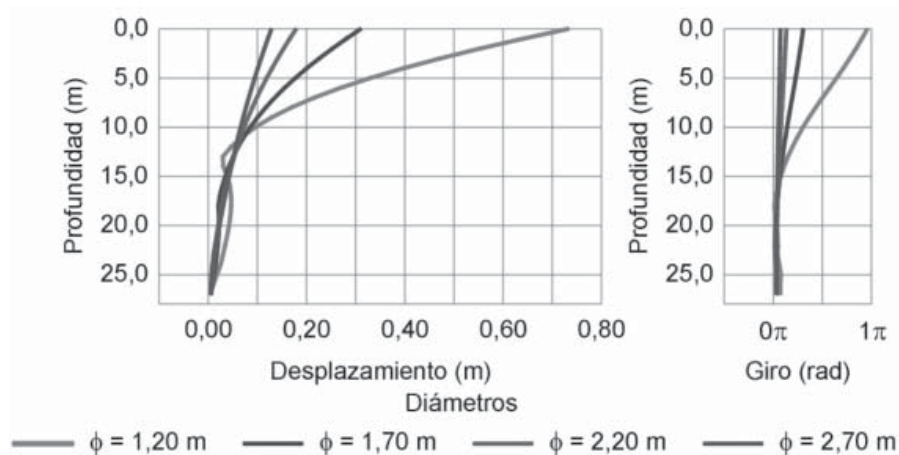
de nada sirve estimar los esfuerzos con métodos rigurosos mediante cierto campo de análisis y tomar por defecto relaciones generales poco específicas, como los que utiliza el reglamento, en el uso del espectro de diseño para la ciudad de Medellín.

- Con los datos obtenidos y utilizando la metodología de la dinámica estructural aplicada al diseño sísmico, se encuentran las fuerzas y desplazamientos en cada estrato distribuidas por su participación en cada modo, usando el método de Rosebluth (1976).
- Finalmente, se leen los desplazamientos de la masa suelo-pila y con la matriz condensada se obtienen los giros de la pila en profundidad, y así se encuentran en cada nudo, las solicitaciones de flexión y corte en el pilote. Los datos obtenidos para el sitio de estudio se grafican en la Figura 4.

**Tabla 3.** Período equivalente de la masa suelo-pilote

<b><i>Díámetro de la pila (m)</i></b>	1,20	1,70	2,20	2,70
<b><i>Período de interacción (s)</i></b>	1,51	1,35	1,25	1,14
<b><i>Período del sitio (s)</i></b>	1,60			

**Figura 4.** Solicitaciones de momento y corte para cada diámetro de diseño, para las condiciones inerciales y cinemáticas superpuestas



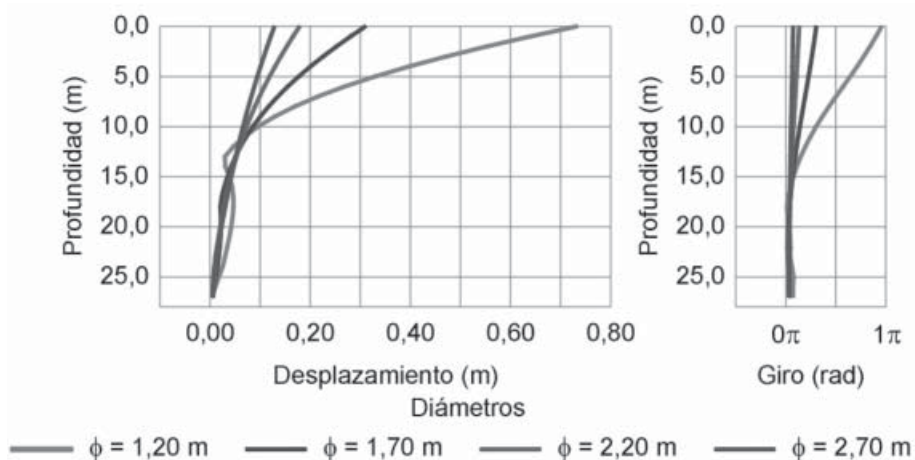
## 5. Análisis estructural

Con las solicitaciones obtenidas en la pila para cada diámetro de diseño, que cumplan con las presiones de contacto del suelo y el desplazamiento en la cabeza, se superpusieron las cargas debidas a los efectos inerciales y cinemáticos para entrar en el diseño por rotura. Se recomienda usar un factor de reducción apropiado para el diseño -en cualquier caso debe ser menor que el de la superestructura-, que sea compatible con los movimientos, evitando que la fundación colapse antes que el edificio. El análisis global de la estructura permite superponer el giro que se le induce por las solicitaciones cinemáticas e inerciales a la superestructura y con ello se obtiene el desplazamiento total en la azotea del edificio. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 4. En la Figura 5 se presentan de manera gráfica los resultados obtenidos en profundidad para cada diámetro de pila de diseño.

**Tabla 4.** Desplazamiento y giros a nivel de base y de azotea de la estructura

Díámetro de pila (m)	Desplazamiento horizontal a nivel de base (m)	Giro (rad)	Desplazamiento horizontal a nivel de azotea (m)
1,20	0,71	0,096	7,17
1,70	0,29	0,030	2,28
2,20	0,15	0,013	0,99
2,70	0,10	0,007	0,55

**Figura 5.** Desplazamientos y giros absolutos para las condiciones inerciales y cinemáticas, superpuestas, conforme con la profundidad



Finalmente, se obtiene el momento de segundo orden que se genera en la estructura por efecto del giro obtenido, el cual no tiene disipación, y se encuentra, igualmente, el momento sísmico proveniente del análisis estructural de la superestructura, el cual sí tiene disipación; se suman ambos para obtener el momento total con el cual se determina la estabilidad. Se considera como criterio de diseño para determinar el diámetro de la pila, que los momentos de segundo orden no deben sobrepasar el 20% del momento sísmico del análisis estructural, y el desplazamiento horizontal originado por el giro de la estructura no debe sobrepasar el 1% de la altura del edificio.





## Conclusiones

La metodología para analizar el comportamiento dinámico de un sistema de fundación en pilas, bajo las condiciones inerciales y cinemáticas, comprende los siguientes aspectos:

**Estabilidad del suelo:** valorar con el estudio inercial las presiones de contacto entre la pila y el suelo, igual que las rotaciones y movimiento horizontal en la cabeza de la pila. Obtener los parámetros del suelo mediante ensayos de laboratorio para establecer las condiciones de rotura del suelo en los diferentes estratos. Analizar la estabilidad del suelo y comparar las presiones obtenidas del análisis inercial y la resistencia del suelo a rotura para cada estrato.

**Estabilidad global de la estructura:** superponer el giro que se induce a la superestructura por las solicitaciones cinemáticas e inerciales a la superestructura y obtener el desplazamiento total en la azotea del mismo. Determinar el momento de segundo orden que se genera en la estructura por efecto del giro obtenido y encontrar igualmente el momento sísmico de la superestructura, y sumar ambos para obtener el momento total con el cual se determina la estabilidad.

El criterio para determinar el diámetro de diseño de la pila se basa en que los momentos de segundo orden estimados no deben sobrepasar el 20% del momento sísmico del análisis estructural, y el desplazamiento horizontal originado por el giro de la estructura no debe pasar el 1% de la altura del edificio.

Conforme con la experiencia adquirida en la ejecución de este trabajo, se recomienda extraer al menos dos probetas inalteradas de suelo que cumplan las condiciones del ensayo en cada profundidad de extracción; además, se sugiere extraer dichas muestras en los primeros diez metros de profundidad del pozo de estudio (por ejemplo a 3,0 m; 6,0 m y 9,0 m de profundidad), y por último a 13,0 m y 16,0 m de profundidad. Finalmente, se aconseja que la ejecución de la prueba triaxial cíclica se haga bajo la condición de esfuerzo controlado con los siguientes valores:  $0,5*\sigma_3$ ;  $0,8*\sigma_3$ ;  $1,0*\sigma_3$ ;  $2,0*\sigma_3$ ;  $3,0*\sigma_3$ ; continuando así sucesivamente hasta obtener la rotura.

## Bibliografía

Correa, A. M. y Martens, U. C. (2000). *Caracterización Geológica de las Anfibolitas de los Alrededores de Medellín*. Medellín: Tesis Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín,

Fröhlich, O. K. (1942). *La Repartición de Presiones*. Traducción de la 1ª ed. Alemana. Madrid: Tipografía Artística.

Rendón G., D. (1999). *Cartografía y Caracterización de las Unidades Geológicas de la Zona Urbana de Medellín*. Medellín: Tesis Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín.

Restrepo J.J. y Toussaint J.F. (1984). *Unidades Litológicas de los Alrededores de Medellín*. Medellín: Memoria de la 1ª Conferencia sobre Riesgos Geológicos del Valle de Aburrá, Sociedad Colombiana de Geología.

Rosebluth, E. y Newmark, N. M. (1976). *Fundamentos de Ingeniería Sísmica*. México: Diana.

Zeevaert W., L. (1980). *Interacción Suelo – Estructura de Cimentaciones Superficiales y Profundas, Sujetas a Cargas Estáticas y Sísmicas*. México: Limusa.