

# Interacción entre el Cálculo sísmico de edificios altos y el impacto ambiental

## Interaction between seismic calculation of high buildings and environmental impact

Germán Sagástegui Plasencia<sup>1</sup>, Genner Villarreal Castro<sup>2</sup>,  
Marco Antonio Cerna Vásquez<sup>3</sup>, Luis Manuel Arévalo del Castillo<sup>3</sup>

### RESUMEN

La presente investigación estuvo orientada a resolver uno de los problemas actuales de la Mecánica Estructural, específicamente, la metodología de cálculo de edificios altos, considerando la flexibilidad de la base de fundación de la cimentación con pilotes, sistema constructivo suelo-estructura usado con mucha frecuencia en la práctica y considerado un campo abierto en la investigación sísmica.

Se fundamentan los dos modelos dinámicos elegidos, describiendo los efectos de flexibilidad y propiedades inerciales de los suelos. Se describe la metodología de modelación de edificios altos con cimentación con pilotes en condiciones reales del Perú y la aplicación del programa SAP2000. Se muestran los resultados obtenidos en los dos modelos elegidos, ante la acción sísmica con diversos ángulos de inclinación y considerando la disipación de energía en la base.

La comparación de resultados, permite indicar que el mayor efecto de flexibilidad de la base de fundación se da en el modelo dinámico Ilichev-Mongolov-Shaevich y el menor efecto en el modelo de la Norma Rusa SNIP 2.02.05-87 con disipación de energía.

Analizando las 10 primeras formas de vibración, se concluye que el efecto de alabeo surge en la losa del último piso, en la tercera, cuarta, séptima y octava formas de vibración libre.

**Palabras clave:** Edificios altos, mecánica estructural, fundación con pilotes, investigación sísmica, sistema suelo-estructura.

### ABSTRACT

The purpose of this study was to solve one of the current problems of Structural Mechanics, specifically, the methodology of the calculation of high buildings, taking into account the flexibility of the base of support of foundations with piles, which is a constructive soil structure system, frequently and practically used and seen as an open field within the seismic research.

Two selected dynamic models are supported, describing the effects of flexibility and inertial properties of soils. The methodology of modeling of high buildings with foundations with piles, under real conditions of Peru is described, as well as, the SAP 2000 program. The results of the two selected models against the seismic action with different inclination angles are shown, considering the energy dissipation in the base. The comparison of results showed that the greater effect of the base flexibility of the foundation is given by the Ilichev-Mongolov-Shaevich dynamic model and the lesser effect by the model of the Russian SNIP 2.02.05-87 rule with energy dissipation. From the analysis of the first ten vibration forms is concluded that warped effect appears at the flagstone of the last level, in the third, fourth, seventh, and eight forms of free vibration.

**Key words:** High buildings, structural mechanics, foundations with piles, seismic research, soil-structure system.

<sup>1</sup> Ingeniero Civil. Maestro en Gestión Ambiental. Profesor Asociado de la Universidad Privada Antenor Orrego.

<sup>2</sup> Ingeniero Civil. Master en Ingeniería Sismoresistente. Profesor de la Universidad Privada Antenor Orrego.

<sup>3</sup> Alumnos de Ingeniería Civil.

## ACTUALIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

El Perú se encuentra ubicado en una zona de alta sismicidad y según la clasificación mundial le corresponde 9 grados en la escala Mercalli Modificada. Cerca de 18 millones de peruanos viven en zonas sísmicas y están expuestos a constantes amenazas de ocurrencia de sismos. En investigaciones sísmicas, aún se está lejos de poder resolver el peligro sísmico, el cual se incrementa y al que se está expuestos cotidianamente.

Las construcciones en zonas sísmicas se incrementan a diario en nuestro país, por tanto, la seguridad estructural tiene un valor importante en el desarrollo nacional. La reducción de los costos, con la consecuente seguridad de las obras en zonas sísmicas, es el problema central de la construcción en nuestro país. La razón fundamental en la solución de este problema es la elaboración de metodologías de cálculo sísmico de edificios altos, considerando la real interacción suelo-estructura para cimentaciones con pilotes.

La flexibilidad del suelo de fundación se refleja en los períodos, frecuencias y formas de vibración libre de las estructuras, que a su vez influyen en la magnitud de las fuerzas sísmicas. En general, este problema se ha investigado en forma insuficiente; consecuentemente, es un campo abierto para los investigadores. La consideración de la flexibilidad del suelo de fundación lleva a la precisión del esquema de cálculo de la edificación.

## OBJETIVO Y PROBLEMAS DE INVESTIGACIÓN

El objetivo de la presente investigación fue la elaboración de una metodología de uso y aplicación de los modelos dinámicos para cimentación con pilotes, considerando la flexibilidad y las propiedades inerciales de los suelos, para el cálculo de edificios altos ante la acción sísmica.

Partiendo del objetivo planteado, se resolvieron los siguientes problemas:

1. Análisis de los esquemas de cálculo de edificios, considerando la flexibilidad del suelo de fundación.
2. Análisis y elección de los modelos de cálculo para cimentación con pilotes, con la descripción de flexibilidad y las propiedades inerciales de los suelos.
3. Elaboración de una metodología de modelación de edificios altos con cimentación con pilotes, ante la acción sísmica en condiciones reales del Perú y con el uso del programa SAP2000.
4. Ejecución de los cálculos para diferentes esquemas de interacción sísmica suelo-pilote-superestructura, de

acuerdo a la norma peruana y bajo la acción de acelerogramas reales.

5. Comparación de los resultados obtenidos y, en base a ello, elaboración de las recomendaciones para el cálculo sísmico del edificio investigado, donde se consideró la flexibilidad de la base de la cimentación con pilotes.

## APORTE CIENTÍFICO

1. En base al análisis de la bibliografía estudiada, se eligió los modelos dinámicos más adecuados para la cimentación con pilotes, considerando la flexibilidad y las propiedades inerciales de los suelos.
2. Se elaboró el modelo dinámico de interacción sísmica suelo-pilote-superestructura, para edificios altos.
3. Se elaboró la metodología de modelación del edificio alto con cimentación con pilotes ante la acción sísmica en condiciones reales del Perú, documentos normativos y con el uso del programa SAP2000.
4. Se obtuvieron los resultados del cálculo del edificio alto por los diferentes modelos de interacción suelo-estructura, diversos ángulos de acción del sismo y considerando la disipación de energía.
5. Surgió el efecto de alabeo en las vibraciones espaciales del edificio investigado ante la acción del sismo.
6. Se realizó la comparación del efecto de flexibilidad del suelo de fundación para las dos principales formas de cálculo sísmico de edificaciones - por la norma peruana y ante la acción de los acelerogramas de Chimbote (1970) y Lima (1974).

## VALOR PRÁCTICO DE LA INVESTIGACIÓN

El valor práctico de la presente investigación consiste en la posibilidad de la aplicación directa de la metodología elaborada para el cálculo de edificios altos de armazón estructural con cimentación con pilotes, ante la acción sísmica y considerando la flexibilidad del suelo de fundación. Además, considerando el insuficiente desarrollo de los métodos de cálculo en nuestro país, puede servir como un manual práctico para los ingenieros e investigadores en esta área.

### 1. MODELOS DINÁMICOS DE INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

Como se desprende de la idea principal de los modelos dinámicos de interacción suelo-estructura para cimentaciones superficiales, es la correspondiente asignación de los coeficientes de rigidez, que determinan la condición real de interacción suelo-cimentación:

$$R_\alpha = K_\alpha u_\alpha ; R_{\varphi\alpha} = K_{\varphi\alpha} \varphi_\alpha ; (\alpha = x, y, z) \quad (1)$$

Donde  $R_\alpha, R_{\varphi\alpha}$  - fuerzas de reacción;  $K_z$  - coeficiente de rigidez de compresión elástica uniforme;  $K_x, K_y$  - coeficientes de rigidez de desplazamiento elástico uniforme;  $K_{\varphi x}, K_{\varphi y}$  - coeficientes de rigidez de compresión no uniforme;  $K_{\varphi z}$  - coeficiente de rigidez de desplazamiento no uniforme;  $u_\alpha$  - desplazamiento lineal;  $\varphi_\alpha$  - desplazamiento angular.

Para cimentaciones con pilotes, el problema de interacción suelo-estructura resultó ser más complejo que el de cimentaciones superficiales, debido a su poco o escaso estudio.

Durante el proceso de estudio teórico, se eligieron dos modelos dinámicos de interacción suelo-pilote-superestructura. El primero de ellos está basado en el uso de la base normativa, descrita en la Norma Rusa SNIP 2.02.05-87 "Cimentaciones de máquinas con cargas dinámicas" (1). En el punto 1.24 de dicha norma, existe una indicación directa, que para la construcción en zonas sísmicas de cimentaciones masivas no se debe considerar la acción sísmica. En concordancia con esta Norma el esquema de cálculo de la cimentación se determinó de la siguiente manera que se describe a continuación (Figura 1) (2, 3, 4).

El cabezal es modelado como un cuerpo sólido con cargas externas dadas, que surgen del trabajo de instalación. El carácter de las acciones externas (carga periódica, carga de impulso, carga casual y otras) se determinan por la especificación de la instalación.

En la Figura 1 se introdujeron las siguientes designaciones, correspondientes a lo indicado en el SNIP:  $F_x, F_z$  - componentes horizontal y vertical de la carga dinámica externa;  $M$  y  $M_\psi$  - componentes del momento perturbador, respecto a los ejes OY y OZ respectivamente;  $K_x, K_\varphi, K_\psi$  - rigidez de la cimentación.

De acuerdo al SNIP (1) se analizó la posibilidad de la consideración del amortiguamiento, dado por los parámetros de amortiguación relativa  $\xi_z, \xi_x, \xi_\varphi, \xi_\psi$  o por los módulos de amortiguación  $\Phi_z, \Phi_x, \Phi_\varphi, \Phi_\psi$ .

De esta manera, las vibraciones fueron descritas parcialmente, como vibraciones verticales, vibraciones horizontales, vibraciones horizontal-rotacionales y vibraciones rotacionales alrededor del eje vertical.

Para el caso de la acción sísmica, dicho modelo de cálculo (Figura 2) debió ser corregido, por lo menos en los siguientes principios:

- 1) En el sistema dinámico suelo-estructura, el disco rígido de la cimentación debe ser descrito como una masa puntual en el centro de gravedad del cabezal.

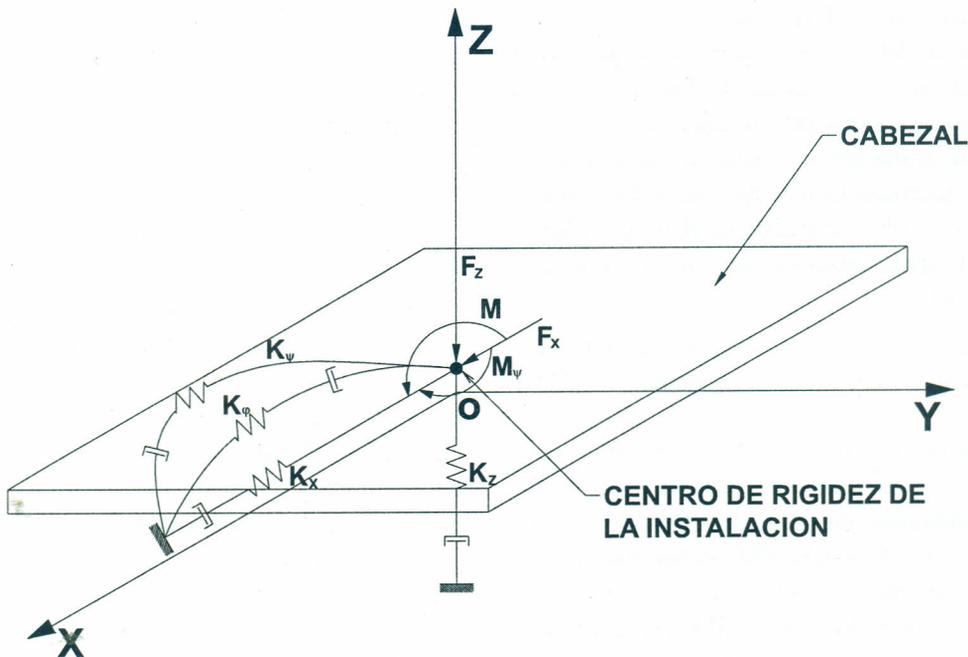


Figura 1. Esquema de cálculo de la cimentación por la Norma Rusa

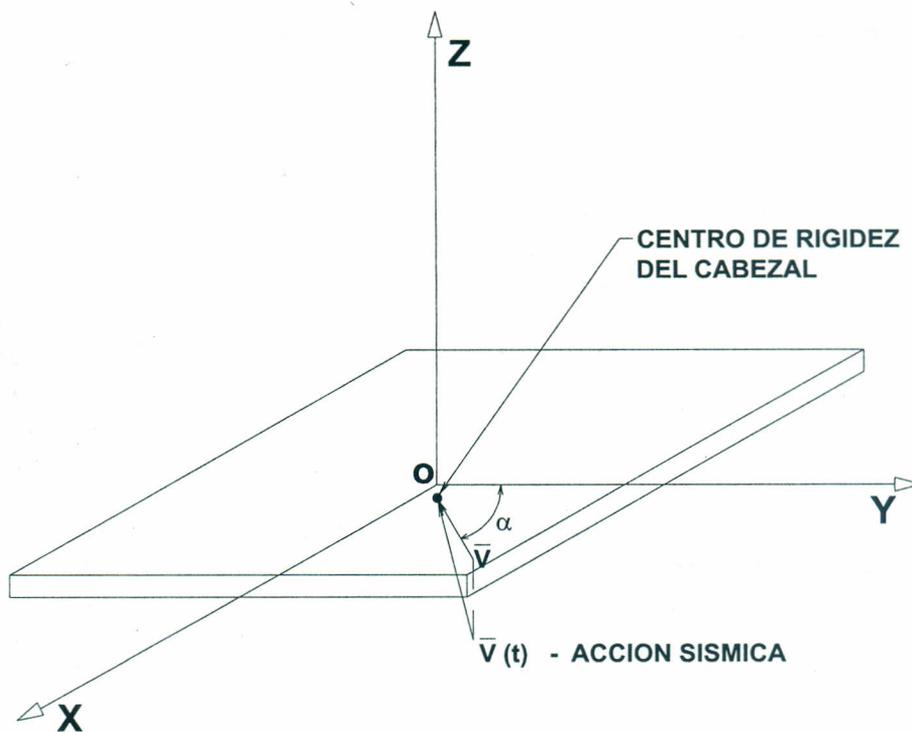


Figura 2. Esquema de cálculo de la cimentación durante la acción sísmica

- 2) Actúa en calidad de acción externa el efecto sísmico. Para hacer más fácil el esquema de cálculo, en una primera aproximación, puede ser descrito en forma de un vector espacial  $\vec{V}(t)$ , actuante en el centro de gravedad del cabezal. Como esta acción es cinemática, se da en forma de los datos de un oscilograma de aceleraciones (oscilograma).
- 3) El esquema de fijación del centro de masas debe ser corregido, mediante la introducción de las conexiones elástico-flexibles, que impiden el desplazamiento horizontal, en la dirección del eje OY y el giro alrededor del eje OX.

En lo sucesivo, el modelo dinámico elegido para cimentación con pilotes, se denomina modelo NORMA RUSA.

El segundo método de elaboración de modelo dinámico para cimentación con pilotes se basa en los resultados publicados en el texto de Ilichev V.A., Mongolov Yu. V., Shaevich V.M. "Cimentación con pilotes en zonas sísmicas" (5). En lo sucesivo será abreviadamente llamado modelo ILICHEV. La idea principal de este método es la introducción en el esquema de cálculo de cimentación con pilotes, los resultados obtenidos analíticamente de los coeficientes de rigidez para el desplazamiento  $K_x$  y rotación  $K_\phi$ .

Se supone que el cabezal es un cuerpo sólido indeformable, apoyado en los pilotes, cada uno de los cuales trabaja en la dirección horizontal como viga sobre base elástica tipo Winkler con coeficiente de Balasto que crece linealmente por la profundidad del pilote (Figura 3). Para ello se distinguen los casos de cabezales bajo y alto, que se diferencian solamente por las condiciones de trabajo del pilote.

En la Figura 3,  $l$  - longitud del pilote;  $h$  - altura del cabezal;  $k$  - coeficiente de proporcionalidad, que caracteriza el aumento de la intensidad del coeficiente de Balasto.

Las suposiciones de este modelo son:

- 1) Se desprecia la resistencia del suelo en la base del cabezal, debido a que en las vibraciones, la superficie de contacto entre la base de la cimentación y el suelo se considera perturbada.
- 2) El estado esfuerzo-deformación del sistema "pilote-suelo", bajo la acción de cargas de pequeñas frecuencias en el nivel de la cabeza del pilote, característico para la acción sísmica, se puede determinar por el método estático. Aquí, se tiene que tener en cuenta que el pilote tiene una frecuencia muy alta de vibraciones libres; sin embargo, el sistema "pilote-suelo" actúa bajo cargas de pequeña frecuencia. Por ello, las fuerzas inerciales prácticamente no influyen y, por tanto, se las puede despreciar.

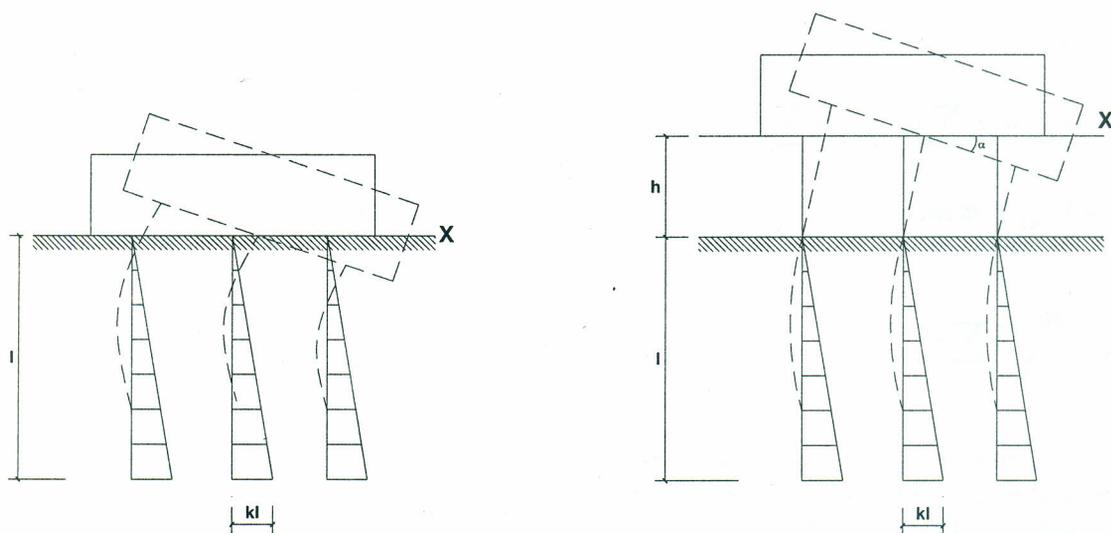


Figura 3. Modelos de cálculo de cimentaciones con pilotes para cabezales bajo y alto

1.1. Norma rusa SNIP 2.02.05-87

Para las vibraciones verticales del grupo de pilotes:

$$m_{z,red} = m_r + \beta_z \sum_{i=1}^N m_{i,p} + \sum_{i=1}^N m_{i,o} ; K_{z,red} = \frac{K_{z,red}^*}{1 + \frac{K_{z,red}^* l_0}{NE_b A_p}} \quad (2)$$

Donde:

$$K_{z,red}^* = NE_b A_p \bar{\beta} \frac{\beta th(\beta l) + \alpha}{\beta + \alpha th(\beta l)} ; \bar{\beta} = \sqrt{\frac{c_{p,m} u}{E_b A_p}} ;$$

$$c_{p,m} = \frac{\sum_{k=1}^{k_i} c_{p,k} l_k}{l} ; \alpha = \frac{C_z^*}{E_b} ;$$

$$C_z^* = b_0 E \left( 1 + \sqrt{\frac{A_{10}}{A}} \right) ; \beta_z^* = k^* \frac{\sum_{k=1}^{k_i} c_{p,k} l_k}{c_0 l} \quad (3)$$

$m_{z,red}$  - masa asumida de la cimentación con pilotes;  $m_r$  - masa del cabezal;  $m_{i,p}$  - masa de la parte  $i$  del pilote hincado en el suelo;  $m_{i,o}$  - masa de la parte  $i$  del pilote, ubicado sobre la superficie del terreno;  $k^*$  - coeficiente asumido igual a 2 - para pilotes de concreto armado de alta resistencia; 2,5 - para pilotes de concreto armado de mediana resistencia; 3,5 - para pilotes de madera;  $k_i$  y  $k_{j_s}$  - número del estrato de suelo, contabilizado a partir de la superficie del suelo hasta la profundidad igual a  $l$  o  $l' = 0,2[1 + 4th(10/l)]$ ;  $c_{p,k}$  - resistencia elástica del suelo

en la superficie lateral del pilote en el estrato  $k$ ;  $l_k$  - espesor del estrato  $k$  del suelo;  $c_0$  coeficiente igual a 10000 kN/m<sup>3</sup>;  $l$  - profundidad de hincado del pilote en el suelo;  $l_0$  - distancia de la base del cabezal hasta la superficie del suelo, para cabezal bajo  $l_0 = 0$ ;  $N$  - número de pilotes;  $E_b$  - módulo de elasticidad del material del pilote;  $A_p$  - área de la sección transversal del pilote;  $u$  - perímetro de la sección transversal del pilote;  $c_z^*$  - coeficiente de compresión elástica uniforme en el extremo inferior del pilote;  $b_0$  - coeficiente, m<sup>-1</sup>, asumido para suelos arenosos igual a 1; para arenas arcillosas 1,2; para arcillas 1,5; duplicándose el valor de este coeficiente para pilotes hincados;  $E$  - módulo de deformación del suelo en la base de la cimentación;  $A_{10} = 10 m^2$ ;  $A$  - área de la base de la cimentación, asumida como el área mayor de la parte inferior de la sección transversal del pilote.

Para las vibraciones horizontales de la cimentación con pilotes:

$$m_{x,red} = m_r + \beta_x \sum_{i=1}^N m_{i,p} + \sum_{i=1}^N m_{i,o} ; K_{x,red} = \frac{NE_b I \alpha^3}{p} \quad (4)$$

$$\beta_x^* = 0,25 \beta_z^* \quad (5)$$

Donde:

$m_{x,red}$  - masa asumida de la cimentación con pilotes;  $I$  - momento de inercia de la sección transversal del pilote;  $\bar{\alpha}$  - coeficiente de deformación elástica del sistema "pilote-suelo", determinada por la fórmula  $\bar{\alpha} = 2\alpha_e$  cuando  $\gamma_c = 3$ ;  $p$  - coeficiente, dependiente de la condición de fijación del pilote en el cabezal.

Para las vibraciones horizontal-rotacionales del grupo de pilotes:

$$\begin{aligned}
 m_{\varphi,red} &= m_{x,red} ; \\
 \theta_{\varphi,red} &= \theta_{\varphi,r} + \beta_z^* \sum_{i=1}^N m_{i,p} r_{h,i}^2 + \sum_{i=1}^N m_{i,0} r_{h,i}^2 ; \\
 \theta_{\varphi,0,red} &= \theta_{\varphi,red} + h_2^2 m_r
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

$$K_{\varphi,red} = \frac{K_{z,red}}{N} \sum_{i=1}^N r_{h,i}^2
 \tag{7}$$

Donde  $\theta_{\varphi,r}$  - momento de inercia de la masa del cabezal respecto al eje horizontal, que pasa por el centro de gravedad perpendicular al plano de vibración;  $h_2$  - distancia del centro de gravedad de la masa  $m_r$  hasta la base del cabezal;  $r_{h,i}$  - distancia desde el eje  $i$  del pilote hasta el eje horizontal, que pasa por el centro de gravedad de la base del cabezal perpendicular al plano de vibración.

Para las vibraciones rotacionales, alrededor del eje vertical:

$$\begin{aligned}
 m_{\psi,red} &= m_{x,red} ; \\
 \theta_{\psi,red} &= \theta_{\psi,r} + \beta_x^* \sum_{i=1}^N m_{i,p} r_{v,i}^2 + \sum_{i=1}^N m_{i,0} r_{v,i}^2
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

$$K_{\psi,red} = \frac{K_{x,red}}{N} \sum_{i=1}^N r_{v,i}^2
 \tag{9}$$

Donde:  $\theta_{\psi,r}$  - momento de inercia de la masa del cabezal, respecto al eje vertical, que pasa por el centro de gravedad del cabezal;  $r_{v,i}$  - distancia del eje  $i$  del pilote, hasta el eje vertical, que pasa por el centro de gravedad del cabezal.

La amortiguación relativa  $\xi_z$  para vibraciones verticales de la cimentación con pilotes, se puede asumir igual a 0,2 para vibraciones establecidas y 0,5 para vibraciones desconocidas o no establecidas. Los valores de  $\xi_x, \xi_\varphi, \xi_\psi$  se determinan con las siguientes fórmulas:

$$\xi_x = 0,6\xi_z ; \xi_\varphi = 0,5\xi_z ; \xi_\psi = 0,3\xi_z
 \tag{10}$$

### 1.2. Modelo Ilichev

Los coeficientes de rigidez de la cimentación con pilotes para la compresión elástica uniforme  $K_z$ , desplazamiento elástico uniforme  $K_x$  y rotación elástica  $K_\varphi$ , de determinan por las fórmulas:

$$K_z = nC_1 ;$$

$$K_x = nC_2 - \frac{n^2 C_3^2}{C_1 \sum_{i=1}^n y_i^2 + nC_4} ;$$

$$K_\varphi = C_1 \sum_{i=1}^n y_i^2 + nC_4 - n \frac{C_3^2}{C_2}
 \tag{11}$$

Donde  $n$  - número de pilotes;  $y_i$  - distancia del eje de rotación del cabezal, hasta el eje  $i$  del pilote;  $C_1$  - fuerza orientada a lo largo del eje longitudinal  $i$  del pilote, que surge debido al asentamiento elástico unitario de la base del cabezal en la misma dirección del eje indicado;  $C_2$  - fuerza orientada perpendicular al eje, que surge debido al desplazamiento elástico unitario del cabezal en la misma dirección;  $C_3$  - momento actuante en el plano que pasa por el eje del pilote, que surge debido al desplazamiento elástico unitario de la base del cabezal en el mismo plano por la normal con el eje del pilote;  $C_4$  - momento actuante en el plano, que pasa por el eje del pilote, que surge debido a la rotación elástica unitaria del cabezal en el mismo plano.

## 2. CÁLCULO DE EDIFICIO ALTO, CONSIDERANDO LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

Se eligió una edificación típica, que fue un edificio de 16 pisos de armazón estructural de dos vanos de sistema aporticado con diafragmas verticales rígidos, de dimensiones en el plano de 16 m x 30 m, con una altura de piso de 3,5 m.

Los cálculos se realizaron usando la Norma Peruana de Estructuras (6), bajo la acción de dos acelerogramas reales: Chimbote (31.05.1970) y Lima (03.10.1974). El cálculo numérico se realizó con ayuda del programa SAP2000 (7) bajo diversas orientaciones del sismo ( $\alpha=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ) con el eje longitudinal del edificio. En todos los casos se consideró una amortiguación relativa de la edificación de 5% del crítico ( $\xi=0,05$ ).

Los cálculos se realizaron para el edificio sin considerar la flexibilidad de la base de fundación (análisis común), considerando la flexibilidad por los modelos dinámicos Ilichev V.A. - Mongolov Yu.V. - Shaevich V.M. y Norma Rusa SNIP 2.02.05-87 sin disipación y con disipación de energía en la base.

En los Cuadros 1, 2 y 3 se dan los resultados numéricos de los períodos de las 10 primeras formas de vibración libre y sus frecuencias, así como los valores máximos de los desplazamientos de los centros de masa

en los ejes OX y OY. También se dan los resultados de la fuerza axial máxima, fuerza cortante máxima, momento flector máximo y momento torsor máximo del edificio, tanto para diafragmas, como para columnas (2, 3).

Como era de esperarse, el efecto de flexibilidad de la base de fundación incrementa los períodos de vibración y disminuye las frecuencias. Los desplazamientos máximos de los centros de masa en los ejes OX y OY, tanto sin considerar la flexibilidad de la base de fundación, como considerando la flexibilidad de la misma, suceden en el

piso 16. Las fuerzas axiales máximas sin considerar la flexibilidad y considerando dicho efecto, suceden en los diafragmas y columnas en el primer piso. Las fuerzas cortantes máximas y los momentos flectores máximos, tanto sin considerar la flexibilidad, como considerando la misma, suceden en los diafragmas en el primer piso y en las columnas en el piso 16. Los momentos torsores máximos sin la flexibilidad de la base de fundación y considerando dicho efecto suceden en diferentes elementos en diversos pisos.

**Cuadro 1**  
Formas de vibración libre y frecuencias

Modelo dinámico	Período de vibración por la forma (s)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Común	1,791	0,753	0,485	0,471	0,216	0,163	0,131	0,106	0,092	0,074
Ilichev	1,866	1,081	0,561	0,506	0,321	0,283	0,193	0,166	0,143	0,126
Norma Rusa	1,824	0,937	0,574	0,476	0,221	0,198	0,172	0,136	0,103	0,102

Modelo dinámico	Frecuencia angular por la forma (rad/s)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Común	3,51	8,35	12,96	13,33	29,06	38,67	47,93	59,22	68,07	84,45
Ilichev	3,37	5,81	11,21	12,42	19,58	22,19	32,56	37,94	43,94	49,87
Norma Rusa	3,45	6,71	10,95	13,21	28,46	31,72	36,64	46,17	60,82	61,36

**Cuadro 2**  
Norma Peruana E030-2003 ( $\alpha=0^\circ$ )

Modelo dinámico	Desplazamiento máximo (mm)		Diafragma			
	$X_{m\acute{a}x}$	$Y_{m\acute{a}x}$	$N_{m\acute{a}x}$ (T)	$V_{m\acute{a}x}$ (T)	$M_{m\acute{a}x}$ (T.m)	$M_{L,m\acute{a}x}$ (T.m)
Común	0,13	77,56	170,04	343,31	3 110,01	0,12
Ilichev	0,19	83,05	177,25	393,73	3 299,68	0,14
Norma Rusa	0,18	79,36	174,66	358,55	3 178,37	0,13

Modelo dinámico	Columna				
	$N_{m\acute{a}x}$ (T)	$V_{m\acute{a}x}$ (T)	$M_{m\acute{a}x}$ (T.m)	$M_{L,m\acute{a}x}$ (T.m)	
Común		378,07	4,04	7,22	0,01
Ilichev		390,94	4,34	7,77	0,01
Norma Rusa		380,88	4,06	7,25	0,01

Cuadro 3  
Acelerograma de Lima (03.10.1974)

Modelo dinámico	Desplazamiento máximo (mm)		Diafragma			
	$X_{m\acute{a}x}$	$Y_{m\acute{a}x}$	$N_{m\acute{a}x}$ (T)	$V_{m\acute{a}x}$ (T)	$M_{m\acute{a}x}$ (T.m)	$M_{Lm\acute{a}x}$ (T.m)
Común	0,20	70,45	150,90	534,00	3 638,00	0,15
Ilichev	0,22	80,50	171,20	591,60	4 056,00	0,18
Norma Rusa (sin disipación)	0,22	75,22	166,30	551,20	3 719,00	0,18
Norma Rusa (con disipación)	0,22	73,09	161,20	547,30	3 690,00	0,18

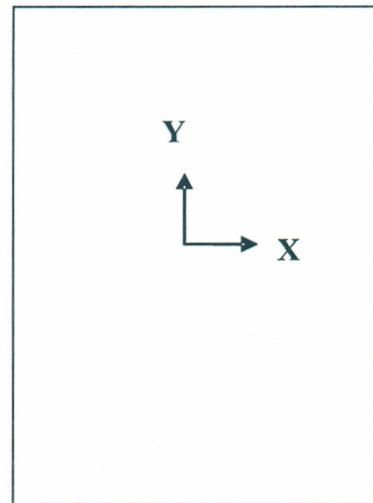
Modelo dinámico	Columna			
	$N_{m\acute{a}x}$ (T)	$V_{m\acute{a}x}$ (T)	$M_{m\acute{a}x}$ (T.m)	$M_{Lm\acute{a}x}$ (T.m)
Común	345,20	5,50	9,38	0,015
Ilichev	446,10	6,52	10,52	0,018
Norma Rusa (sin disipación)	392,00	6,07	10,35	0,018
Norma Rusa (con disipación)	377,90	6,03	10,28	0,018

En la figura 4 se muestra la distribución de los nudos extremos de la losa del piso 16 y en la Tabla 4 los resultados de los desplazamientos de dichos nudos en el eje OZ, correspondiente a las 10 primeras formas de vibración libre por el modelo dinámico Norma Rusa.

De acuerdo a estos resultados, se concluye, que el efecto de alabeo surge en la tercera, cuarta, séptima y octava formas de vibración libre (Figura 5), correspondiente a la séptima forma de vibración.

En la Figura 6 se muestra la distribución de energía: energía inicial del sismo de Chimbote (Input energy), energía cinética (Kinetic energy), energía potencial (Potential energy), energía modal de amortiguación de la edificación (MDamp energy) y energía de disipación del amortiguador colocado en el centroide del cabezal de la cimentación con pilotes (NDamp energy). Se observa que la mayor energía es asumida por la amortiguación de la estructura. La energía de disipación del amortiguador colocado en el centroide del cabezal tiene un valor pequeño en comparación con la asumida por la amortiguación de la estructura, pero es más importante que las energías potencial y cinética, ya que estas últimas mayormente absorben energía de los pisos 2 al 12 y la otra durante todo el sismo.

102



306

17

221

Figura 4. Número de nudos extremos de la losa del piso 16.

### 3. MATRIZ DE IMPACTO AMBIENTAL

En el Cuadro 4 se incluyen la información para la deducción de los impactos ambientales negativos y positivos.

Cuadro 4  
Matriz de Impacto Ambiental

FASE	ACTIVIDAD	SUELO	AGUA	FLORA	FAUNA	SOC. ECON.	CULTURAL	+	-	SUMA
CONSTRUCCIÓN	Movimiento de tierras	-11				+I14	+I13	+2	-1	+1
	Transporte de materiales sobrante					+I14	+I13	+2	0	+2
	Ampliación de área urbana	-12				+I14	+I8; +I9; +I13	+4	-1	+3
	Cimientos con pilotes	-14; -17; +I8; +I9				+I14	+I12; +I13	+5	-2	+3
	Construcción de muros y techos en edificios	-16				+I14	-I6; +I11; +I13	+3	-2	+1
	Instalaciones en edificios					+I14	-I3; +I12	+2	-1	+1
OPERACIÓN	Mantenimiento de edificios					+I14	+I13	+2	0	+2
	Seguridad de edificios	-13	+I10			+I14	+I8; +I9	+4	-1	+3
	Plan de Contingencia	-13	+I10			+I14	-I5; +I8; +I9; +I12; I13	+6	-2	+4
	Calidad de Vida					+I14	-I7; +I8; +I9; +I13	+4	-1	+3
IMPACTOS	POSITIVOS	+2	+2			+10	+20	+34		
	NEGATIVOS	-7	0			0	-4		-11	
	SUMATORIA	-5	+2			+10	+16			+23

**IMPACTOS AMBIENTALES NEGATIVOS**

- 11 : Zona de alta sismicidad en el Perú.
- 12 : Construcciones sin seguridad estructural.
- 13 : Reducción de costos e inseguridad de edificios construidos.
- 14 : No consideración real interacción suelo-estructura para cimentación con pilotes.
- 15 : Investigaciones en forma insuficiente sobre el tema.
- 16 : Incremento de los periodos de vibración y disminución de frecuencias.
- 17 : Norma Peruana E030 - 2003.

**IMPACTOS AMBIENTALES POSITIVOS**

- + I8 : Construcción de edificios considerando flexibilidad de la base de fundación.
- + I9 : Construcción de edificios considerando propiedades inerciales de los suelos.
- + I10: Modelación de edificios altos con cimentación pilotes ante acción sísmica.
- + I11: Aplicación del programa SAP2000.
- + I12: Modelación Dinámica de interacción sísmica suelo-pilote-superestructura para edificios altos.
- + I13: Construcciones con seguridad estructural.
- + I14: Calidad de vida.

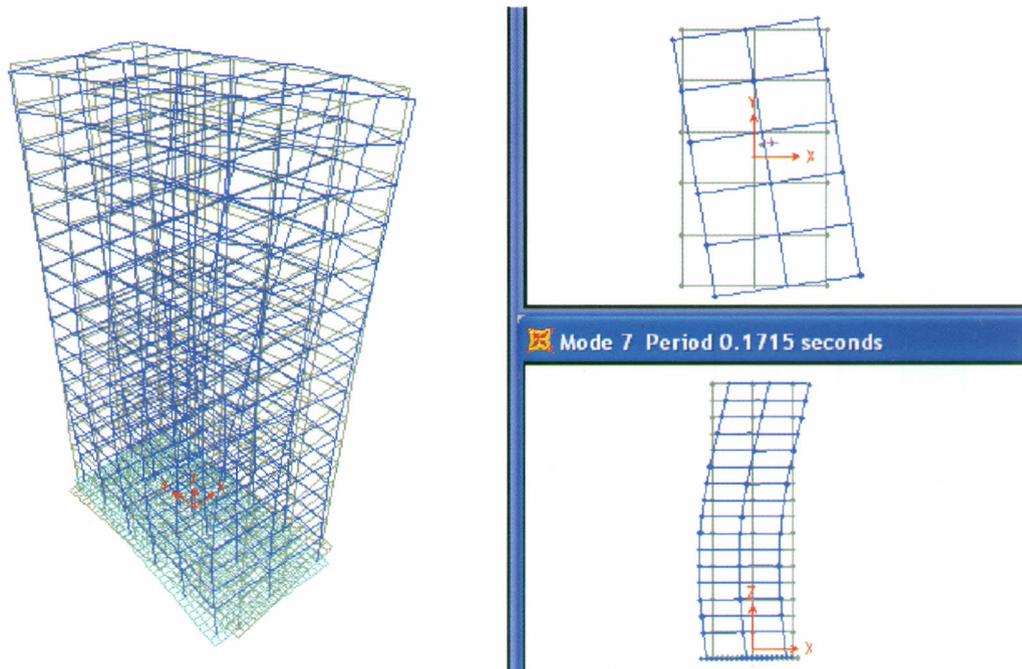


Figura 5. Sétima forma de vibración libre

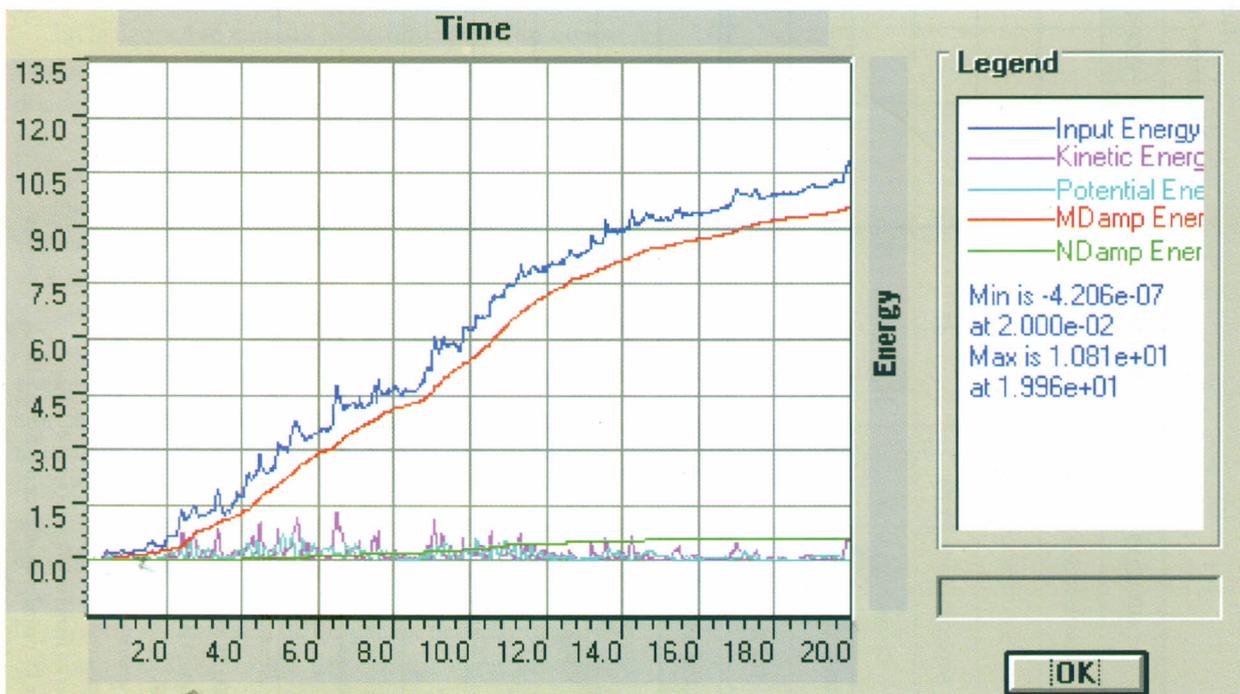


Figura 6. Distribución de energía en la edificación, considerando el amortiguador en el centroide del cabezal de la cimentación con pilotes

## CONCLUSIONES

1. El cálculo sísmico, con ayuda de los modelos dinámicos de interacción suelo-estructura, muestra que la flexibilidad de la base de fundación influye directamente en la determinación de los parámetros de cálculo. La flexibilidad de la base de fundación por la Norma Peruana E030-2003, cuando  $\alpha = 0^\circ$ , permite el incremento del período de la primera forma de vibración hasta 4,1%; disminución de la frecuencia correspondiente a la primera forma de vibración hasta 4,1%; incremento de los desplazamientos máximos del centro de masas en el eje OX hasta 46,2% y en el eje OY hasta 7,1%; incremento de las fuerzas axiales máximas hasta 3,4%; incremento de las fuerzas cortantes máximas hasta 14,7%; incremento de los momentos flectores máximos hasta 6,1% e incremento de los momentos torsores máximos hasta 16,7%.

La flexibilidad de la base de fundación bajo los acelerogramas de Chimbote (31.05.1970) y Lima (03.10.1974) permite el incremento de los desplazamientos máximos del centro de masa en el eje OX hasta 10,0% y en el eje OY hasta 14,3%; incremento de las fuerzas axiales máximas hasta 29,2%; incremento de las fuerzas cortantes máximas hasta 17,1%; incremento de los momentos flectores máximos hasta 11,5% e incremento de los momentos torsores máximos hasta 20,0%.

2. Por la Norma Peruana E030-2003, la flexibilidad de la base de fundación, cuando  $\alpha=45^\circ, 90^\circ$  permite el incremento de los desplazamientos máximos del centro de masa en el eje OX hasta 50,7% y en el eje OY hasta 90,9%; disminución de las fuerzas axiales máximas hasta 11,1%; disminución de las fuerzas cortantes máximas hasta 15,7%; disminución de los momentos flectores máximos hasta 28,3% y disminución de los momentos torsores máximos hasta 30,3%.
3. La disipación de energía del amortiguador en el centroide del cabezal de la cimentación con pilotes absorbe el 7,5% de la energía inicial del sismo; y en relación al modelo dinámico Norma Rusa sin disipación de energía permite la disminución del desplazamiento máximo del centro de masa hasta el 2,8%; dis-

minución de las fuerzas axiales máximas hasta el 3,6%; disminución de las fuerzas cortantes máximas hasta 3,2% y disminución de los momentos flectores máximos hasta el 1,0%.

4. La comparación de los resultados de cálculo obtenidos indica que el mayor efecto de flexibilidad de la base de fundación se da en el modelo dinámico Ilichev y el menor efecto en el modelo dinámico Norma Rusa considerando la disipación de energía. Los resultados del modelo dinámico Norma Rusa sin disipación de energía se encuentran entre los dos modelos dinámicos anteriores.
5. El efecto de alabeo surge en la losa del piso 16, en la tercera, cuarta, séptima y octava formas de vibración libre.
6. Es notorio el efecto de la flexibilidad de la base de fundación en el análisis sísmico, debiendo mejorarse la Norma Peruana E030-2003, incluyendo la exigencia de dicho tipo de análisis, el cual describe perfectamente el comportamiento real de las edificaciones ante sismos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. SNIP 2.02.05-87. 1989. Cimentación de máquinas con cargas dinámicas. TSITP Gosstroya. Moscú, 32p. (en ruso).
2. Villarreal Castro Genner. 2004. Cálculo de edificios altos ante la acción sísmica, considerando la flexibilidad de la base de fundación. Disertación Ph.D. Moscow State Civil Engineering University. Moscú. 144p. (en ruso).
3. Villarreal Castro Genner. 2005. Interacción sísmica suelo-pilote-superestructura en edificios altos. ISBN 9972-33-175-X. Trujillo, 120p.
4. Villarreal Castro Genner. 2004. Modelos dinámicos de interacción sísmica suelo-pilote-superestructura en edificios altos. VINITI N° 1986 - V 2004. ISSN 0202-6120. Moscú, 6p. (en ruso).
5. Ilichev V.A., Mongolov Yu. V., Shaevich V.M. 1983. Cimentación con pilotes en zonas sísmicas. Stroiizdat. Moscú, 144p. (en ruso).
6. Norma Peruana de Estructuras. ACI - Capítulo Peruano. SENCICO. 2003. Lima. 506p.
7. SAP2000. 2004. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. Structural and Earthquake Engineering Software. Computers and Structures, Inc. Berkeley. California.
8. Guía de evaluación de impacto ambiental. Ministerio de la Presidencia del Perú. FONCODES. 2004. Lima.