

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

MARACAIBO - VENEZUELA



Una Revista Internacional Arbitrada
que está indizada en las publicaciones
de referencia y comentarios:

- Science Citation Index (SCIExpanded)
- Compendex
- Chemical Abstracts
- Metal Abstracts
- World Aluminium Abstracts
- Mathematical Reviews
- Petroleum Abstracts
- Zentralblatt Für Mathematik
- Current Mathematical Publications
- MathSci (online database)
- Reveneyt
- Materials Information
- Periódica
- Actualidad Iberoamericana

Dynamic Rocking Behavior Of Freestanding Symmetrical Rigid Blocks Considering Dynamic Soil-Structure Interaction

M. A. Jaimes⁽¹⁾, L. R. Fernández-Sola⁽²⁾, C. Arredondo⁽¹⁾ y E. Reinoso⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad Universitaria, 04510 México, D.F. *mjaimest@iingen.unam.mx, carredondov@iingen.unam.mx, ereinosoa@iingen.unam.mx*

⁽²⁾ Departamento de Materiales, UAM-Azcapotzalco, México, D.F. *lrfs@correo.azc.uam.mx*

Abstract

We propose a dynamic model for the estimation of the rocking and overturning response for freestanding symmetrical rigid blocks, located in different storeys of a building under seismic action, considering the rotational component due to dynamic soil-structure interaction (DSSI). With this model, the influence of the soil-structure interaction on the dynamic behavior for rigid blocks is studied. An illustrative example of its application is presented for symmetric rigid blocks into buildings of 5, 10 and 15 floors located in soft soil of Mexico City. Results show that is important to consider both kinematic and inertial effects of DSSI on the dynamic response of contents. It is shown that the influence of these effects is more representative, as expected, for upper building levels.

Keywords: symmetric rigid block; rotational component; dynamic soil-structure interaction.

Comportamiento Dinámico De Bloques Rígidos Simétricos Por Volteo Considerando La Interacción Dinámica Suelo-Estructura

Resumen

Se propone un modelo dinámico para la estimación de la respuesta por balanceo y volteo de bloques rígidos simétricos, libremente apoyados, ubicados en diferentes niveles de un edificio sujeto a sismo, considerando la componente rotacional de la excitación debida al efecto de interacción dinámica suelo-estructura (IDSE). Con este modelo se realiza un análisis de la influencia de la interacción dinámica suelo-estructura en el comportamiento del bloque. Se presenta un ejemplo ilustrativo de su aplicación para bloques rígidos simétricos en edificios de 5, 10 y 15 pisos desplantados en terreno blando de la Ciudad de México. Se muestra que es importante considerar los efectos tanto cinemáticos como inerciales de la IDSE en la respuesta dinámica de contenidos y que ésta es más representativa, como es de esperarse, en niveles superiores de edificios.

Palabras Clave: Bloques rígidos simétricos; componente rotacional; interacción dinámica suelo-estructura.

1. Introducción

El comportamiento de bloques rígidos simplemente apoyados ha sido estudiado por más de un siglo; Milne [1] y Housner [2] originalmente proponen criterios de estimación de dimensiones críticas por volteo y modelan su respuesta ante movimiento horizontal. Subsecuentes

investigaciones del fenómeno han sido emprendidas para: (1) identificar restricciones dinámicas existentes [3, 4], (2) parametrizar condicionantes por balanceo y volteo ante movimientos armónicos, impulsivos y sísmicos registrados [5, 6], (3) calibrar experimentalmente parámetros relevantes empleados en el modelo dinámico [7] y (4) evaluar el efecto que sobre su respuesta tiene la

condición de apoyo sobre base flexible [8]. Una revisión excelente y exhaustiva de estos esfuerzos se puede encontrar en Makris [9, 10] y en las referencias ahí citadas. En general, todas suponen que el bloque rígido estará sujeto exclusivamente a componentes horizontales de excitación, sin componente vertical, lo cual se justifica únicamente si la componente rotacional es despreciable. En este estudio, la componente rotacional del movimiento sísmico en estructuras es debida a efectos cinemáticos y al cabeceo de la estructura por los efectos inerciales de la interacción dinámica suelo-estructura (IDSE). Hasta donde conocen los autores, no existen trabajos previos orientados específicamente a tomar en cuenta y caracterizar la importancia de estos efectos en la respuesta dinámica de bloques en edificios.

Existen dos efectos de interacción como resultado de la presencia de un edificio desplantado en suelo blando: la interacción cinemática e inercial [11]. La primera es el resultado (reflexión y refracción) en el medio de propagación de la onda sísmica por densidad y elasticidad diferente debido a la presencia de la cimentación. La segunda es el efecto del acoplamiento dinámico entre estructura y su apoyo, cada una con propiedades elásticas e inerciales propias, comportándose como un único sistema dinámico. La componente rotacional de la excitación se debe a movimientos diferenciales por contraste de rigidez en la cimentación, generando rotaciones de cuerpo rígido que se transmiten en altura de una estructura. A esta excitación rotacional se le suma la rotación producida por cabeceo de la estructura debida a la rigidez rotacional finita del sistema suelo-cimentación. El cambio en las propiedades dinámicas de la estructura (periodo fundamental y amortiguamiento) producen que el movimiento al que estén sometidos los bloques en los diferentes pisos de la estructura se vean modificados. En este artículo se estudia la influencia y efecto de las componentes de la IDSE en el comportamiento de bloques rectangulares (simétricos en masa y geometría) dentro de edificios, proponiendo un modelo dinámico general para la estimación de su respuesta por volteo ante la acción sísmica y, considerando la componente rotacional asociada. En un ejemplo de aplicación para bloques en edificios de 5, 10 y 15 pisos desplantados en terreno blando de la Ciudad de México, se discute e identifica la variabilidad en su respuesta dinámica al incluir la IDSE.

2. Modelado de los efectos de interacción dinámica suelo-estructura (IDSE)

Los efectos de interacción dinámica suelo-estructura se clasifican en dos grupos: (1) los debidos a la modificación del movimiento de entrada al que estará sometida la estructura, producto de la difracción de ondas ante la

presencia de un elemento de cimentación más rígido que el suelo (interacción cinemática) y (2) los asociados con deformaciones del suelo introducidas por fuerzas de inercia en la superestructura (interacción inercial). Los principales efectos de la interacción inercial son el alargamiento en el periodo estructural y la modificación del amortiguamiento [12]. La interacción cinemática modifica el movimiento de entrada reduciendo: (1) la amplitud de los movimientos de alta frecuencia debido a que la cimentación no es capaz de deformarse de la misma manera que el suelo, promediando las componentes con longitudes de onda pequeñas (alta frecuencia) y (2) la amplitud de las altas frecuencias cuando la rigidez de la cimentación causa movimientos diferenciales entre distintos puntos de la misma generen rotaciones de cuerpo rígido, lo cual se convierte en una componente rotacional de la excitación, ϕ_{ε} . En este trabajo y para estimar cómo se modifica el movimiento por la interacción cinemática, se considera la solución numérica propuesta por Kausel et al. [13]; en ella, las modificaciones del movimiento se definen mediante funciones de transferencia con las cuáles es posible definir movimientos de entrada efectivos $u_{\varepsilon}(\omega)$ (traslaciones) y $\phi_{\varepsilon}(\omega)$ (rotaciones). Los efectos de interacción inercial se modelan a partir de desplazamientos que se producen en el sistema suelo cimentación por fuerzas de inercia de la superestructura y mediante un sistema de resortes y amortiguadores ubicados en la base de la estructura representando la rigidez del sistema suelo-cimentación y la disipación de energía por comportamiento histerético del suelo y radiación de energía por difracción de ondas [14]. La rigidez dinámica y amortiguamiento se representa mediante el concepto de función de impedancia $\tilde{K}(\omega)$, definida como la relación entre la fuerza o momento aplicado de manera armónica $P(\omega)$ y el desplazamiento o rotación de una cimentación infinitamente rígida carente de masa, $\Delta(\omega)$. Debido a la masa del suelo y la propagación de ondas, esta relación tiene una amplia dependencia de la frecuencia de excitación:

$$\tilde{K}(\omega) = \frac{P(\omega)}{\Delta(\omega)} \quad (1)$$

En el presente trabajo, la definición y expresiones de la función de impedancia se basan en la propuesta por Gazetas [15], mismas que se utilizan en las NTCS-04 [16] y en trabajos previos [14]. Allí, la rigidez dinámica $\tilde{K}(\omega)$ se expresa en términos de la rigidez estática K_0 y los factores dinámicos k y c . Debido a que se utilizará un análisis en el dominio de la frecuencia para determinar los movimientos en distintos niveles de la estructura, se consideran la variación de las funciones de impedancia con la misma. Una vez determinados los espectros

del movimiento de entrada $u_g(\omega)u_g(\omega)$ y $\phi_g(\omega)$ y los valores de las funciones de impedancia, los movimientos en la superestructura se estiman considerando un modelo de viga de cortante como el presentado en Fernández-Sola y Avilés [17]. Este modelo, considera la flexibilidad de la base incorporando dos grados de libertad (uno de traslación y uno de rotación) y acoplado los valores de las funciones de impedancia en matrices de rigidez y amortiguamiento del sistema completo. La matriz de masa del sistema global, incluye aquellas asociadas a fuerzas de inercia que producirán movimientos de cuerpo rígido de la superestructura por flexibilidad de la base. Debido a que se resuelve el sistema en el análisis de la frecuencia, la no linealidad de la estructura y del suelo no pueden ser tomada en cuenta; sin embargo, por lo general el análisis de los contenidos de edificios (bloques rígidos) es importante para niveles de aceleración donde la estructura no ha sufrido daño considerable. Adicionalmente, al ser un modelo de viga de cortante donde cada uno de los entrepisos es modelado mediante un solo grado de libertad en traslación, se asume que: (1) el giro en todos los niveles es el mismo e igual al grado de libertad correspondiente a la base, sin excitar rotacionalmente las masas de la superestructura y (2) al considerar un modelo de masas concentradas, se asume que el bloque ubicado en cualquier parte de un mismo entrepiso sufrirá la misma excitación (horizontal y vertical).

3. Modelo dinámico del bloque rígido considerando la componente rotacional

3.1 Ecuaciones de movimiento

La Figura 1a presenta los parámetros que caracterizan el comportamiento de un bloque rígido rectangular sujeto a un movimiento sísmico de componente horizontal $u_n(t)$ y rotacional $\phi_0(t)$. En ella, b y h son las semi-dimensiones, O es el centro de masa del bloque, r es la distancia entre O y los vértices donde gira el bloque (1 y 2), $\alpha = \tan^{-1}(b/h)$ representa el parámetro de robustez (inverso de la relación de esbeltez). $\phi_0(t)$ considera el efecto de la componente de la excitación $\phi_g(t)$ y de la componente rotacional debida al cabeceo de cuerpo rígido de la superestructura. Allí mismo se presenta un esquema del bloque situado en un nivel particular del edificio considerando efectos IDSE (Figura 1b) y un diagrama de cuerpo libre de las fuerzas de inercia actuantes que provocan balanceo y/volteo durante la excitación sísmica (Figura 1c). Se considera: (1) positiva la rotación del bloque en sentido anti-horario y (2) un sistema inercial de referencia X-Y externo al edificio, por lo que todas las componentes del movimiento (aceleración, velocidad y desplazamiento

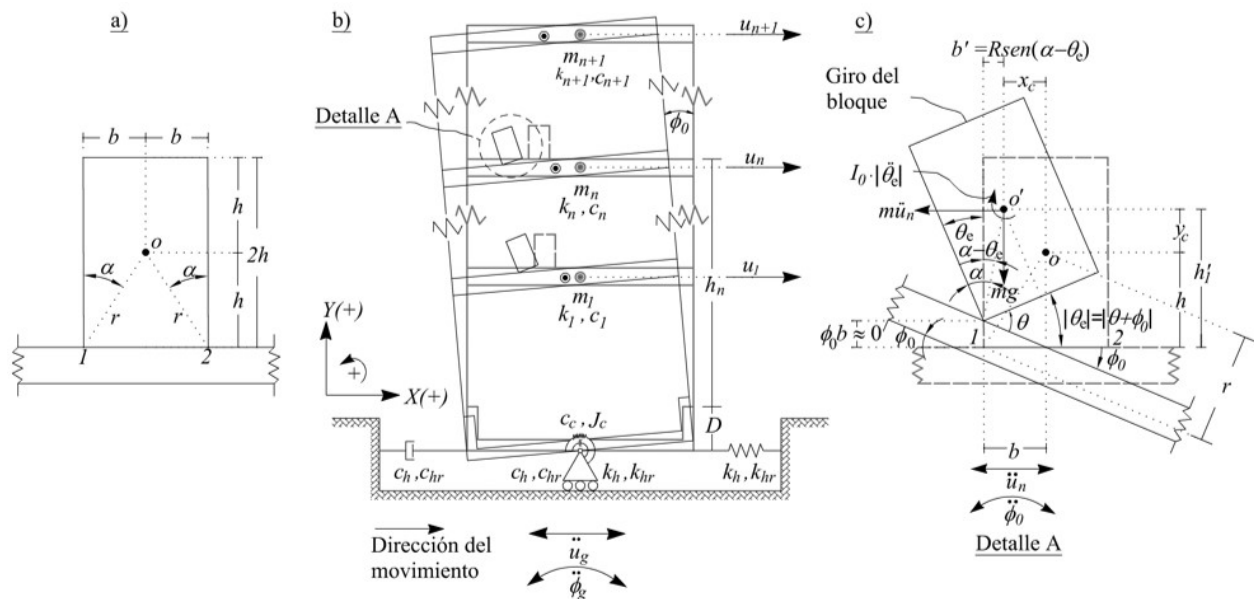


Figura 1. Esquema general del efecto IDSE sobre bloques rectangulares en edificios.

absoluto) son absolutos respecto a la posición original de la estructura. Estas fuerzas se incluyen en el cálculo de la respuesta de la misma (historias de aceleración, velocidad y desplazamiento horizontal y rotacional de cada uno de los niveles) según el modelo Fernández-Sola y Avilés [17]. Se considera que la masa del contenido es lo suficientemente pequeña respecto a la del edificio, por lo que no interviene en su respuesta. De esta forma, la respuesta en cada nivel de la estructura se calcula en un primer paso y posteriormente, dichas respuestas se emplean como excitación para los bloques respectivos.

Si la fricción entre bloque y superficie de apoyo es suficientemente grande para que no se produzca deslizamiento, a partir del diagrama de cuerpo libre del bloque rígido (Figura 1c) y con equilibrio de momentos alrededor de la esquina 1 donde ocurre movimiento, se tiene que:

$$I \cdot \ddot{\theta}_e - m \cdot \ddot{u}_n \cdot h' + m \cdot g \cdot b' = 0 \quad (2)$$

donde $|\theta_e| = |\theta + \phi_0|$ corresponde al giro equivalente, $b' = r \cdot \text{sen}(\alpha - |\theta_e|)$ y $h' = r \cdot \text{cos}(\alpha - |\theta_e|)$ son la distancia horizontal y vertical entre el centro de masa y la esquina en la actual posición, respectivamente, m es la masa del objeto, \ddot{u}_n es la aceleración en la base del bloque, $\ddot{\theta}_e$ es la aceleración equivalente rotacional, I es el momento polar de inercia del bloque rígido respecto a la esquina inferior ($I = I_0 + m \cdot r^2$) e I_0 es el momento polar de inercia del bloque respecto a su centro de masa. Como referentes, $x_c = b - r \cdot \text{sen}(\alpha - |\theta_e|)$ y $y_c = r \cdot \text{cos}(\alpha - |\theta_e|) + \phi_0 \cdot b - h$ representan la distancia horizontal y vertical del centro de masa antes y después de rotar el bloque, respectivamente; en general y debido a su magnitud respecto a otras componentes de y_c , la componente $\phi_0 \cdot b$ puede despreciarse.

Considerando la respuesta de bloques rectangulares simétricos ($I = 4/3 \cdot m \cdot r^2$), simplificando y agrupando términos, la Ec. (2) se reduce a:

$$\ddot{\theta}_e = \frac{3}{4 \cdot r} \left[\ddot{u}_n \cdot \text{cos}(\alpha - |\theta + \phi_0| - S(\theta) \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha - |\theta + \phi_0|) \right] - \ddot{\phi}_0 \quad (3)$$

donde $S(\cdot)$ es la función signo dependiente del sentido de giro del bloque.

La solución de la Ec. (3) se obtiene a través del método de la diferencia central media (mayor detalle en [18]); cuando se consideran poco significativas las componentes rotacionales $\phi_0(t)$ y $\ddot{\phi}_0(t)$, se obtiene la expresión dinámica comúnmente empleada en la

literatura para balanceo de bloques rectangulares sin considerar efectos IDSE [p.e. 2, 3, 4].

Se ha probado experimentalmente, a través de pruebas realizadas en mesa vibradora del Instituto de Ingeniería de la UNAM, que este modelo permite calcular con buena precisión la respuesta de un objeto rígido regular bajo cargas sísmicas [19].

3.2 Condición de volteo

El modo de volteo comienza cuando el bloque gira alrededor de uno de sus vértices y se levanta; esto ocurre cuando la magnitud del momento resistente M_R , debido al peso del bloque $m \cdot g$, es menor que el momento de volteo M_0 debido a la fuerza inercial $m \cdot \ddot{u}_n$ y la aportación al giro introducido por la componente rotacional de la excitación $I \cdot \ddot{\phi}_0 = 4r^2 \cdot \ddot{\phi}_0 / 3$. La aceleración mínima requerida en la base del bloque rectangular para iniciar su movimiento por balanceo considerando las componentes horizontal y rotacional de la excitación es:

$$\ddot{u}_n \geq \frac{b}{h} g + \frac{4}{3} \frac{r^2 \cdot \ddot{\phi}_0}{h} \quad (4)$$

3.3 Condición de impacto durante fase de volteo

Cuando el bloque gira, se asume que la rotación es continua entre vértices de apoyo (ver Figura 1a) impactando sin rebote y pivoteando en los mismos (p.e., desde 1 a 2), mientras que el momento angular se conserva. Asociando los superíndices '+' y '-' al post y pre-impacto, respectivamente, y considerando los momentos angulares después del impacto $Q^+ = m \cdot r \cdot \dot{\theta}_e^+$ y $Q^- = m \cdot r \cdot \dot{\theta}_e^-$, es posible obtener el valor de la velocidad angular post-impacto cuando el bloque se aproxima a la base alrededor de la esquina izquierda Ec. (5) o derecha Ec. (6), como:

$$(\dot{\theta}_e^+) = \beta \cdot (\dot{\theta}_e^-) \quad (5)$$

$$(\dot{\theta}_e^-) = \beta \cdot (\dot{\theta}_e^+) \quad (6)$$

donde $\beta \in [0,1]$ representa una fracción de la velocidad angular del bloque inmediatamente antes del impacto, $\dot{\theta}_e^+ = (\dot{\theta}^+ + \dot{\phi}_0^+)$ y $\dot{\theta}_e^- = (\dot{\theta}^- + \dot{\phi}_0^-)$. Tomando momentos en alguna esquina del bloque inmediatamente antes del impacto, simplificando y agrupando términos de las Ecs. (5) y (6), la fracción de la velocidad angular para el caso rectangular ($I = 4/3 \cdot m \cdot r^2$) será:

$$\beta = 1 - 1,5 \cdot \text{sen}^2(\alpha) \quad (7)$$

4. Caso de aplicación: Bloques rígidos en edificios con IDSE

Este trabajo muestra la respuesta dinámica de bloques rígidos rectangulares simplemente apoyados en edificios considerando efectos IDSE. Se analizaron tres modelos de edificios típicos y de estructuración regular en altura, ubicados en un sitio cuyas propiedades son representativas del subsuelo del valle de México (periodo dominante común en zona blanda $T_s \sim 2$ s). La variación del movimiento en altura dentro del edificio y su afectación en la dinámica de contenidos rígidos es evaluada a través de modelos simplificados que consideran o no el efecto IDSE.

4.1 Descripción de los edificios modelados

Se analizó la respuesta de edificios de 5, 10 y 15 pisos con base cuadrada y altura de entrepiso de 3m, a excepción de planta baja, estructurados a base de marcos caracterizados por su rigidez de entrepiso y conectados por medio de un sistema de piso indeformable (diafragma rígido). Se consideró regularidad estructural en altura y como modelo base, el edificio descrito en la sección de análisis de efectos de IDSE del Manual de Diseño por Sismo de la Comisión Federal de Electricidad [20]. La relación de esbeltez del edificio H/B se mantuvo casi constante, alrededor de un valor de 1,5. El peso de entrepiso se propuso proporcional a su área. Los periodos fundamentales de los edificios en base rígida son de $T_e = 0,49$ s ($\omega_e = 12,74$ rad/s), $T_e = 1,16$ s ($\omega_e = 5,39$ rad/s) y $T_e = 1,59$ s ($\omega_e = 3,94$ rad/s). La cimentación consiste de un cajón desplantado a diferentes profundidades (2,5, 5 y 7,5 m para los edificios de 5, 10 y 15 niveles, respectivamente). Para el cálculo de las propiedades de la cimentación (profundidad de desplante D , momento polar de inercia J_c y masa de la cimentación M_c) se mantuvo constante los parámetros adimensionales que influyen en la respuesta dinámica de estructuras sobre base flexible. Como el modelo estudiado considera un solo estrato homogéneo, se estableció un único espesor del estrato $H_z = 17,5$ m y una velocidad de propagación de ondas de cortante de $V_z = 100$ m/s representativa de la zona de estudio [21, 22, 23]. La Tabla 1 presenta los parámetros estructurales equivalentes para el caso considerando IDSE y el parámetro γ representativo de la relación entre las rigideces de la estructura y el suelo [16]; a medida que γ es menor, la rigidez del suelo respecto a la

estructura es menor y por lo tanto se espera que los efectos IDSE sean más significativos.

Tabla 1. Parámetros equivalentes de IDSE para los edificios en estudio

Edificio	Base Rígida		γ	Base Flexible
	H_e (m)	T_e (s)		T_e (s)
5 Niveles	11,35	0,49	0,760	0,59
10 Niveles	21,23	1,16	0,956	1,30
15 Niveles	31,25	1,59	0,891	1,80

4.2 Movimiento sísmico de entrada

Para evaluar el efecto de IDSE sobre los edificios seleccionados, se considera como movimiento de campo libre el sismo registrado en el sitio SCT (Secretaría de Comunicaciones y Transportes) durante el evento del 19 de septiembre de 1985, con alrededor de 200 segundos de duración. Los efectos de sitio no se calcularon, considerando que estos están incluidos en el registro correspondiente; esto con la finalidad de que los cambios observados entre las respuestas de edificios con base rígida y flexible sean asociados exclusivamente a efectos IDSE. Sin embargo, es de esperarse que un edificio con base rígida esté sometido a un movimiento representativo de suelo firme. Adicionalmente, se obtuvo la componente rotacional en los edificios debida a IDSE como se describe en la Sección 2. Se observó que la componente horizontal de la excitación en la base para los tres edificios con IDSE permanece casi invariante (1,58 a 1,77m/s²), como es de esperarse, mientras que la componente rotacional de la excitación que se transmite en altura de la estructura es mayor conforme crece el ancho y profundidad de desplante de la cimentación (un máximo de $\sim 0,002$ rad/s² para el edificio de 15 niveles). En azotea se observaron amplificaciones del orden de 1,18, 1,12 y 2,53 para los edificios de 5, 10 y 15 pisos, respectivamente. Con base rígida las intensidades en base y amplificaciones en altura son inferiores. La Figura 2 presenta el espectro de respuesta para el movimiento considerado, ubicando los periodos estructurales de los edificios en estudio, considerando T_e para el caso de base rígida y \tilde{T}_e para base flexible (ver Tabla 1). Dependiendo de la zona del espectro y considerando IDSE, un edificio podría ubicarse en la subida o caída del espectro de respuesta soportando intensidades espectrales mayores o menores.

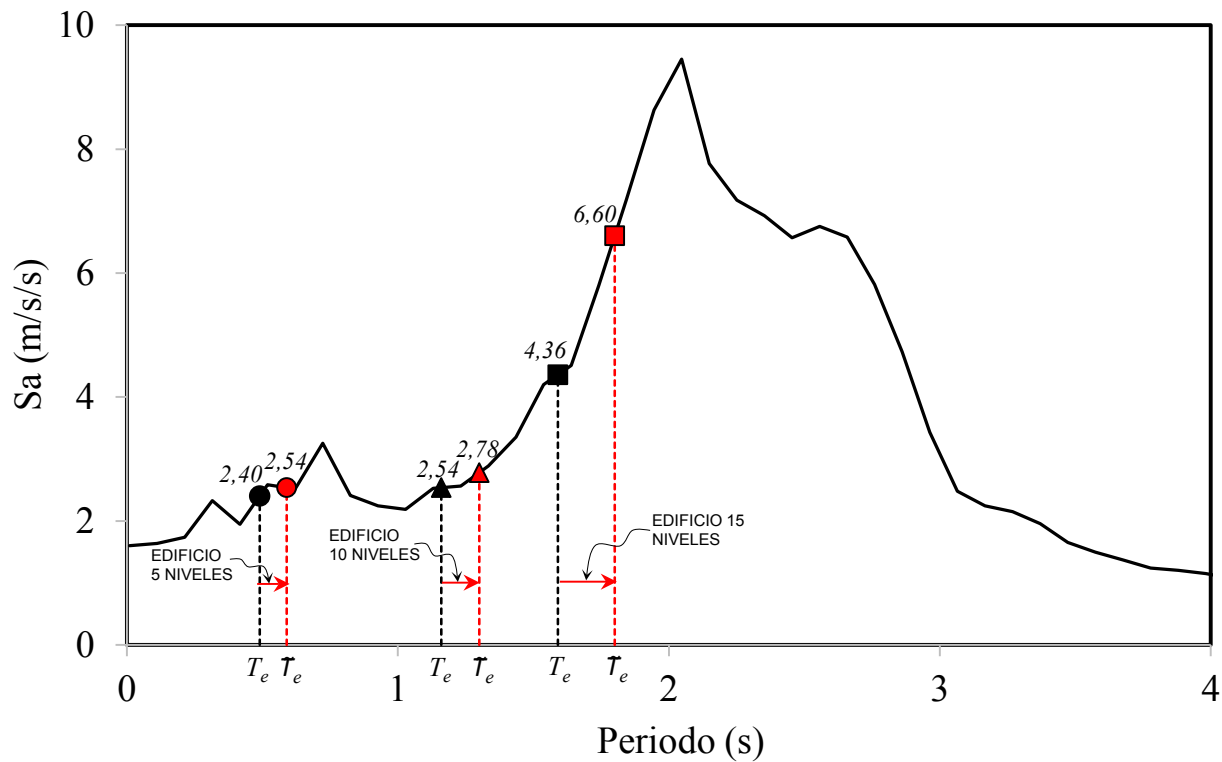


Figura 2. Espectro de respuesta del sismo del 19 de septiembre de 1985 (estación SCT) y cambio del periodo fundamental de los edificios estudiados con base rígida T_e y flexible T_ϵ

4.3 Respuesta dinámica de un bloque rígido con y sin IDSE

Se presenta la respuesta dinámica de un bloque rígido representativo de contenidos simétricos que comúnmente se encuentran en edificios ante los movimientos de piso calculados. El bloque tiene dimensiones absolutas ancho \times alto de 0,60 \times 2,4m, respectivamente, y se asocia a cuerpos esbeltos con $\alpha < 20^\circ$ y $h/b > 2,75$ de almacenes, oficinas y/o museos, con importante propensión a dañarse si se vuelcan o impactan (p.e. racks, libreros, CPUs, UPS, cristalería, entre otros). La Figura 3 presenta las historias de rotaciones en el tiempo para el bloque rígido analizado, en diferentes pisos de los edificios en estudio sin/con IDSE y considerando un valor nulo de la componente rotacional ($\phi_0 = 0$). Se identifican tres modos de respuesta que desde el reposo y sin deslizamiento puede presentar un bloque rígido: reposo, balanceo y volteo; el volteo puede ocurrir repentinamente (sin impacto) o después de oscilar e impactar con la superficie de apoyo. Se observó que, para el caso en estudio, en planta baja el efecto de IDSE no es significativo, en edificios bajos

(5 niveles) se pueden alcanzar oscilaciones importantes ($\sim 20^\circ$) y presentarse volteo en niveles intermedios-superiores. Adicionalmente, se construyen las curvas de volteo para los movimientos de entrepiso de los edificios en estudio; estas se obtienen para cuerpos rígidos rectangulares de ancho $2b$ y altura $2h$ e indican, regiones de estabilidad donde el cuerpo permanece en reposo y/o balanceo (Zona I por debajo de la curva) y volteo (Zona II por encima de la curva). La forma de estas curvas depende del tipo y características del movimiento de excitación [18]. La Figura 4 presenta las curvas de volteo para los casos sin/con IDSE y considerando un valor nulo de la componente rotacional ($\phi_0 = 0$) y el bloque estudiado (círculo rojo). Se observó que en edificios pequeños (5 pisos) las curvas resultan similares en altura del edificio con y sin IDSE, en edificios altos (10 y 15 pisos) la curva de volteo con IDSE presenta menor pendiente que para el caso con base rígida volcando más objetos, y las curvas de volteo para el caso con IDSE y para el caso con IDSE + $\phi_0 = 0$ son muy similares.

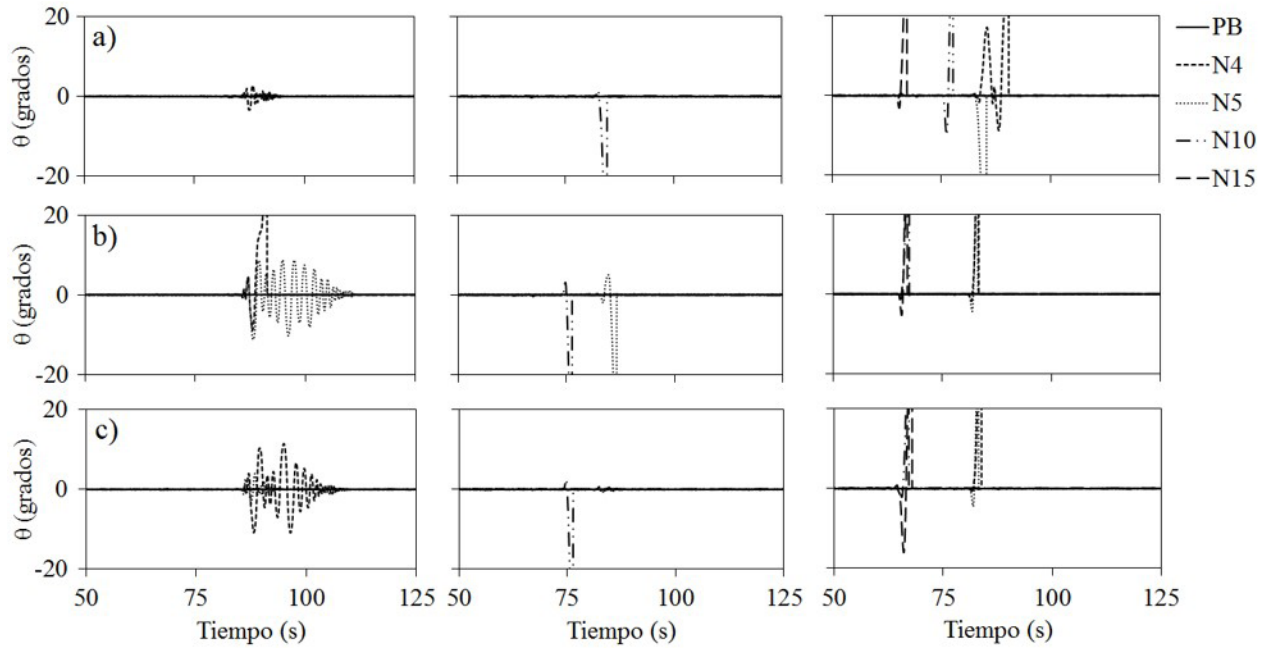


Figura 3. Respuesta de bloque rígido en diferentes niveles de los edificios de 5 (izquierda), 10 (centro) y 15 (derecha) pisos en estudio: a) sin IDSE, b) con IDSE y c) con IDSE ($\phi_0 = 0$)

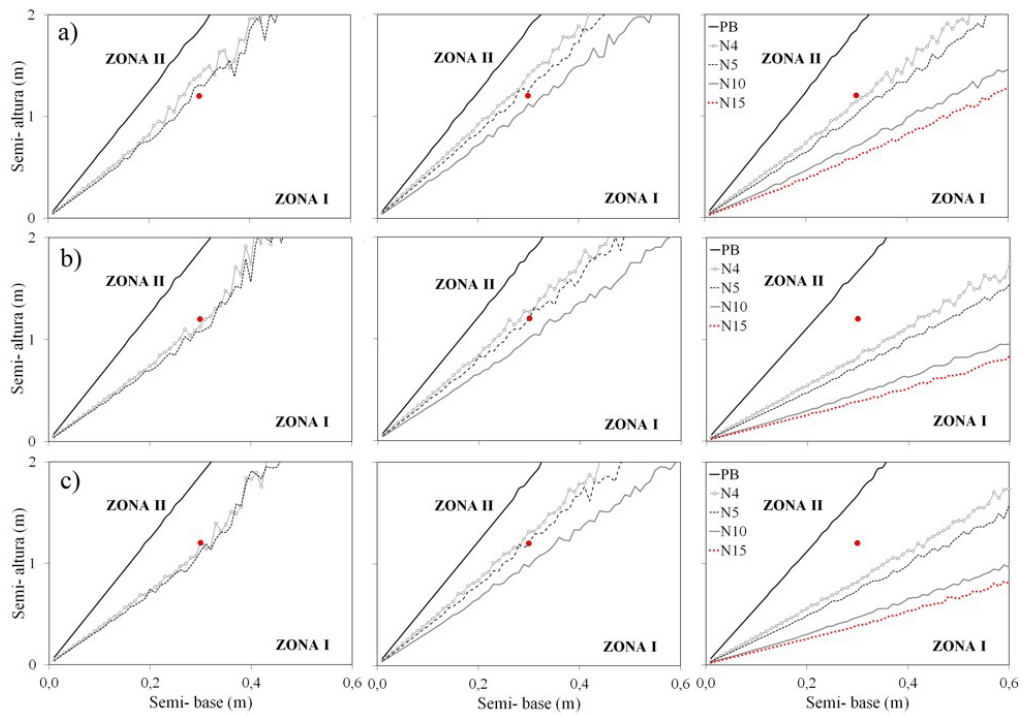


Figura 4. Curvas de volteo en diferentes niveles de los edificios de 5 (izquierda), 10 (centro) y 15 (derecha) pisos en estudio: a) sin IDSE, b) con IDSE y c) con IDSE ($\phi_0 = 0$)

5. Conclusiones

Se realiza un análisis de la influencia de los efectos de interacción dinámica suelo-estructura (IDSE) en el comportamiento de cuerpos rígidos simétricos dentro de edificaciones. Para ello, se propone un modelo dinámico de la respuesta de un bloque regular libremente apoyado sujeto a la acción conjunta de un movimiento con componentes en traslación y rotación. La IDSE afecta el comportamiento de contenidos en edificios provocando volteo en niveles inferiores donde antes no se presentaba caída y cambiando la dirección de caída, respecto a los resultados con base rígida. La componente rotacional del movimiento en la base del objeto lo hace más propenso a colapsar (ver historia de rotaciones en niveles N4 y N5 para los casos con y sin efecto IDSE). Al menos para el caso en estudio, se observa: (1) es importante considerar los efectos tanto cinemáticos como inerciales de la IDSE en el comportamiento de contenidos, (2) ignorar la componente rotacional de la IDSE puede producir estimaciones erróneas del modo de respuesta de un bloque, especialmente en los límites de las curvas de volteo, (3) en edificios con base flexible, los cuerpos rígidos son más susceptibles a sufrir volteo debido a modificaciones en el movimiento de entrepiso asociadas a un cambio en el periodo estructural y a las modificaciones introducidas por el movimiento de cuerpo rígido (giros y traslaciones adicionales), (4) las curvas de volteo para los movimientos de entrepiso con efectos IDSE estiman un mayor número de combinaciones de semi-dimensiones h y b para las cuales los cuerpos son susceptibles a voltearse y (5) como era de esperarse, las diferencias de la respuesta de los bloques en edificios con base rígida y flexible se acentúan en niveles superiores del edificio.

6. Referencias

- [1] Milne J.: "Seismic experiments". Transactions of the Seismological Society of Japan, Vol. 8, (1885) 1-82.
- [2] Housner G. W.: "The behavior of inverted pendulum structure during earthquakes". Bulletin Seismological Society America, Vol. 53, No. 2 (1963) 403-417.
- [3] Makris N. y Zhang J.: "Rocking Response of Anchored Blocks under Pulse-Type Motions". Journal of Engineering Mechanics, Vol. 127, No. 5 (2001) 484-493.
- [4] Shenton H. W.: "Criteria for initiation of slide, rock, and slide-rock rigid-body modes". J Eng Mech ASCE, Vol. 122, No 7 (1996) 690-3.
- [5] Yim C. S., Chopra, A. K. y Penzien: "Rocking response of rigid bodies to earthquakes". Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 8, No. 6 (1980) 565-587.
- [6] Zhang J. y Makris N.: "Rocking response of free-standing blocks under cycloid pulses". J Eng Mech, ASCE, Vol. 127, (2001) 473-483.
- [7] Aslam M., Godden W. y Scalise T.: "Earthquake rocking response of rigid bodies". Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 106, (1980) 377-392.
- [8] Apostolou M., Gazetas G. y Garini E.: "Seismic response of slender rigid structures with foundation uplifting". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 27, (2007) 642-654.
- [9] Makris N.: "A half-century of rocking". Earthquakes and Structures, Vol. 7, No. 6 (2014a) 1187-1221.
- [10] Makris N.: "The role of the rotational inertia on the seismic resistance of free-standing rocking columns and articulated frames". Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 104, No. 5, (2014b) 2226-2239.
- [11] Whitman R. V. y Bielak J.: "Design earthquake resistant structures: foundations". Ed. E Rosenblueth, Pentech Press, England, 1980.
- [12] Wolf P. J.: "Dynamic Soil-Structure Interaction". Prentice-Hall, New Jersey, 1985.
- [13] Kausel E, Whitman R. V., Morray J. P. y Elsabee F.: "The spring method for embedded foundations". Nuclear Engineering and Design, Vol. 48, (1978) 377-392.
- [14] Avilés J. y Pérez-Rocha L. E.: "Bases para las nuevas disposiciones reglamentarias sobre interacción dinámica suelo-estructura". Revista de Ingeniería Sísmica, Vol. 71, (2004) 1-36.
- [15] Gazetas G.: "Analysis of machine foundation vibrations: state of the art". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 2, (1983) 2-42.
- [16] NTCS-04: "Normas técnicas complementarias para diseño por sismo", Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal, 2004.
- [17] Fernández-Sola L.R. y Avilés J.: "Efectos de interacción suelo-estructura en edificios con planta baja blanda". Revista de Ingeniería Sísmica, Vol. 79, (2008) 71-90.

- [18] Arredondo C. y Reinoso E.: "Influence of frequency content and peak intensities in the non - linear seismic response of rigid bodies". *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 12, No. 4 (2008) 517-533.
- [19] Arredondo C., Jaimes, M. A. y Reinoso E.: "A simplified model to evaluate the dynamic rocking behavior of irregular free-standing rigid bodies calibrated with experimental shaking-table tests". *Journal of Earthquake Engineering*, (2016).
- [20] CFE, Comisión Federal de Electricidad: "Manual de diseño de obras civiles – Diseño por sismo", 1993.
- [21] Smith H. y Wu W.: "Effective optimal structural control of soil structure-interaction systems". *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 26, (1997) 549-570.
- [22] Stehmeyer E.H. y Rizos D.: "Considering dynamic soil structure interaction (SSI) effects on seismic isolation retrofit efficiency and the importance of natural frequency ratio". *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol. 28, (2008) 468-479.
- [23] Carbonari S., Dezi F. y Graziano L.: "Linear soil-structure interaction of coupled wall-frame structures on pile foundations". *Soil Dynamics and Earthquake engineering*, Vol. 31, (2011) 1296-1309.

Recibido el 19 de agosto de 2015
En forma revisada el 03 de Octubre de 2016



UNIVERSIDAD
DEL ZULIA

REVISTA TECNICA

DE LA FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD DEL ZULIA

Vol. 39. N°3, Diciembre 2016_____

*Esta revista fue editada en formato digital y publicada en Diciembre de 2016, por el **Fondo Editorial Serbiluz**, Universidad del Zulia. Maracaibo-Venezuela*

www.luz.edu.ve
www.serbi.luz.edu.ve
produccioncientifica.luz.edu.ve