

Incertidumbre en la evaluación de periodos en edificios de mampostería tipo INFONAVIT ubicados en Chilpancingo, Guerrero

Uncertainty of evaluation periods masonry buildings INFONAVIT type at Chilpancingo, Guerrero

Hermenegildo Peralta Gálvez^{1*}, Sulpicio Sánchez Tizapa², Roberto Arroyo Matus²

Peralta Gálvez, H., Sánchez Tizapa, S., Arroyo Matus, R. Incertidumbre en la evaluación de periodos en edificios de mampostería tipo INFONAVIT ubicados en Chilpancingo, Guerrero. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*. Número 63: 32-39, septiembre-diciembre 2014.

RESUMEN

Un estudio acerca de los periodos fundamentales ha sido desarrollado en edificios de mampostería representativa ubicada en la tercera sección del barrio de INFONAVIT en Chilpancingo, Guerrero (México).

Con el fin de evaluar los periodos de vibración de estas estructuras se han aplicado métodos clásicos, modelos analíticos, así como registros acelerométricos in-situ, después se realizan comparaciones entre estos métodos. Además, se utilizó la información experimental de una vivienda de mampostería de dos pisos, construida y probada en el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) para realizar evaluaciones adicionales. Los resultados muestran que en el edificio de cinco pisos la relación entre el período fundamental para un método clásico y un analítico fue 54.38% y 50.56% para la relación entre un clásico y un método acelerométrico. En el caso de la vivienda de dos pisos la relación entre un método clásico y uno analítico fue de 63.37%.

Palabras clave: mampostería, periodos de vibrar, rigidez, módulo elástico, módulo de cortante, torsión.
Keywords: masonry, vibrate periods, stiffness, elastic modulus, shear modulus, torsion.

Recibido: 11 de septiembre de 2013, aceptado: 25 de julio de 2014

¹ Maestría en Ingeniería Sísmica, Unidad Académica de Ingeniería, Universidad Autónoma de Guerrero.

² Unidad Académica de Ingeniería, Universidad Autónoma de Guerrero.

* Autor para correspondencia: inghermes@live.com.mx

ABSTRACT

The representative masonry buildings evaluated are located at the 3rd section of the INFONAVIT neighborhood in Chilpancingo, Guerrero (Mexico).

In order to evaluate the periods of vibration of these structures, classical methods and analytical models, as well as in-situ accelerometric records on buildings were applied, and then compared to find out variations among these methods. In addition, experimental and accelerometric instrumentation for a two story masonry dwelling, built and tested at the National Center for Disaster Prevention (CENAPRED), were used to perform additional assessments. In this way, for a five storied building, the ratio between the fundamental period for a classical and an analytical method was 54.38%; and 50.56% for a ratio between a classical and an accelerometric method. In the case of a two storied masonry building, a ratio between a classical and an analytical method was 63.37%.

INTRODUCCIÓN

El periodo fundamental de vibrar de un edificio es un parámetro clave para el diseño sísmico de una estructura; en el caso de construcciones existentes es un valor que puede ayudar a determinar las condiciones actuales de seguridad estructural. Generalmente los códigos de construcción proporcionan fórmulas empíricas para estimar el periodo fundamental, dichas expresiones se basan en registros de edificios durante el movimiento del suelo obtenidos en modelos elaborados con elementos finitos (Barghi y Azadbakht, 2009).

En la mayoría de los proyectos de diseño las fórmulas empíricas se utilizan para iniciar el proceso donde el periodo se expresa generalmente como una función de la altura del edificio (Kwon y Soo, 2009). En el caso de México, la expresión para determinar dicho valor es (Carbajal, 2005): $P=0.1N$, donde P = Período fundamental de vibración y N = Número de niveles. Durante la vida útil de las construcciones, los periodos de vibración tienen un cambio importante que define la posibilidad de reforzamiento (Ramírez y Guerrero, 2000).

En esta investigación se utilizan los métodos clásicos; el modelo numérico desarrollado con método de elemento finito (MEF) y el registro de vibración ambiental para evaluar periodos fundamentales de vibrar de dos edificios típicos ubicado en la unidad habitacional de INFONAVIT en Chilpancingo, Guerrero (Figura 1). Un total de 705 edificios similares existen en la unidad habitacional "El Coloso" de Acapulco. La cimentación de los edificios se integra por zapatas corridas y contratrabes de concreto reforzado, los muros son de mampostería reforzada con block hueco de $19 \times 19 \times 39$ cm, refuerzo interior vertical de varillas del #4 y losas prefabricadas de concreto de 10 cm de espesor (Figura 2).

De acuerdo a la información proporcionada por los propietarios, los edificios fueron construidos aproximadamente hace 30 años, con una versión del reglamento de construcciones que no era tan exigente como la actual. Los inmuebles estudiados en campo son los edificios No. 5 y No. 15 ubicados en las coordenadas geográficas $17^{\circ}31'50.70''$ N- $99^{\circ}29'22.96''$ O y $17^{\circ}31'49.00''$ N- $99^{\circ}29'20.67''$ O,



Figura 1. Localización de edificios en estudio. Unidad habitacional INFONAVIT, Chilpancingo, Gro.

respectivamente. El primer edificio presenta grietas en los muros, humedad en losas y un desplome de 5.89 cm en la dirección NO del edificio; el segundo no tiene problemas estructurales visibles. Las dimensiones en planta son 8.90×18.80 m con 2.50 m de altura de cada entrepiso y una altura total de 12.50 m. Ambas estructuras presentan las siguientes características: relación lado mayor a lado menor igual a 2.11 y relación altura a lado corto igual a 1.40 (Figura 3). A partir del modelo arquitectónico original se elaboró otro donde se eliminaron los entrantes y salientes para revisar la variación de los periodos (Figura 4).

Por otro lado, la vivienda de dos niveles, construida y ensayada por el CENAPRED (Sánchez et al., 1996) presenta las siguientes características: relación lado mayor a lado menor igual a 2.0 y relación altura a lado corto igual a 2.0, construida con muros de mampostería. También se tienen registrados los periodos de vibrar con los métodos vibración ambiental y modelos numéricos (Figura 5).



Figura 2. Fachada de edificios en estudio, a) Chilpancingo; b) Acapulco, Gro.

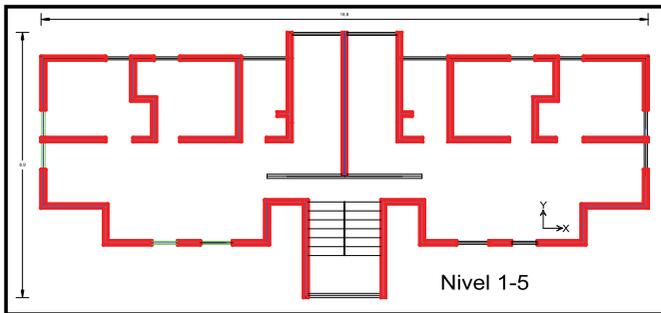


Figura 3. Plano arquitectónico del edificio en estudio.

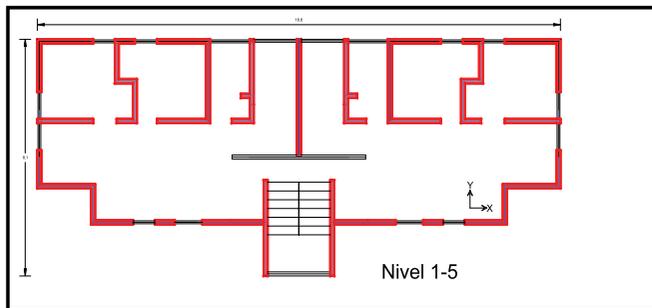


Figura 4. Plano arquitectónico modificado sin entrantes ni salientes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Existen varias formas de evaluar los periodos de vibrar, en esta investigación se utilizan algunas que van desde la más simple como los marcos planos hasta los modelos tridimensionales de elemento finito.

1) Métodos clásicos

Método simplificado de análisis. Este método está descrito en las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (GDF, 2004). La rigidez elástica de los muros se obtuvo con las expresiones de la teoría de la elasticidad [1] que involucra tanto el componente de flexión como el de cortante, donde el valor de $\beta=0$ y $k=1.2$ (Pérez, 2012):

$$K_m = \left(\frac{(4-3\beta) H^3}{12EI} + \frac{kH}{GA} \right)^{-1} \quad [1]$$

donde β es el parámetro que define la condición de frontera del muro (empotramiento en la base, para este caso $\beta=0$); k el factor de forma de cortante; H la altura del espécimen en m; E corresponde al módulo de elasticidad del material que constituye al espécimen en t/m^2 ; I el momento de inercia con respecto al eje centroidal de la sección transversal en la dirección de la deformación en m^4 ; G_m

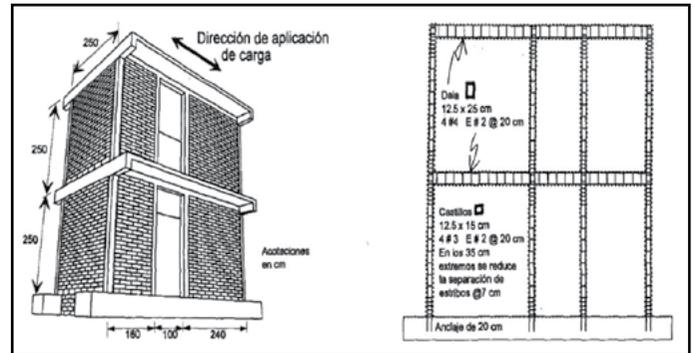


Figura 5. Fachada y alzado de vivienda estudiada (CENAPRED).

corresponde al módulo de rigidez al corte en t/m^2 ; A representa el área de cortante en m^2 , y K_m la rigidez elástica de los muros en t/m . Los valores de E_m y G_m se obtuvieron de la siguiente manera: $E_m = 800f_m^*$, donde $f_m^* = 537.50 t/m^2$ y $G_m = 0.40 E_m$; por tanto, $E_m = 430,000 t/m^2$ y $G_m = 172,000 t/m^2$. Una vez determinada la rigidez elástica se ensambla la matriz de rigidez y masa para posteriormente resolver la ecuación característica del sistema y obtener las frecuencias circulares. Los periodos fundamentales de vibrar de los inmuebles se evalúan con la expresión [2]:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad [2]$$

donde T es el periodo fundamental de vibrar en segundos, ω la frecuencia circular en rad/seg.

Método estático. Este método se basa fundamentalmente en la forma modal asociada al primer modo de vibración de una estructura. Las fuerzas sísmicas se calculan sin el coeficiente sísmico c , ya que no tiene efecto en el cálculo del periodo fundamental. La expresión [3] se utilizó para evaluar los periodos (NTCDF, 2004):

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum W_i x_i^2}{g^* \sum F_i x_i}} \quad [3]$$

donde T es el periodo fundamental de vibración; W_i el peso de la i -ésima masa sobre el desplante; F_i la fuerza lateral que actúa en el i -ésimo nivel; x_i es el desplazamiento del nivel i , relativo a la base de la estructura, en la dirección de la fuerza, y g representa la aceleración de la gravedad.

2) Modelo numérico

Se utilizó el software SAP2000 no-lineal para elaborar los modelos refinados de los inmuebles mediante MEF. Para los edificios de INFONAVIT se hizo un

modelo completo del edificio (Figura 6) y después se eliminaron los salientes o entrantes para verificar el efecto de torsión generado y comparar sus efectos (Figura 7). Se emplearon elementos tipo cascarón grueso (*shell-thick*) para modelar muros y losas con dimensiones de 45 x 45 cm, generando 7,435 elementos tipo *shell* con 34,905 y 15,968 grados de libertad de la rigidez y masa de la estructura, respectivamente; el efecto de la torsión debido a la excentricidad se obtuvo de manera automática.

3) Registro de vibración ambiental

Según la instrumentación acelerográfica para obtener los periodos fundamentales de vibración, en los edificios No. 5 y No. 15 de la unidad habitacional de INFONAVIT tercera etapa se utilizó una grabadora K2 de Kinematics y un sensor acelerográfico triaxial. Las pruebas consistieron en colocar y orientar los ejes del sensor en los centros geométricos y esquinas de azotea respecto a los ejes del edificio; también se tomó un registro acelerográfico en el suelo. De éstos se obtuvieron los espectros de amplitudes de Fourier, y mediante la función de transferencia (Peralta, 2013) se evaluaron los periodos fundamentales de vibrar de los edificios. La Figura 8 muestra el registro de vibración ambiental de un inmueble.

RESULTADOS

Las siguientes tablas presentan los periodos de vibrar de los inmuebles obtenidos con diferentes métodos. Para el edificio sin daños los métodos clásicos presentan valores similares entre ellos. La torsión predomina en el primer modo de vibrar para el modelo numérico debido a la geometría de la estructura, mientras que en el registro de vibración ambiental predomina el lado corto; también se presentan los valores de los periodos y su normalización respecto al método estático (Figura 9).

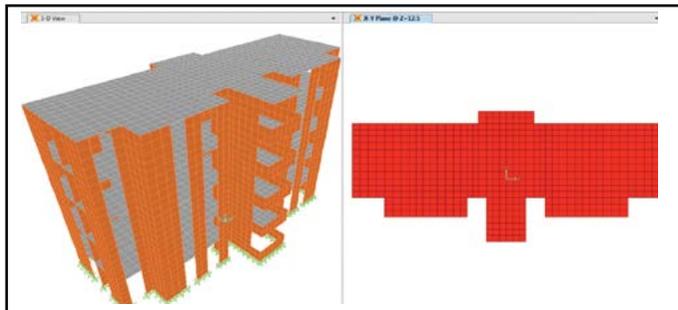


Figura 6. Modelo numérico de los edificios de INFONAVIT.

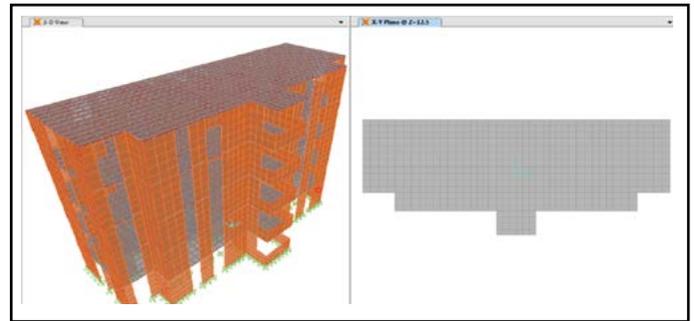


Figura 7. Modelo numérico modificado de los edificios de INFONAVIT.

En los registros de vibración ambiental, el edificio No. 5 con daños registra altos valores con respecto al inmueble No. 15 sin daños; en la dirección corta los valores varían de 0.569 a 0.640 segundos, lo que representa un incremento de 11.09%. En la dirección longitudinal hay una variación de 0.427 a 0.569 segundos con 24.96% de incremento, como se puede ver en la Tabla 2 y en la Figura 10.



Figura 8. Obtención de registros acelerográficos de la unidad habitacional INFONAVIT.

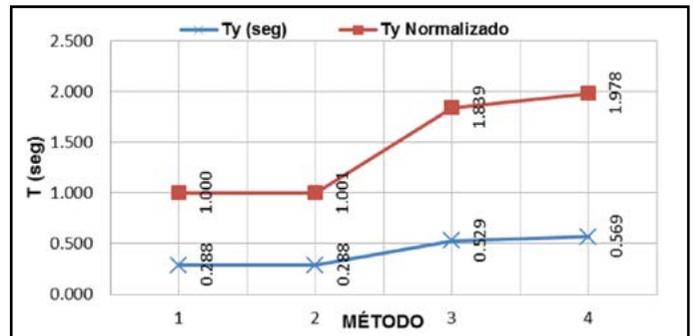


Figura 9. Comparación de periodos en dirección Y y normalización respecto al método estático en edificio sin daños.

Tabla 1. Períodos de vibrar del edificio No. 15 de la unidad habitacional INFONAVIT sin daños

Dirección	Método				
	1 ESTÁTICO (T, seg)	2 SIMPLIFICADO (T, seg)	3 SAP2000 (T, seg)	4 VIBRACIÓN AMBIENTAL (T, seg)	
X (LARGO)	0.153	0.153	0.491	0.427	CENTRO-AZOTEA
Y (CORTO)	0.288	0.288	0.529	0.569	CENTRO-AZOTEA
TORSIÓN	-	-	0.563	0.513	ESQUINA-AZOTEA

Tabla 2. Períodos de vibrar del edificio No. 5 (con daño) y No. 15 (sin daño)

Método de vibración ambiental		
DIRECCIÓN	EDIFICIO DAÑADO, T (seg)	EDIFICIO SANO, T (seg)
X (LARGO)	0.569	0.427
Y (CORTO)	0.640	0.569
TORSIÓN	0.513	0.513

Como la planta arquitectónica del edificio estudiado tiene salientes y entrantes, predomina el efecto de torsión en el primer modo de vibrar del modelo numérico, como se puede ver en la Tabla 1. Para evaluar este efecto se analizó una estructura donde se eliminaron los salientes y entrantes. En este modelo los resultados muestran que el primer modo con efecto de torsión pasa a ser el segundo modo; los métodos clásicos mantienen la misma tendencia, ya que no evalúan el efecto de torsión, como se puede ver en la Tabla 3 y en la Figura 11.

Tabla 3. Períodos de vibrar del edificio No. 15 sin salientes

Dirección	Método		
	1 ESTÁTICO (T, seg)	2 SIMPLIFICADO (T, seg)	3 SAP2000 (T, seg)
X (LARGO)	0.151	0.151	0.494
Y (CORTO)	0.301	0.301	0.590
TORSIÓN	-	-	0.566

Con el objeto de obtener los valores registrados con vibración ambiental, en el modelo numérico del edificio de INFONAVIT No. 15 sin daños se varió la rigidez para alcanzar un valor de $T = 0.569$ segundos

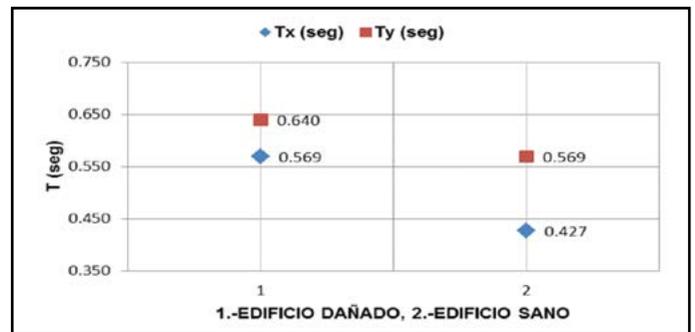


Figura 10. Comparación de períodos del edificio dañado y sin daño según el método de vibración ambiental.

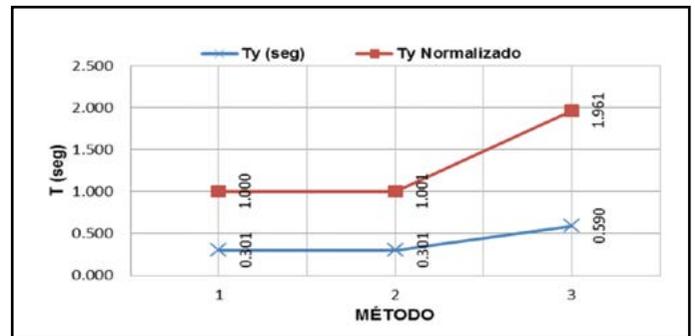


Figura 11. Comparación de períodos en dirección Y, y normalización respecto al método estático, en edificio No. 15 sin salientes.

despreciando el efecto de la torsión, para esto se usó como variable el módulo elástico de los muros de mampostería, $E_m = 156,780 \text{ t/m}^2$, este valor representa 36.46% del original, la Tabla 4 presenta los valores obtenidos para cada método aplicado en este modelo modificado.

En el caso de la vivienda de mampostería ensayada por el CENAPRED, los métodos clásicos y el de vibración ambiental arrojaron períodos de vibrar similares, mientras que el método numérico varía ligeramente, como se observa en la Tabla 5.

Tabla 4. Periodos de vibrar del edificio No. 15 con degradación de rigidez

Dirección	Método			
	1 ESTÁTICO (T, seg)	2 SIMPLIFICADO (T, seg)	3 SAP2000 (T, seg)	4 VIBRACIÓN AMBIENTAL (T, seg)
X (LARGO)	0.162	0.162	0.526	0.427
Y (CORTO)	0.306	0.306	0.568	0.569

Tabla 5. Periodos de vibrar de la vivienda ensayada por el CENAPRED

Dirección	Método			
	1 ESTÁTICO (T, seg)	2 SIMPLIFICADO (T, seg)	3 SAP2000 (T, seg)	4 VIBRACIÓN AMBIENTAL (T, seg)
X (LARGO)	0.065	0.065	0.090	0.065
Y (CORTO)	0.074	0.074	0.117	0.077
TORSIÓN	-	-	0.065	0.043

DISCUSIÓN

Al normalizar los periodos (Figura 9) se aprecia que los dos métodos clásicos tienen el mismo resultado y que los métodos de modelo numérico y de vibración ambiental presentan una relación de 1.839 y 1.978, respectivamente, respecto a los clásicos. Como se observa, los métodos clásicos se aplican generalmente para marcos planos y no consideran la influencia de los marcos ortogonales como lo aplican los métodos numéricos y de vibración ambiental.

El inmueble No. 5 con daños en la estructura tiene un periodo fundamental de vibrar de $T=0.640$ segundos en la dirección corta del edificio según los registros de vibración ambiental, el cual representa el 11.09% de aumento respecto al periodo de vibrar del edificio sin daños. El correspondiente al edificio dañado es elevado debido a la degradación del material, antigüedad y vicios constructivos que tiene la estructura. En un estudio previo (UAI-UAGro, 2010) se determinó que los muros de mampostería con block hueco sin mortero en los huecos de las piezas del block con refuerzo vertical llegan hasta el 50%, por ello los muros tienen una menor rigidez lateral e incrementa el periodo.

Por otro lado, al eliminar los salientes y entrantes del edificio No. 15 sin daños, el efecto de la torsión, que en el modelo original se presentaba en el primer modo, pasó al segundo modo de vibrar. Lo anterior indica la gran influencia de salientes o entrantes en el comportamiento de la estructura, lo cual debe considerarse para una estrategia de reforzamiento, rehabilitación o diseño de edificios.

Para simular la degradación de rigidez a partir del periodo fundamental de vibrar del inmueble No. 15 ($T=0.569$ segundos), en el sentido corto del edificio, se redujo el módulo elástico de la mampostería a un valor $E_m = 156,780 \text{ t/m}^2$ en todos los métodos. A pesar de alcanzar el mismo valor del periodo con los métodos clásicos, existe una enorme discrepancia con respecto al método de vibración ambiental y al modelo numérico.

Para la vivienda ensayada por el CENAPRED se aplicó el mismo procedimiento que para los edificios de INFONAVIT, excepto el de registro de vibración ambiental; los periodos evaluados con los distintos criterios son similares, a excepción del modelo numérico (Tabla 5), que en el sentido corto de la vivienda arrojó un periodo de $T=0.117$ segundos, 63.25% de diferencia con respecto a los otros métodos.

La variación en la evaluación del periodo fundamental puede generar situaciones de riesgo en el proceso de diseño. Por ejemplo, al considerar un espectro sísmico de suelo tipo IIIa para el Distrito Federal (Figura 12), donde para los periodos evaluados del edificio tipo de INFONAVIT sin daños en la dirección corta (Y) puede existir una variación importante en el cortante basal.

De acuerdo a la gráfica mencionada, si los edificios se diseñaran para la ciudad de México con un factor de comportamiento sísmico $Q=1$, se obtendrían los coeficientes sísmicos de 0.26 y 0.40 con los métodos clásicos y numérico, respectivamente, lo que implica 53.85% de diferencia. Esto implicaría que las fuerzas sísmicas de diseño evaluadas para cada método tuvieran una discrepancia considerable.

CONCLUSIONES

Se evaluaron los periodos fundamentales de vibrar de cuatro estructuras aplicando varios métodos. En los dos inmuebles tipo INFONAVIT estudiados, los métodos clásicos registran periodos similares entre sí; lo mismo sucede con los periodos de vibración ambiental y con el método numérico. Para estos últimos se tienen periodos altos y con efecto de torsión en el primer modo de vibración y una enorme variación respecto a los métodos clásicos. Con la idea de evaluar la influencia de entrantes y salientes se modificó el modelo arquitectónico original, del cual se logró que el efecto de torsión pasara a un segundo periodo de vibrar. Para la vivienda estudiada por el CENAPRED, los resultados de los métodos no presentaron mucha variación.

Considerando la tipología y altura de edificios, se concluye que en edificios altos y con plantas irregulares los métodos clásicos no son confiables; para estos edificios el MEF presenta una mayor aproximación. Viceversa, los métodos clásicos tienen una aproximación adecuada en edificios de baja altura y planta regular donde el MEF no proporciona valores adecuados.

La gran variación de resultados entre los distintos métodos para edificios se debe a las hipótesis básicas sobre las cuales se desarrollan. Los métodos clásicos son aplicables a marcos planos, en cuyos parámetros no se considera la modificación

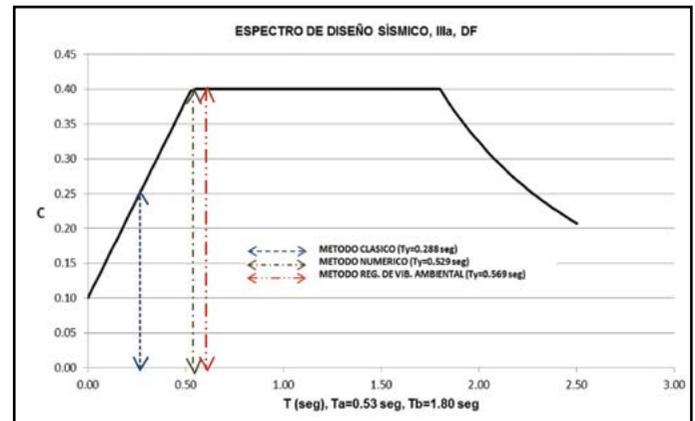


Figura 12. Espectro de diseño sísmico para suelo tipo IIIa, D. F.

de los desplazamientos y fuerzas debido al efecto de torsión; caso contrario para el MEF y vibración ambiental, que son métodos refinados para marcos tridimensionales y estructuras complejas. Por esta razón, los periodos de los métodos clásicos son bajos con respecto a los últimos mencionados.

Otra utilidad del periodo es que está relacionado con el nivel de daño existente, esto explica la diferencia entre valores de los edificios 5 y 15. Así, esta herramienta puede utilizarse para evaluar construcciones semejantes, por ejemplo en la unidad habitacional El Coloso, ubicada en Acapulco, Gro. (Zona sísmica D); los resultados pueden ayudar para tomar decisiones respecto al refuerzo de construcciones.

La elección de la forma para evaluar los periodos fundamentales debe considerar las características de la estructura y la dificultad para desarrollar el modelo. Mientras que en los modelos clásicos no se requiere mucho trabajo, el MEF requiere una gran cantidad de tiempo para elaborar el modelo por la dificultad de la malla en muros y losas, al considerar que deben coincidir los nodos de estos elementos.

Una opción intermedia es utilizar el modelo de columna ancha (Carrillo, 2009) en estructuras tridimensionales para reducir el trabajo de modelación y garantizar valores más aproximados de los periodos. Con esta propuesta se disminuye la incertidumbre de evaluar el coeficiente sísmico para obtener las fuerzas cortantes de diseño.

LITERATURA CITADA

- BARGHI, M. y AZADBAKHT, M. *Evaluating the Effect of Masonry Infills on Natural Period of Buildings with Moment-resisting Frame*. Tehran, Iran: Wiley Online Library, pp. 649-650, 2009.
- CARBAJAL, L. E. *Variación de las propiedades dinámicas de un edificio de concreto reforzado*. Tesis de Licenciatura. Guerrero, México: Universidad Autónoma de Guerrero. Unidad Académica de Ingeniería, pp. 6-8, 2005.
- CARRILLO, W. J. Estimación de los periodos naturales de vibración de viviendas de baja altura con muros de concreto. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 19(1). Universidad Militar Nueva Granada, pp. 41. Colombia, 2009.
- COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO. *Reporte interno de la evaluación estructural de edificios de la Unidad Habitacional de INFONAVIT en Chilpancingo, Gro.* Guerrero, México: Universidad Autónoma de Guerrero. Unidad Académica de Ingeniería, 2010.
- GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL (GDF). Normas técnicas complementarias para diseño por sismo. *Gaceta Oficial del Distrito Federal, Decimacuarta época*(Tomo II): 55-77, 2004.
- KWON, O. S. y SOO, K. E. *Evaluation of building period formulas for seismic design*. Rolla, Missouri, USA: Wiley Online Library, pp. 1569-1572, 2009.
- PÉRALTA, H. *Determinación de periodos de vibrar de edificios de la Unidad Habitacional de INFONAVIT en Chilpancingo, Gro.* Reporte interno de la Coordinación de Investigación y Estudios de Posgrado. Guerrero, México: Universidad Autónoma de Guerrero. Unidad Académica de Ingeniería, 2013.
- PÉREZ, J. J. *Guía de análisis de estructuras de mampostería*. México, D. F., México: Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A. C., pp. 20-35, 2012.
- RAMÍREZ, M. y GUERRERO, J. J. Cambio en los periodos naturales de vibración de una estructura de mampostería reforzada de 5 niveles. *XII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*. León, Guanajuato, México, 2000.
- SÁNCHEZ, T. et al. *Estudio experimental sobre una estructura de mampostería confinada tridimensional, construida a escala natural y sujeta a cargas laterales*. México: Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED), pp. 914-915, 1996.
- SAP2000 NO-LINEAL VERSIÓN 15.0. Para diseño y análisis estructural.