

EVALUACIÓN DE RESPUESTAS Y ÁNGULOS DE INCIDENCIA CRÍTICOS OBTENIDOS POR MÉTODOS ESPECTRALES

ANGELO MARINILLI, OSCAR A. LÓPEZ

Universidad Central de Venezuela.
Facultad de Ingeniería. Instituto de Materiales y Modelos Estructurales IMME.
e-mail: {angelo.marinilli; oscar.lopez}@ucv.ve

Recibido: enero de 2010

Recibido en forma final revisado: septiembre de 2010

RESUMEN

Las respuestas y los ángulos de incidencia críticos para una estructura pueden ser obtenidos mediante la integración en el tiempo (RHA) o mediante análisis espectral (RSA). Los resultados del RHA pueden ser considerados como la mejor aproximación disponible, pero son obtenidos con un esfuerzo numérico bastante mayor. Los resultados del RSA son obtenidos más fácilmente, pero tienen las limitaciones asociadas al método de análisis espectral. El objetivo de este trabajo es comparar los ángulos de incidencia críticos y las respuestas críticas obtenidos mediante RHA y RSA. Se obtuvieron las respuestas de diversas estructuras de concreto reforzado de un piso, comportamiento lineal, amortiguamiento viscoelástico y períodos naturales que varían entre 0,1 y 5,0 segundos. Se consideraron los siguientes casos: (a) la acción de una única componente sísmica horizontal (la principal mayor) y (b) dos componentes sísmicas horizontales ortogonales entre sí (las principales mayor y menor), usando registros sísmicos de campo lejano tomados en roca. Los resultados de RHA fueron obtenidos cubriendo todos los posibles ángulos de incidencia para cada registro sísmico. Los resultados de RSA fueron obtenidos con la fórmula del ángulo crítico propuesto por la regla CQC3, usando los espectros medios de los sismos seleccionados. Los resultados obtenidos indican que el RSA es adecuado para estimar las respuestas críticas y los ángulos de incidencia críticos para fines de diseño estructural o evaluación de estructuras existentes. Valores más refinados de las respuestas críticas pueden ser obtenidos utilizando el RHA, usando un rango reducido de ángulos de incidencia definidos a partir del RSA.

Palabras clave: Ángulo de incidencia crítico, Respuesta crítica, Integración en el tiempo (RHA), Análisis espectral (RSA), CQC3.

EVALUATION OF CRITICAL RESPONSES AND CRITICAL INCIDENCE ANGLES OBTAINED WITH SPECTRAL METHODS

ABSTRACT

Critical responses and critical angles for a structure can be obtained by response history analysis (RHA) or by response spectrum analysis (RSA). Results obtained with RHA can be considered as the best approximation available to actual responses, but they require a great amount of numerical effort. Results obtained with RSA are more easily obtained, but they have the limitations associated with spectrum analysis. The goal of this investigation is to compare the critical incidence angles and the critical responses obtained with response history analysis (RHA) and response spectrum analysis (RSA). The responses are obtained for several one story reinforced concrete structures with linear behavior, viscous damping, and natural periods ranging between 0.1 and 5.0 sec. The analyses are performed for the following two cases: (a) the action of only one horizontal component (the major component), and (b) two horizontal orthogonal components (the major and the minor components). An ensemble of far field ground motions recorded on rock was selected to perform the analyses. The RHA results are obtained covering all possible incidence angles for each ground motion. The RSA results are obtained with the critical incidence angle formula given by the CQC3 combination rule, using the mean spectra for the ensemble of the recorded ground motions. The results show that RSA is adequate to estimate the critical responses and corresponding critical incidence angles for design purposes or evaluation of existing structures. More refined values of the critical responses could be obtained using RHA in a reduced incidence angle range, given by RSA results, thus reducing the numerical computations required.

Keywords: Critical incidence angle, Critical response, Response history analysis (RHA), Response spectrum analysis (RSA), CQC3.

INTRODUCCIÓN

El movimiento del terreno durante un terremoto puede ser representado en el plano horizontal con dos componentes ortogonales de aceleración de diferentes intensidades, las cuales pueden excitar una estructura con cualquier ángulo de incidencia. Esta situación es tomada en cuenta en forma aproximada por diversas normas para edificaciones sismo-resistentes considerando dos componentes sísmicas ortogonales de igual intensidad, usualmente definidas por espectros de respuesta, y orientadas según los ejes principales en planta de las estructuras. La Norma Venezolana Covenin 1756 (2001), por ejemplo, permite obtener las solicitaciones sísmicas mediante la “raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS)” o la “regla del 30%”; mientras que sólo opcionalmente puede emplearse la “combinación cuadrática completa con tres componentes sísmicas (CQC3)”. Sin embargo, cuando se considera que las dos componentes sísmicas tienen intensidades diferentes, los dos primeros criterios no garantizan que las estructuras sean diseñadas para las condiciones críticas que se pueden producir debido a la variabilidad del ángulo de incidencia del movimiento sísmico.

Las “respuestas críticas” son definidas como las respuestas estructurales máximas y mínimas considerando cualquier ángulo de incidencia. Los “ángulos críticos” son los ángulos de incidencia de los sismos que generan las respuestas críticas. Existen procedimientos para obtener los ángulos críticos y las respuestas críticas por medio de análisis espectral (RSA), propuestos independientemente por Smeby & Der Kiureghian (1985) y López & Torres (1997) basados en enfoques diferentes; siendo usualmente conocidos en la literatura técnica como CQC3, por considerar tres componentes sísmicas (dos horizontales y la vertical). Posteriormente, el método fue extendido a tres componentes sísmicas incidiendo en direcciones arbitrarias (Hernández & López, 2002). Por otra parte, es conocido que la respuesta estructural puede ser obtenida con mayor exactitud mediante la integración de la respuesta en el tiempo (RHA); sin embargo, para su aplicación práctica se requiere de la utilización de varios registros sísmicos y gran cantidad de trabajo numérico. En la literatura pueden encontrarse diversos ejemplos de aplicación de estos métodos. Véase por ejemplo MacRae & Mattheis (2000); Lobo & Fernández-Dávila (2000); y Fernández-Dávila *et al.* (2000).

La comparación entre los resultados obtenidos, mediante los métodos RSA y RHA, es importante debido a las ventajas de los procedimientos basados en métodos espectrales, esencialmente su rápida aplicación y consecuente conveniencia para fines de diseño; sin embargo, poca información puede ser encontrada al respecto. Así, por ejemplo, Biggs *et*

al. (1977) compararon los resultados obtenidos con RHA empleando varios registros de aceleración, con aquellos obtenidos con RSA empleando el espectro medio de los registros de aceleración, para pórticos de concreto en dos dimensiones (2D). Más recientemente, Chopra & Chintanapakdee (2001) compararon los resultados obtenidos con RHA y RSA para una viga de corte en 2D considerando registros de aceleración de campo cercano y de campo lejano. En todos los casos los autores concluyeron que el RSA es adecuado para uso práctico de diseño; sin embargo, ambos estudios fueron efectuados considerando una única componente sísmica horizontal incidiendo según el eje principal de la estructura. Los autores no están en conocimiento de comparaciones de resultados obtenidos con RSA y RHA para el caso de una o dos componentes sísmicas incidiendo según cualquier ángulo respecto a las direcciones principales en planta de la estructura.

El objeto de esta investigación es comparar los ángulos de incidencia críticos y las respuestas críticas obtenidas mediante integración de la respuesta en el tiempo (RHA) y mediante análisis espectral (RSA), para una y para dos componentes sísmicas con direcciones arbitrarias. Resultados preliminares han sido publicados en Marinilli & López (2003); Marinilli *et al.* (2006); y Marinilli & López (2008).

ESTRUCTURAS SELECCIONADAS

Se seleccionó un total de treinta estructuras de concreto reforzado de un piso de 2,4m de altura, cuya planta tipo puede ser observada en la figura 1. Las columnas tienen secciones transversales de 0,3m x 0,3m y las vigas de 0,3m x 0,5m. Las losas de techo se consideraron como diafragmas rígidos y en ellas se concentraron la totalidad de la masa de cada estructura. Los períodos naturales variaron entre 0,1s y 5,0s, como puede observarse en la tabla 1, y se supuso un comportamiento elástico lineal con amortiguamiento viscoso equivalente al 5% del amortiguamiento crítico.

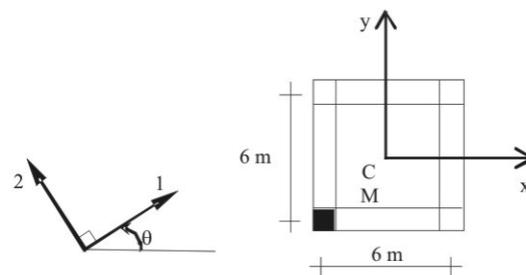


Figura 1. Planta tipo de las estructuras seleccionadas, ejes principales de la estructura (x, y), componentes principales del movimiento sísmico (1, 2) y ángulo de incidencia (θ).

Tabla 1. Períodos naturales Tx y Ty de las estructuras seleccionadas.

Estructura	Tx (s)	Ty (s)
1	0,1	0,5
2	0,2	
3	0,3	
4	0,4	
5	0,5	
6	1,0	
7	2,0	
8	3,0	
9	4,0	
10	5,0	
11	0,1	1,0
12	0,2	
13	0,3	
14	0,4	
15	0,5	
16	1,0	
17	2,0	
18	3,0	
19	4,0	
20	5,0	
21	0,1	3,0
22	0,2	
23	0,3	
24	0,4	
25	0,5	
26	1,0	
27	2,0	
28	3,0	
29	4,0	
30	5,0	

MOVIMIENTOS SÍSMICOS

Para realizar los análisis se seleccionó un grupo de diez movimientos sísmicos registrados en roca en campo lejano, cuya identificación puede ser observada en la tabla 2. Cada movimiento sísmico está constituido por sus dos componentes horizontales de aceleración. Cada par de registros de aceleración fue rotado a sus direcciones principales mayor y menor (direcciones 1 y 2 en la figura 1), las cuales no están correlacionadas entre sí y definen las direcciones de máxima y mínima intensidad, respectivamente (López *et al.* 2006). La componente principal mayor de cada sismo fue escalada a una aceleración máxima del 30% de la aceleración de la gravedad (0,30g) y la componente principal

menor fue escalada empleando el mismo factor usado para la componente principal mayor, esto para mantener la relación original de intensidades entre ambas componentes sísmicas. Las figuras 2 y 3 contienen, respectivamente, los seudoespectros de aceleración de las componentes principales mayores y menores de los sismos seleccionados así como los correspondientes seudoespectros medios de aceleración.

Tabla 2. Movimientos sísmicos seleccionados.

Sismo	Estación	Fecha (d/m/a)
Kern County	Taft	21/07/1952
San Fernando	Lake Hughes St. No. 4	09/02/1971
San Fernando	Lake Hughes St. No. 12	09/02/1971
Miyagi-Oki	Ofunato Bochi	12/06/1978
Michoacán	Caletas de Campos	19/09/1985
Loma Prieta	Santa Cruz	18/10/1989
Northridge	Mt. Wilson	17/01/1994
Northridge	Lake Hughes St. No. 9	17/01/1994
Chi-Chi	TCU046	21/09/1999
Chile	Valparaíso	03/03/1985

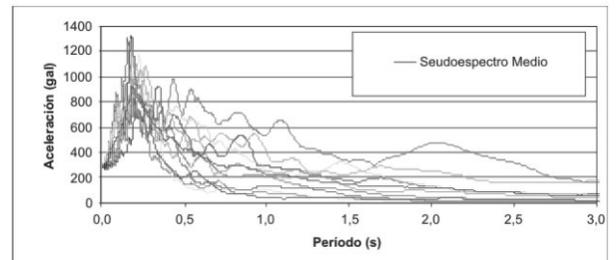


Figura 2. Seudoespectros de aceleración para las componentes principales mayores y seudoespectro medio (amortiguamiento del 5%).

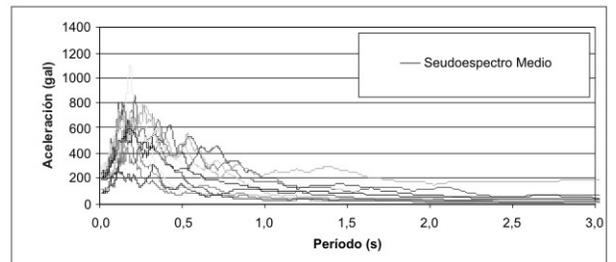


Figura 3. Seudoespectros de aceleración para las componentes principales menores y seudoespectro medio (amortiguamiento del 5%).

ANÁLISIS

La obtención de la respuesta en el tiempo (RHA) y el análisis spectral (RSA) fueron realizados para cada estructu-

ra considerando dos casos independientes de análisis: (a) la acción de una única componente sísmica horizontal (la componente principal mayor) y (b) la acción simultánea de dos componentes sísmicas horizontales ortogonales entre sí (las componentes principales mayor y menor) para cada uno de los sismos considerados.

Análisis basado en la historia de la respuesta (RHA)

Las respuestas críticas y los correspondientes ángulos de incidencia críticos fueron obtenidos mediante integración en el tiempo de las respuestas estructurales. Los resultados correspondientes a cada estructura fueron obtenidos variando sistemáticamente el ángulo de incidencia (θ) para cada registro sísmico; esto en el intervalo comprendido entre 0° y 180° con incrementos de $\Delta\theta=5^\circ$. Los análisis fueron realizados con un programa computacional desarrollado por los autores.

Análisis espectral (RSA)

Dos ángulos de incidencia críticos fueron obtenidos con la ecuación (1), empleando los seudoespectros medios para los registros sísmicos seleccionados.

$$\theta_{cr} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left\{ \frac{2(R_{2xy} - R_{1xy})}{(R_{1y}^2 - R_{1x}^2) - (R_{2y}^2 - R_{2x}^2)} \right\} \quad (1)$$

Dos respuestas críticas son obtenidas con la ecuación (2), empleando como ángulos de incidencia los dos ángulos de incidencia críticos obtenidos previamente ($\theta=\theta_{cr}$). En este trabajo se define como respuesta crítica la mayor de las dos respuestas dadas por la ecuación (2). Las ecuaciones (1) y (2) fueron desarrolladas por López & Torres (1997). Para el caso particular que las componentes sísmicas horizontales tengan espectros proporcionales, las ecuaciones (1) y (2) dan lugar a la regla de la combinación cuadrática completa conocida como CQC3 (Smeby & Der Kiureghian 1985; Menun & Der Kiureghian 1998; y López *et al.* 2000).

$$R(\theta) = \left[(R_{1x}^2 + R_{2y}^2)\cos^2\theta + (R_{1y}^2 + R_{2x}^2)\sin^2\theta + 2\sin\theta\cos\theta(R_{1xy} - R_{2xy}) \right]^{1/2} \quad (2)$$

en donde:

$$R_{mn} = \left\{ \sum_i \sum_j \rho_{ij} R_{mni} R_{mnj} \right\}^{1/2} \quad m = 1, 2; n = x, y \quad (3)$$

$$R_{mxy} = \left\{ \sum_i \sum_j \rho_{ij} R_{mxi} R_{myj} \right\}^{1/2} \quad (4)$$

$$\rho_{ij} = \frac{8\xi^2(1+\beta_{ij})\beta_{ij}^{3/2}}{(1-\beta_{ij}^2)^2 + 4\xi^2\beta_{ij}(1+\beta_{ij})^2} \quad (5)$$

La ecuación (3) es la conocida regla de combinación modal cuadrática completa (CQC); la ecuación (4) determina la correlación entre las respuestas modales en direcciones ortogonales entre sí para una componente sísmica determinada; y la ecuación (5) determina el coeficiente de correlación entre las respuestas modales (i, j) de la estructura (véase por ejemplo Chopra, 2001).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La respuesta estructural considerada en esta investigación fue el valor absoluto de la fuerza axial máxima inducida por la acción sísmica en la columna que se muestra sombreada en la figura 1. Las respuestas obtenidas con RHA que se reportan para cada ángulo de incidencia, corresponden al promedio de las fuerzas axiales máximas obtenidas para todos los sismos. Los resultados obtenidos mediante RHA se consideran como las “respuestas exactas” puesto que ellos representan la mejor aproximación disponible a las “respuestas reales”. Las respuestas obtenidas con RSA para cada ángulo de incidencia corresponden a las fuerzas axiales generadas con el seudoespectro medio de los sismos considerados mostrados en las figuras 2 y 3. A modo de ejemplo de los resultados obtenidos en esta investigación, la figura 4 muestra las fuerzas axiales obtenidas con RHA y RSA para las estructuras 16 y 21 bajo la acción simultánea de dos componentes sísmicas con ángulos de incidencia entre 0° y 180° .

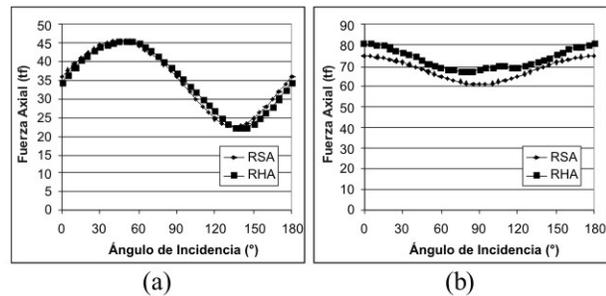


Figura 4. Fuerzas axiales obtenidas con RHA y RSA para cada ángulo de incidencia entre 0° y 180° . (a) Estructura 16 y (b) Estructura 21.

Resultados para una componente sísmica

El RHA se realizó para cada estructura empleando la componente principal mayor de cada movimiento sísmico, de acuerdo con el procedimiento previamente descrito. El RSA se realizó empleando para los análisis el pseudoespectro medio de las componentes principales mayores de los sismos considerados (figura 2).

Respuestas críticas

Las figuras 5, 6 y 7 muestran las respuestas críticas obtenidas para las estructuras analizadas, agrupadas por conveniencia según sus períodos T_y , observándose en todos los casos buena correspondencia entre los resultados obtenidos con RSA y RHA. Por su parte la figura 8 muestra la razón de las respuestas obtenidas con RSA y RHA para todas las estructuras analizadas. Los errores relativos observados en el RSA son en algunos casos por subestimación y en otros por sobreestimación del RHA, pero en ningún caso superan el 10%. Los errores obtenidos en esta investigación para la acción de una componente sísmica son similares a los reportados por Chopra & Chintanapakdee (2001), considerando según los autores la contribución de suficientes modos de vibración en la respuesta, y a los resultados reportados por Biggs *et al.* (1977), a pesar de que los autores emplearon sismos registrados en diversas condiciones de terreno de fundación y cercanía a la falla aunque normalizados a la misma aceleración máxima.

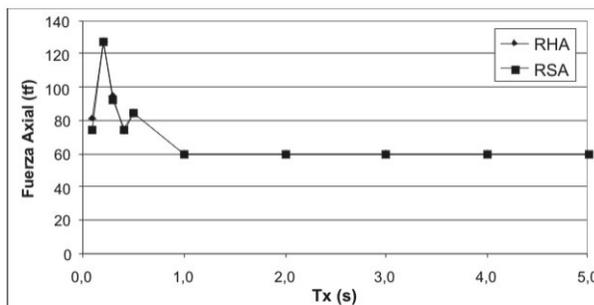


Figura 5. Respuestas críticas obtenidas con RSA y RHA bajo la acción de una componente sísmica para estructuras con $T_y=0,5s$.

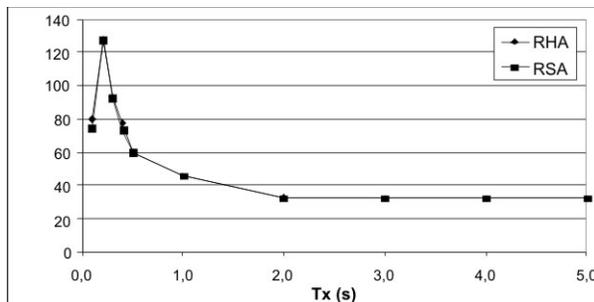


Figura 6. Respuestas críticas obtenidas con RSA y RHA bajo la acción de una componente sísmica para estructuras con $T_y=1,0s$.

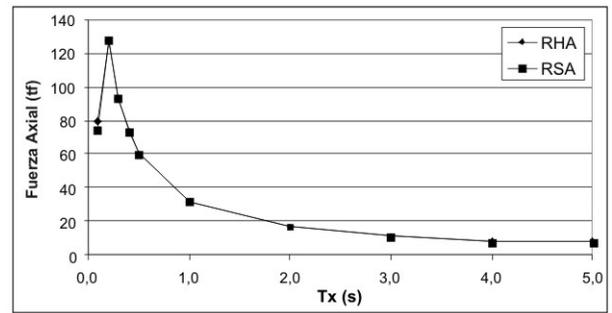


Figura 7. Respuestas críticas obtenidas con RSA y RHA bajo la acción de una componente sísmica para estructuras con $T_y=3,0s$.

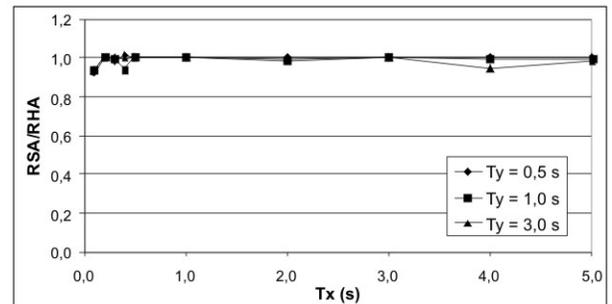


Figura 8. Cociente entre las respuestas críticas obtenidas con RSA y RHA bajo la acción de una componente sísmica.

Ángulos de incidencia críticos

Las figuras 9, 10 y 11 contienen los ángulos de incidencia críticos obtenidos para las estructuras analizadas y agrupadas por conveniencia según sus períodos T_y . En todos los casos se observa buena correspondencia entre los resultados obtenidos con RSA y RHA. Por su parte la figura 12 presenta una medida del error en los ángulos críticos obtenidos con RSA para todas las estructuras analizadas. Dichos errores fueron calculados como las diferencias en valor absoluto de los ángulos críticos obtenidos con RSA y RHA y no superan en la mayor parte de los casos 10° ; sin embargo, para estructuras de períodos muy cortos o muy largos los errores pueden alcanzar puntualmente valores de hasta 30° .

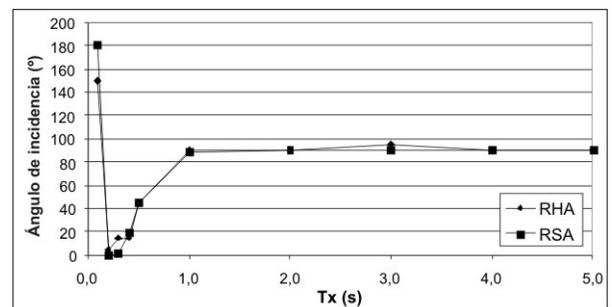


Figura 9. Ángulos de incidencia críticos obtenidos con RSA y RHA bajo la acción de una componente sísmica para estructuras con $T_y=0,5s$.

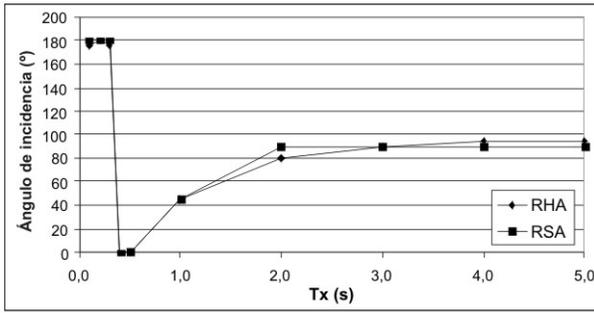


Figura 10. Ángulos de incidencia críticos obtenidos con RSA y RHA bajo la acción de una componente sísmica para estructuras con $T_y=1,0s$.

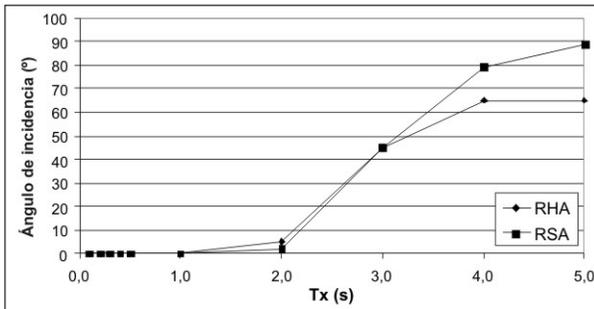


Figura 11. Ángulos de incidencia críticos obtenidos con RSA y RHA bajo la acción de una componente sísmica para estructuras con $T_y=3,0s$.

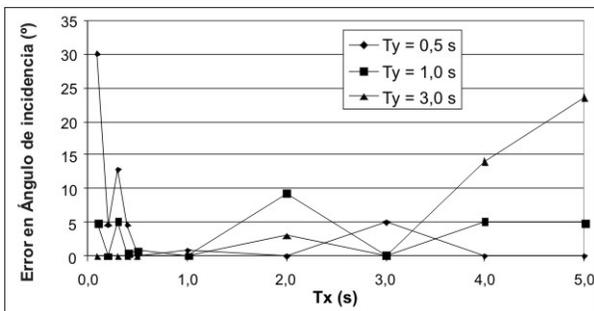


Figura 12. Diferencia entre los ángulos de incidencia críticos obtenidos con RSA y RHA bajo la acción de una componente sísmica.

Resultados para dos componentes sísmicas

La respuesta RHA fue determinada calculando la máxima fuerza axial ante la acción simultánea de las componentes principales mayor y menor de los sismos seleccionados, de acuerdo con el procedimiento descrito previamente. La respuesta RSA fue obtenida según el procedimiento descrito anteriormente usando los espectros medios de las componentes principales mayor y menor (figuras 2 y 3).

Respuestas críticas

Las figuras 13, 14 y 15 contienen las respuestas críticas obtenidas para las estructuras analizadas, observándose en todos los casos que los resultados obtenidos con RSA

muestran buen ajuste con aquellos obtenidos con RHA.

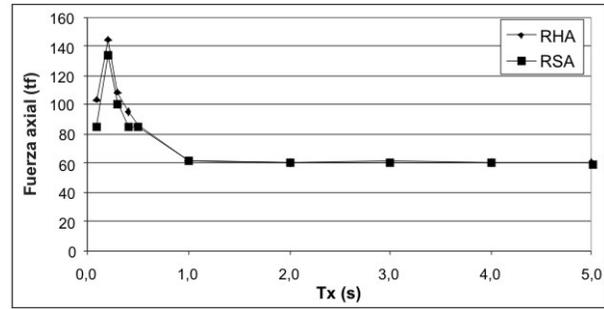


Figura 13. Respuestas críticas obtenidas con RSA y RHA bajo la acción de dos componentes sísmicas para estructuras con $T_y=0,5s$.

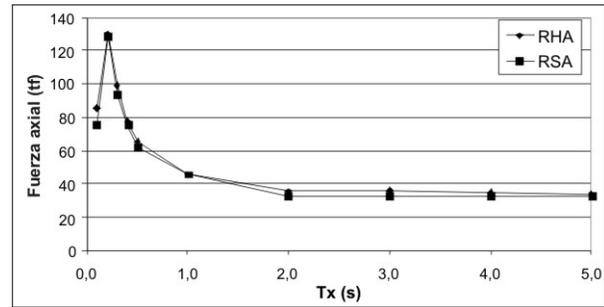


Figura 14. Respuestas críticas obtenidas con RSA y RHA bajo la acción de dos componentes sísmicas para estructuras con $T_y=1,0s$.

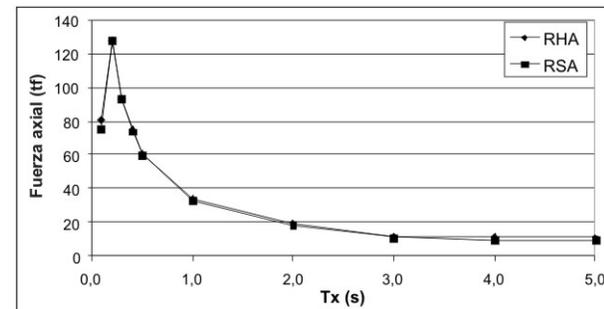


Figura 15. Respuestas críticas obtenidas con RSA y RHA bajo la acción de dos componentes sísmicas para estructuras con $T_y=3,0s$.

La figura 16 contiene la razón de las respuestas obtenidas con RSA y RHA para todas las estructuras analizadas. Los errores observados en RSA son en la mayor parte de los casos por subestimación y en algunos pocos por sobreestimación. Dichos errores no superan en términos generales el 10%; sin embargo, para estructuras de períodos muy cortos o muy largos estos pueden alcanzar puntualmente el 18%. Estos errores son similares a los reportados por Chopra & Chintanapakdee (2001) y son mayores a los reportados por Biggs *et al.* (1977); sin embargo, debe hacerse notar que en estos trabajos sólo se analizaron estructuras planas bajo la acción de una única componente sísmica horizontal. Es previsible que la incorporación de la otra componente sísmica horizontal ocasione un aumento en el error del RSA,

dato que se incorpora una nueva fuente de aproximación al combinar las respuestas debidas a la acción simultánea de ambas componentes horizontales.

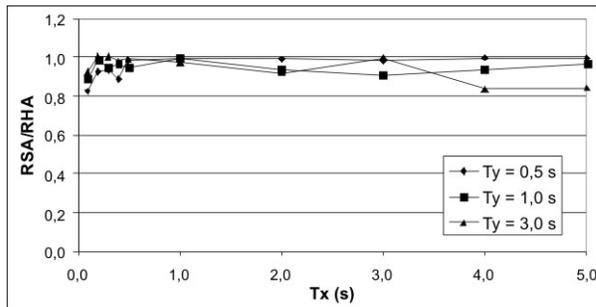


Figura 16. Cociente entre las respuestas críticas obtenidas con RSA y RHA bajo la acción de dos componentes sísmicas.

Ángulos de incidencia críticos

Las figuras 17, 18 y 19 permiten observar los ángulos de incidencia críticos obtenidos para las estructuras analizadas. La figura 20 muestra el error observado en los ángulos críticos obtenidos con RSA para todas las estructuras analizadas. Estos errores no superan en la mayor parte de los casos los 20°; sin embargo, para estructuras de períodos pequeños pueden superar los 30° y alcanzar puntualmente errores de hasta 48°.

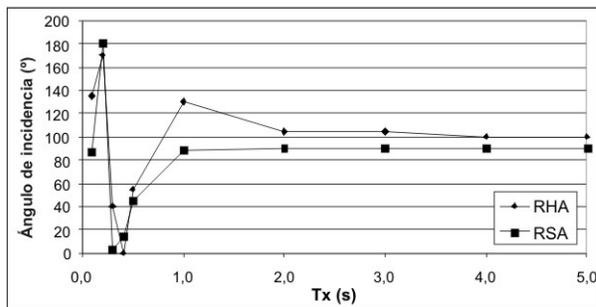


Figura 17. Ángulos de incidencia críticos obtenidos con RSA y RHA bajo la acción de dos componentes sísmicas para estructuras con $T_y=0,5s$.

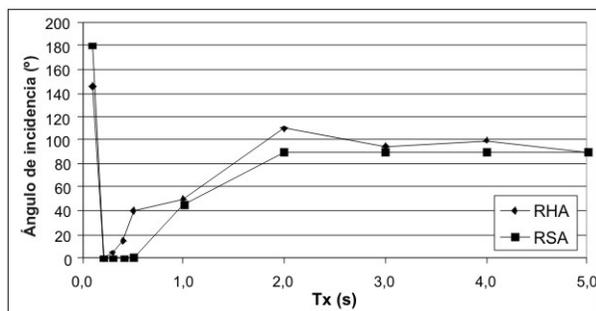


Figura 18. Ángulos de incidencia críticos obtenidos con RSA y RHA bajo la acción de dos componentes sísmicas para estructuras con $T_y=1,0s$.

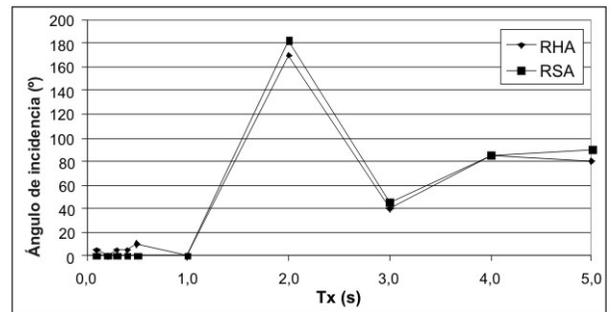


Figura 19. Ángulos de incidencia críticos obtenidos con RSA y RHA bajo la acción de dos componentes sísmicas para estructuras con $T_y=3,0s$.

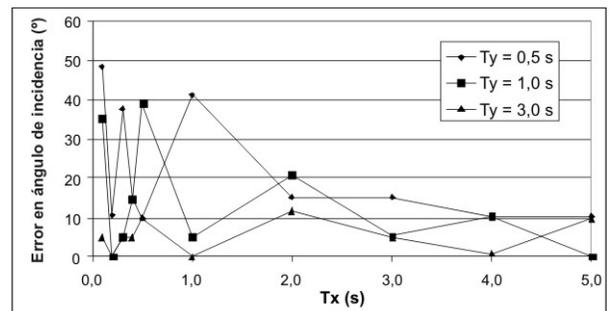


Figura 20. Diferencia entre los ángulos de incidencia críticos obtenidos con RSA y RHA bajo la acción de dos componentes sísmicas.

CONCLUSIONES

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de la presente investigación.

El método de análisis espectral (RSA) para el caso de determinar la respuesta crítica ante una componente de un movimiento sísmico que puede incidir según cualquier dirección horizontal, conduce a valores con errores promedio no mayores que el 10% de los valores más confiables dados por el método de integración de la respuesta en el tiempo (RHA) para una familia de diez acelerogramas.

Al considerar la acción simultánea de dos componentes sísmicas horizontales que puedan incidir con cualquier ángulo con respecto a los ejes principales de la estructura, el método RSA conduce a estimaciones de la respuesta crítica que no exceden del 18% de la respuesta crítica promedio dado por el método RHA para la familia de diez pares de componentes sísmicas.

El método RSA también se utilizó para determinar el ángulo crítico de incidencia de las componentes sísmicas asociado a la respuesta crítica. Los valores obtenidos mediante el método RSA en la gran mayoría de los casos difieren menos de 10° de los valores más confiables obtenidos con

el método RHA, aún cuando en algunos casos puntuales se observaron diferencias hasta de 48°.

Para fines de diseño ingenieril, se puede concluir que los resultados obtenidos muestran que el método basado en el análisis espectral (RSA) es adecuado para estimar las respuestas críticas máximas, así como los correspondientes ángulos de incidencia críticos.

Pueden obtenerse resultados más refinados de las respuestas críticas por medio de la integración de la respuesta en el tiempo (RHA) en un rango reducido de ángulos de incidencia, basado este último en los resultados obtenidos del método RSA, reduciendo de esta manera el esfuerzo computacional necesario.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela (CDCH/UCV) por el financiamiento otorgado mediante el Proyecto PG 08.31.4690.2000. Los autores también desean agradecer a la Ing. María Heydi Carrasquel por su colaboración durante la ejecución de las evaluaciones numéricas.

REFERENCIAS

- BIGGS, J.M., HANSEN, R.J., HOLLEY, M.J. (1977). On methods of structural analysis and design for earthquakes. *Structural and geotechnical mechanics*, W.J. Hall, ed., Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 91-101.
- CHOPRA, A.K. (2001). *Dynamics of structures. Theory and applications to earthquake engineering*. Prentice Hall, New Jersey.
- CHOPRA, A.K., CHINTANAPAKDEE, C. (2001). Drift Spectrum vs. Modal Analysis of Structural Response to Near-Fault Ground Motions. *Earthquake Spectra*, 17(2), 221-234.
- COVENIN 1756 (2001). Norma COVENIN 1756-2001. Edificaciones Sismorresistentes. Fondonorma, Caracas.
- FERNÁNDEZ-DÁVILA, I., COMINETTI, S., CRUZ, E.F. (2000). Considering the bi-directional effects and the seismic angle variations in building design. 12th World Conference on Earthquake Engineering, E.Q.C., Auckland, paper 0435.
- HERNÁNDEZ, J.J., LÓPEZ, O.A. (2002). Response to three-component motion of arbitrary direction. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, John Willey & Sons, Vol. 31, No 1, 55-78.
- LOBO, D.A., FERNÁNDEZ-DÁVILA, I. (2000). Respuestas originadas en edificios de un piso solicitados por excitaciones sísmicas bidireccionales con ángulos de incidencia variables. 2° Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, A.E.I.S., Madrid.
- LÓPEZ, O.A., CHOPRA, A.K., HERNÁNDEZ, J.J. (2000). Critical response of structures to multicomponent earthquake excitation. *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, John Willey & Sons, Vol. 29, No 12, 1759-1778.
- LÓPEZ, O.A., HERNÁNDEZ, J.J., BONILLA, R., FERNÁNDEZ, A. (2006). Response spectra for multicomponent structural analysis. *Earthquake Spectra*, EERI, Vol. 22, No 1, 85-114.
- LÓPEZ, O.A., TORRES, R. (1997). The critical angle of seismic incidence and the maximum structural response. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 881-894.
- MACRAE, G.A., MATTHEIS, J. (2000). Three-dimensional steel building response to near-fault motions. *Journal of Structural Engineering*, 126(1), 117-126.
- MARINILLI A., LÓPEZ O.A. (2008). Evaluation of critical responses and critical incidence angles obtained with RSA and RHA. *Proceedings of the 14WCEE*, Beijing.
- MARINILLI, A., LÓPEZ, O.A. (2003). Evaluación del método de análisis espectral para determinar las respuestas críticas de estructuras sujetas a acelerogramas. VII Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica – VII COVESIS, Barquisimeto.
- MARINILLI, A., LÓPEZ, O.A., CARRASQUEL, H. (2006). Evaluación de la respuesta y el ángulo de incidencia críticos de estructuras mediante el uso de espectros y acelerogramas. VIII Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica - VIII Convesis, Valencia.
- MENUN, C., DER KIUREGHIAN, A.D. (1998). A replacement of the 30%, 40% and the srss rules for multicomponent seismic analysis. *Earthquake Spectra*, 14(1): 153-163.
- SMEBY, W., DER KIUREGHIAN, A. (1985). Modal combination rules for multicomponent earthquake excitation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 13, 1-12.