

PROPOSICION DE METODO DE ANALISIS SISMICO DE EDIFICIOS Y DE ESPECTRO REPRESENTATIVO DE LAS TRES COMPONENTES DE LA SOLICITACION

Paulina González S.¹ Tomás Guendelman B.² José Allende G.³ Job Martínez R.¹
Katherine Gentina I.³ y Abraham Martínez H.¹

- 1 Universidad de Santiago de Chile
Santiago. CHILE
paulina.gonzalez@usach.cl
- 2 IEC Ingeniería S.A.
Santiago. CHILE
tguendelman@iec.cl
- 3 René Lagos y Asociados
Santiago. CHILE
jallende@lagos-ing.com

RESUMEN

Se presenta un método espectral que incorpora los efectos direccionales del terremoto en el análisis sísmico de edificios. Además, se propone una metodología para determinar un espectro representativo de las 3 componentes traslacionales del registro de aceleraciones de terremoto. Para estudiar la precisión del método, se efectúa un análisis comparativo de resultados obtenidos en 28 modelos genéricos lineales elásticos de edificios y un modelo de un edificio real. Como referencia de comparación se emplea la respuesta dinámica máxima de los modelos de edificios obtenida por integración en el tiempo, considerando las 3 componentes de la sollicitación. Los errores promedio de los esfuerzos calculados mediante la aplicación del método resultan inferiores a 33%. El método propuesto presenta la ventaja de que permite obtener la respuesta estructural máxima de cada edificio con la realización de sólo un análisis sísmico, de tal forma que se hace innecesaria la definición de direcciones arbitrarias para realizar dicho análisis y, por lo tanto, evita la combinación convencional de los resultados obtenidos en esas direcciones.

SUMMARY

A numerical method that takes into account the effects of earthquake direction on seismic analysis is presented. A methodology to determine a representative three components of the acceleration record response spectra is also presented. A comparative study on 28 buildings with elastic linear behaviour as well as a model of actual building was performed. Maximum time history response of buildings was used as a comparative reference. Actual three-directional earthquake records were considered in the dynamic analysis of buildings. The methodologic mean errors are lower than 33%. The most important advantage of the method is that it avoids the use of arbitrary direction in the seismic analysis as well as the need to compute the combination of orthogonal seismic response to obtain design stresses. Additionally it is possible to reduce the processing time as maximum design stresses and strains can be obtained in a single seismic analysis for each building.

INTRODUCCION

En atención a la naturaleza tridimensional de los edificios, el análisis sísmico de dichas estructuras debe considerar, ya sea en forma implícita o explícita, que la sollicitación sísmica real tiene tres componentes traslacionales, y que puede incidir en cualquier dirección.

En la literatura sobre el tema se ha abordado el problema considerando que la sollicitación sísmica tiene múltiples componentes, siendo la situación más general aquella que contempla 3 componentes traslacionales y 3 componentes de giro. En esos estudios se ha encontrado que la dirección de incidencia de la sollicitación sísmica es un parámetro que afecta en forma significativa la respuesta sísmica de edificios que presentan acoplamiento traslacional y torsional, Cheng y Ger (1990).

En esos trabajos, así como en los de López et al (2001, 2002) y Wilson (2002), se han propuesto y empleado diversas metodologías para incorporar los efectos direccionales del terremoto en la determinación de la respuesta estructural máxima, concluyéndose que para cada grado de libertad y para cada esfuerzo sísmico existe una dirección crítica de incidencia de la sollicitación que genera el valor máximo. En general, esas direcciones son distintas entre sí. Algunos de esos métodos, que incluyen también procedimientos para determinar todas las direcciones críticas señaladas, conllevan mayores requerimientos computacionales que aquellos que se emplean en la práctica del cálculo sísmico de edificios.

Por otra parte, la mayoría de los códigos de diseño sísmico (IAEE, 2000) prescriben que el análisis debe realizarse considerando que la sollicitación unidireccional incide según dos direcciones ortogonales en forma independiente, y que los esfuerzos de diseño deben determinarse combinando los resultados obtenidos en esos dos análisis. Sin embargo, uno de los criterios recomendados para efectuar la combinación puede resultar insuficiente en algunas estructuras, Guendelman et al. (1991). Además, esos códigos no recomiendan ningún criterio o método para definir las direcciones de análisis, con excepción del código de diseño sísmico de Estados Unidos que prescribe que las estructuras deben ser diseñadas para resistir fuerzas que pueden provenir desde cualquier dirección horizontal. Por su parte, la Norma Chilena de diseño sísmico de edificios, NCh 433.Of96 (1996), no contempla ningún tipo de combinación. En lo que respecta a las vibraciones verticales, esta última Norma contiene disposiciones especiales para elementos estructurales susceptibles de presentar este tipo de sollicitación.

El método de los máximos modales direccionales (MD), propuesto previamente por González (1992), permite incorporar los efectos direccionales de las componentes horizontales del terremoto en el análisis sísmico de edificios. Dicho método consiste en determinar el máximo aporte de cada modo de vibrar a la respuesta dinámica del edificio, considerando además de la variable temporal, la dirección de incidencia de la sollicitación sísmica horizontal considerada como un vector unidireccional. Luego, esos valores máximos obtenidos son combinados aplicando el criterio de superposición modal de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS), que es el criterio más adecuado para la aplicación del método, González (1997).

En este trabajo se presenta la generalización del método de los máximos modales direccionales de tal forma que su aplicación permite incorporar los efectos direccionales de las 3 componentes traslacionales del terremoto. En el método se considera que la sollicitación es un vector unidireccional con dirección arbitraria en el espacio. Se realiza un estudio de la validez del método de los máximos modales direccionales generalizado (MDG) a través de un análisis comparativo de los resultados que entrega este método y el método de integración paso a paso en el tiempo considerando, en este último caso, las 3 componentes traslacionales de la sollicitación. Se analizan 28 modelos genéricos de edificios de comportamiento lineal elástico y un modelo lineal de un edificio real; este último tiene características estructurales que lo hacen susceptible de presentar vibraciones verticales. Se utilizan las 3 componentes de cada uno de 4 registros de aceleraciones del terremoto chileno del 3 de marzo de 1985, Melipilla, Valparaíso (UTFSM), Viña del Mar y Zapallar para efectuar el análisis en el tiempo. En la aplicación del método MDG se requiere utilizar solamente un espectro de respuesta, por lo tanto se presenta una metodología para determinar un espectro representativo de las 3 componentes de la sollicitación sísmica.

En primer lugar, se describen los modelos estructurales de los edificios utilizados en el estudio. Luego, se presenta la formulación del método de los máximos modales direccionales generalizado y la correspondiente fundamentación teórica. Finalmente, se realiza el análisis comparativo señalado en el párrafo precedente y se presentan las conclusiones del trabajo.

EDIFICIOS ANALIZADOS

Modelos genéricos: Con el empleo de la técnica de modelos continuos es posible definir las características dinámicas y estructurales de un modelo discreto que representa a la estructura continua; de esta forma, se obtiene un modelo de masas concentradas de un edificio con características fijadas previamente. Las estructuras así definidas, y que se analizan en este trabajo, son modelos lineales de edificios representativos del tipo que se construye tradicionalmente en Chile, correspondientes a edificios de hormigón armado constituidos por marcos, muros y muros-marcos.

Los modelos estructurales discretos, definidos a partir de los modelos continuos correspondientes, tienen 27 m. de altura; en esos modelos se han considerado sólo 5 niveles y que la masa de cada nivel se encuentra concentrada en la losa del nivel y uniformemente distribuida en ella. Las losas conectan entre sí a 8 elementos resistentes verticales planos, 4 orientados según la dirección X y 4 según la dirección Y, como se muestra en la planta tipo de la Figura 1. Los 4 elementos resistentes de cada dirección constituyen dos ejes resistentes iguales, cada uno formado por un elemento que se deforma solamente por flexión (elemento F) y otro que se deforma exclusivamente por corte (elemento B). Las propiedades geométricas de los elementos resistentes quedan determinadas por los parámetros estructurales del modelo continuo y por los valores de los períodos fundamentales de oscilación de un modelo estructural análogo al analizado pero que presenta dos ejes de simetría en planta. Se emplea valores de 1.0s y 1.5s para los períodos según la dirección X, T_x ; los valores de los períodos en la dirección Y se determinan mediante la razón entre los períodos según las direcciones X e Y, T_x/T_y (1.0 y 1.5) y para los valores de los períodos de torsión se utiliza la razón T_x/T_{rz} (1.0 y 1.5). Para

los períodos de vibración vertical se consideran valores entre 0.2s y 1.0s. La irregularidad en planta de las estructuras se incorpora variando la posición de los elementos resistentes verticales, considerándose excentricidad pequeña y gran excentricidad, Allende y Martínez (2005).

Modelo de edificio real: El edificio, que se muestra en la Figura 2, corresponde a una estructura de hormigón armado de unos 90 metros de altura, formada por una columna y un par de brazos de unos 25 metros de largo que se encuentran en voladizo, lo que hace que esta estructura necesite de un análisis sísmico considerando la componente vertical de la solicitación sísmica, Gentina y Martínez (2008).

METODO DE LOS MAXIMOS MODALES DIRECCIONALES GENERALIZADO

La ecuación del movimiento del modelo estructural lineal elástico de masas concentradas, solicitado por un movimiento sísmico en la base, es la que se indica a continuación:

$$[M]\{\ddot{U}\} + [C]\{\dot{U}\} + [K]\{U\} = -[M][G]\{\ddot{U}_s\} \quad (1)$$

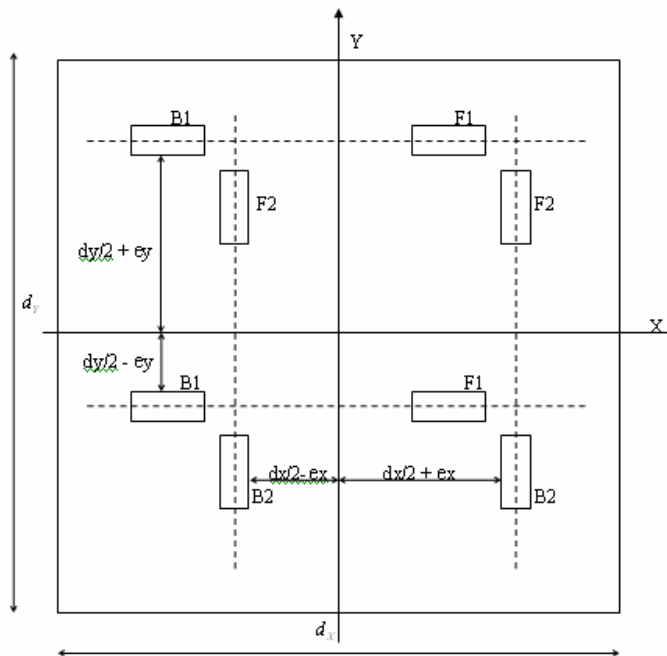


Figura 1 - Planta tipo de modelos lineales genéricos de edificios

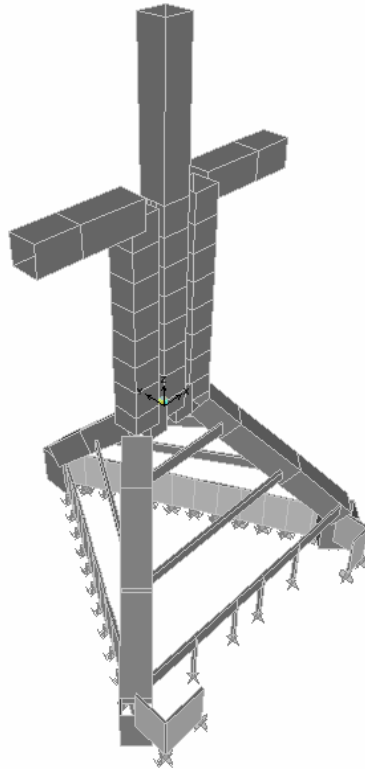


Figura 2 - Edificio real

En la ecuación (1), $[M]$ es la matriz de masas del edificio, $[K]$ es la matriz de rigidez, $[C]$ es la matriz de amortiguamiento viscoso, $\{U(t)\}$, $\{\dot{U}(t)\}$ y $\{\ddot{U}(t)\}$ son los vectores de desplazamientos, velocidades y aceleraciones, respectivamente, de los centros de masas de las losas relativos al suelo, $\{\ddot{U}_s(t)\}$ es el vector de aceleraciones del suelo, que contiene tres componentes de traslación ortogonales entre sí y una de rotación en planta, y $[G]$ es la matriz de transformación geométrica de los desplazamientos del suelo.

Considerando que la ecuación (1) es de variables separables, con

$$\{U\} = [f]\{Y\} \quad (2)$$

donde $[f]$ es la matriz modal y el vector $\{Y(t)\}$ es la solución temporal, se obtiene el siguiente sistema desacoplado de ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo

$$\{\ddot{Y}(t)\} + [2\alpha\omega]\{\dot{Y}(t)\} + [\omega^2]\{Y(t)\} = -[B]\{\ddot{U}_s(t)\} \quad (3)$$

donde $[\omega^2]$ es una matriz diagonal que contiene los cuadrados de las frecuencias naturales del sistema, $[2\alpha\omega]$ es una matriz diagonal que contiene los parámetros de amortiguamiento viscoso del sistema estructural, y la matriz $[B]$ tiene la siguiente expresión

$$[B] = ([\mathbf{f}]^T [M][\mathbf{f}])^{-1} [\mathbf{f}]^T [M][G] \quad (4)$$

Si se considera que la componente rotacional de la sollicitación es nula, la k-ésima ecuación del sistema (3) se escribe de la siguiente forma:

$$\ddot{Y}_k(t) + 2\mathbf{x}_k \mathbf{w}_k \dot{Y}_k(t) + \mathbf{w}_k^2 Y_k(t) = -(\mathbf{b}_{uk} \ddot{u}_s + \mathbf{b}_{vk} \ddot{v}_s + \mathbf{b}_{zk} \ddot{z}_s) \quad (5)$$

La dirección de incidencia de la sollicitación sísmica unidireccional se define mediante los ángulos \mathbf{a} y \mathbf{g} , siendo \mathbf{a} el ángulo que forma la proyección horizontal de la sollicitación con el eje X, medido en sentido antihorario, y \mathbf{g} el ángulo que define la dirección de la excitación con respecto al plano horizontal, también medido en sentido antihorario, como se muestra en la Figura 3. Entonces, la respuesta máxima para cada modo de vibrar de la estructura, considerando sólo la variable tiempo es:

$$Y_{kMAX} = \left[\cos \mathbf{g} (\mathbf{b}_{uk} \cos \mathbf{a} + \mathbf{b}_{vk} \text{sen} \mathbf{a}) + \mathbf{b}_{zk} \text{sen} \mathbf{g} \right] \frac{S_{ak}}{w_{nk}^2} \quad (6)$$

donde S_{ak} es la ordenada del espectro de aceleraciones absolutas, correspondiente al modo k, y w_{nk} es la frecuencia natural del modo k.

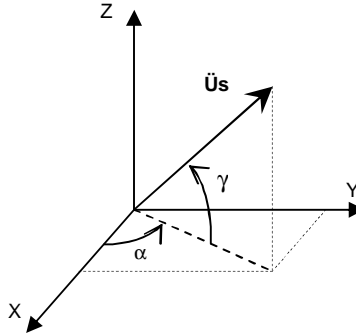


Figura 3 – Dirección de incidencia de la sollicitación unidireccional

Derivando parcialmente la ecuación (6) respecto de \mathbf{a} y luego respecto de \mathbf{g} e igualando a cero, en forma independiente cada una de esas derivadas, se obtienen los ángulos que definen la dirección crítica del k-ésimo modo de vibrar de la estructura. Las tangentes de dichos ángulos están dadas por las siguientes expresiones

$$\tan \mathbf{a}_{crit k} = \frac{\mathbf{b}_{vk}}{\mathbf{b}_{uk}} = \frac{\left(\sum_{j=1}^n m_j \mathbf{f}_{vjk} \right)}{\left(\sum_{j=1}^n m_j \mathbf{f}_{ujk} \right)} \quad \tan \mathbf{g}_{crit k} = \frac{\mathbf{b}_{zk}}{\sqrt{\mathbf{b}_{uk}^2 + \mathbf{b}_{vk}^2}} = \frac{\sum_{j=1}^n m_j \mathbf{f}_{zjk}}{\sqrt{\left(\sum_{j=1}^n m_j \mathbf{f}_{ujk} \right)^2 + \left(\sum_{j=1}^n m_j \mathbf{f}_{vjk} \right)^2}} \quad (7)$$

donde f_{ujk} , f_{vj} y f_{zjk} representan las componentes de traslación del piso j, según las direcciones X, Y y Z, del vector modal k.

Reemplazando a por $a_{crit k}$ y g por $g_{crit k}$ en la ecuación (6), la respuesta máxima de cada modo de vibrar de la estructura, considerando las variables temporal y espacial, queda:

$$Y_{kMAX} = \sqrt{b_{uk}^2 + b_{vk}^2 + b_{zk}^2} \frac{S_{ak}}{w_{nk}^2} \quad (8)$$

Si las formas modales de la estructura están normalizadas de tal forma que

$$[f]^T [M][f] = [I] \quad (9)$$

donde [I] es la matriz identidad, la ecuación (8) se escribe como

$$\{Y_{kMAX}\} = \sqrt{M_{XXk} + M_{YYk} + M_{ZZk}} \frac{S_{ak}}{w_{nk}^2} \quad (10)$$

donde M_{xxk} , M_{yyk} y M_{zzk} son las masas equivalentes directas de traslación del k-ésimo modo de vibrar en las direcciones X, Y y Z respectivamente.

Entonces, la máxima contribución del modo k a la respuesta de desplazamientos relativos de la estructura, considerando las variables temporal y espacial, es, de acuerdo con las ecuaciones (2) y (10)

$$\{U_k\} = \{f_k\} \sqrt{M_{XXk} + M_{YYk} + M_{ZZk}} \frac{S_{ak}}{w_{nk}^2} \quad (11)$$

Y las fuerzas sísmicas equivalentes máximas asociadas a los desplazamientos máximos del k-ésimo modo de vibrar quedan dadas por la siguiente expresión:

$$\{F_{kMAX}\} = [M]\{f_k\} \sqrt{M_{XXk} + M_{YYk} + M_{ZZk}} S_{ak} \quad (12)$$

Con las fuerzas máximas de la ecuación (12) se determinan las máximas contribuciones de cada modo de vibrar a los esfuerzos de corte, momento volcante y momento de torsión en cada piso de la estructura.

Finalmente, la respuesta sísmica de la estructura, desplazamientos y esfuerzos en cada piso, y deformaciones y esfuerzos en cada uno de los elementos estructurales del edificio, se determina combinando las contribuciones máximas de cada modo de vibrar con una fórmula de superposición modal adecuada. El procedimiento del método expuesto es equivalente a hacer incidir la sollicitación sísmica en forma independiente en cada una de las direcciones críticas modales definidas por las ecuaciones (7); y determinar, para cada una de esas direcciones sólo la respuesta dinámica máxima del modo de vibrar que corresponde

a esa dirección crítica. Luego, esas respuestas modales máximas, que han sido calculadas incorporando las variables tiempo y dirección de incidencia de la sollicitación, son combinadas con el criterio de superposición modal más adecuado. De esta forma, el método de los máximos modales direccionales generalizado considera en forma implícita la existencia de más de una componente traslacional del terremoto y también la orientación arbitraria que puede tener la dirección de incidencia de la sollicitación sísmica respecto de la posición del edificio.

ESPECTROS DE RESPUESTA REPRESENTATIVOS DE LAS TRES COMPONENTES DE LA SOLICITACION SISMICA

Para aplicar el método de los máximos modales direccionales (MDG), de acuerdo con las ecuaciones (8) a (12), se debe disponer de un espectro de respuesta representativo de las 3 componentes de la sollicitación sísmica. Entonces, se proponen 2 procedimientos para determinar dicho espectro.

Espectro modal: El espectro modal se ha definido como el valor máximo de la solución de la ecuación (5), para cada modo de vibrar, Guendelman (2005). Esta definición considera de manera implícita que el término de la derecha de la ecuación (5) corresponde a un registro de aceleraciones modal que se determina, tal como se puede observar en dicha ecuación, mediante la suma ponderada de las 3 componentes traslacionales del registro de aceleraciones, siendo los coeficientes de participación modal los factores de ponderación.

Espectro modal modificado: En atención a que el procedimiento de cálculo del espectro modal definido en el párrafo precedente es engorroso, ya que se requiere determinar la respuesta en el tiempo para cada modo de vibrar, se define el espectro modal modificado que corresponde a la suma ponderada de los espectros de respuesta de las 3 componentes traslacionales del registro de aceleraciones de terremoto. Los factores de ponderación de los 3 espectros corresponden a los coeficientes de participación modal de los modos fundamentales de traslación del edificio en las 3 direcciones de los ejes coordenados, Allende y Martínez (2005).

APLICACION DEL METODO

El método de los máximos modales direccionales generalizado ha sido aplicado en los 28 modelos estructurales definidos y en el modelo del edificio real; se ha empleado el espectro modal y el espectro modal modificado de cada uno de los 4 registros de aceleraciones de terremoto utilizados en el estudio, Melipilla, Valparaíso (UTFSM), Viña del Mar y Zapallar, correspondientes al terremoto chileno del 3 de marzo de 1985. La respuesta máxima de desplazamientos para cada modo de vibrar se obtiene empleando la ecuación (11), y las fuerzas modales máximas que permiten determinar los esfuerzos modales máximos se obtienen aplicando la ecuación (12). La respuesta sísmica máxima de cada edificio se ha determinado empleando los criterios de combinación modal de la raíz cuadrada de la suma de cuadrados (SRSS) y de la combinación cuadrática completa (CQC), Wilson et al (1981).

ANALISIS DE LA VALIDEZ DEL METODO

Para analizar la validez del método MDG se realiza un estudio comparativo de resultados empleando como base de comparación la respuesta máxima de la estructura obtenida mediante un método de integración paso a paso en el tiempo, considerando las 3 componentes de los registros de aceleraciones de terremoto ya individualizados en la sección anterior. En la determinación de las respuestas sísmicas máximas de los modelos estructurales analizados se utiliza todo el rango posible de direcciones de incidencia de las componentes horizontales de cada registro de aceleraciones (0 a 180 grados, con pasos de 15 grados). En el estudio se comparan los desplazamientos horizontales, el desplazamiento vertical y la rotación del centro de masas del nivel superior de cada edificio. Además, se incluye un análisis comparativo de los esfuerzos basales de corte, fuerza vertical y de momento de torsión. Por último, en el modelo del edificio real se compara también los valores de los esfuerzos axiales, esfuerzos de corte y momentos de flexión en vigas y columnas.

ANALISIS DE RESULTADOS

Las Tablas 1 y 2 resumen los principales resultados del estudio comparativo para los 28 modelos genéricos de edificios analizados y para el modelo del edificio real. La Tabla 1, que contiene los resultados correspondientes a los 28 modelos genéricos, muestra las diferencias promedio, en porcentaje, entre las respuestas estructurales máximas obtenidas mediante el método de los máximos modales direccionales generalizado, obtenidas empleando el espectro modal y el espectro modal modificado, y aquellas determinadas al aplicar el método de integración paso a paso en el tiempo. La Tabla 1 contiene también la desviación estándar de estas diferencias promedio o errores del método analizado. Se observa que las diferencias son inferiores a 33% para los 2 criterios de superposición empleados, SRSS y CQC, cuando se utiliza el espectro modal; sin embargo, los valores de las desviaciones estándares son en general inferiores para el criterio SRSS. En esta misma Tabla 1 se observa que al emplear el espectro modal modificado las diferencias promedio son en general inferiores a las obtenidas al aplicar el espectro modal, con excepción de las respuestas sísmicas asociadas a la dirección vertical, las cuales no resultan aceptables.

Tabla 1 Diferencias promedio en porcentaje y desviaciones estándares entre el método de los máximos modales direccionales generalizado y el método de integración en el tiempo. Modelos genéricos.

METODO MDG v/s INTEGRACION EN EL TIEMPO. MODELOS GENERICOS								
RESPUESTA ESTRUCTURAL	ESPECTRO MODAL				ESPECTRO MODIFICADO			
	Dif. Promedio		Desv. Standard		Dif. Promedio		Desv. Standard	
	SRSS	CQC	SRSS	CQC	SRSS	CQC	SRSS	CQC
DESP X NIVEL SUPERIOR	27,3	31,4	13,4	20,0	15,5	21,6	10,4	16,7
DESP Y NIVEL SUPERIOR	29,5	28,6	18,2	19,6	19,0	22,4	11,4	13,4
DESP VERT NIVEL SUPERIOR	23,4	28,1	17,8	23,2	157,7	167,9	77,5	93,7
ROTACION CM NIVEL SUPERIOR	32,5	32,3	20,3	22,9	29,3	33,3	30	31,4
CORTE BASAL X	25,4	28,9	13,5	19,3	21,2	26,4	14,7	18,4
CORTE BASAL Y	30,7	31,1	16,7	18,1	20,2	25,3	13	15,2
FUERZA VERTICAL BASAL	26,2	28,1	37,2	37,5	257,4	255,1	184,5	189,0
MOMENTO DE TORSION BASAL	31,4	31,9	18,5	19,3	31,8	33,1	23,2	23,9

En la Tabla 2 se muestran los resultados del estudio comparativo para el modelo del edificio real; se observa que la mayor diferencia promedio obtenida es de 41% y se produce en el esfuerzo de corte basal en la dirección Y, que es la dirección en que la estructura presenta mayor rigidez. Sin embargo, también se observa que las diferencias promedio determinadas para los esfuerzos en vigas y columnas son inferiores a 26%.

Tabla 2 Diferencias promedio en porcentaje entre el método de los máximos modales direccionales generalizado y el método de integración en el tiempo. Modelo edificio real.

METODO MDG v/s INTEGRACION EN EL TIEMPO. MODELO EDIFICIO REAL			
RESPUESTA ESTRUCTURAL	SRSS	RESPUESTA ESTRUCTURAL	SRSS
DESP X NIVEL SUPERIOR	9,1	CORTE EN VIGAS	19,1
DESP Y NIVEL SUPERIOR	34,6	FLEXION EN VIGAS	25,9
DESP VERT NIVEL SUPERIOR	37,8	AXIAL EN VIGAS	19,8
ROTACION CM NIVEL SUPERIOR	8,3	CORTE EN COLUMNAS	15,3
CORTE BASAL X	15,1	TORSION EN COLUMNAS	7,2
CORTE BASAL Y	41,0	AXIAL EN COLUMNAS	24,2
FUERZA VERTICAL BASAL	31,8		
MOMENTO DE TORSION BASAL	18,5		

CONCLUSIONES

Se ha analizado la validez del método de los máximos modales direccionales generalizado para determinar la respuesta sísmica máxima de la estructura incorporando los efectos direccionales del terremoto. Los resultados obtenidos permiten deducir que el método es adecuado para determinar los esfuerzos sísmicos si en su aplicación se utiliza el espectro representativo de las 3 componentes de la sollicitación sísmica, designado como espectro modal, y el criterio de combinación modal SRSS, ya que en este caso los errores son inferiores a 33%. El método también entrega buenos resultados en el cálculo de los esfuerzos sísmicos de vigas y columnas cuando se utiliza el espectro modal modificado, ya que los errores promedio son inferiores a 26%.; a pesar de que los errores en el cálculo del desplazamiento vertical del piso superior y la fuerza vertical basal son inaceptables cuando se utiliza este último espectro.

Una ventaja importante desde el punto de vista práctico del método analizado, es que reduce la cantidad de cálculos. En efecto, al aplicar este método se requiere un solo análisis sísmico en cada edificio para determinar los esfuerzos y desplazamientos máximos de diseño. Sin embargo, la determinación del espectro modal, que es el espectro más adecuado para la aplicación del método MDG resulta engorrosa. Otro beneficio relevante que se obtiene con este método es que su empleo evita la elección de direcciones arbitrarias para efectuar el análisis sísmico de edificios. Por lo tanto, es innecesaria la combinación convencional de los resultados que se obtiene de los análisis según esas dos direcciones ortogonales.

AGRADECIMIENTOS

Se ha contado con apoyo financiero de la Universidad de Santiago de Chile, a través de la Dirección de Investigaciones Científicas y Tecnológicas. También se agradece al señor René Lagos de René Lagos y Asociados por facilitar el modelo del edificio real utilizado en el estudio.

REFERENCIAS

- Cheng, F. Y. and J. F. Ger, "The Effect of Multicomponent Seismic Excitation and Direction on Response Behavior of 3-D Structures", 4th U.S. N. C. on Earthquake Engineering, Vol.2, 1990: 5-14.
- López, O.A.; A. K. Chopra, and J.J. Hernández, "Evaluation of combination rules for maximum response calculation in multicomponent seismic analysis", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 30,9, 2001, 1379-1398.
- López, O.A.; A.K. Chopra and J.J. Hernández, "Critical response of structures to multicomponent earthquake excitation", Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 29,12, 2002, 1759-1778.
- Wilson, E. L., "Three-dimensional static and dynamic analysis of structures", Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, USA, 2002.
- "Earthquake Resistant Regulations. A World List". International Association For Earthquake Engineering. IAEE, 2000.
- Guendelman, T., P. González y J. Lindenberg, "Acoplamiento Sísmico de Traslación en Edificios de Comportamiento Lineal". XXV Jornadas Sudam. Ing. Estructural, Brasil, Vol.3, 1991: 97-106.
- "Norma Chilena de Diseño Sísmico de Edificios", NCh 433.Of96, Instituto Nacional de Normalización, Chile.
- González, P., "Considering Earthquake Direction on Seismic Analysis", Proceedings 10^a WCEE, Madrid, España, Vol.7, 1992: 3809-3813.
- González, P., "Análisis, considerando sollicitación bidireccional, de la validez de un método que incorpora los efectos direccionales del terremoto en el análisis sísmico de estructuras". I Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica y VII Jornadas ACHISINA, 1, 337-346, Santiago, Chile, 1997.
- Allende, J. y J. Martínez, "Determinación de un espectro de respuesta utilizando las tres componentes de la sollicitación sísmica". Memoria de Título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, USACH, 2005.
- Gentina, K. y A. Martínez, "Validación de uso de un método espectral que incorpora los efectos direccionales de la sollicitación en el análisis sísmico de edificios". Memoria de Título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, USACH, 2008.
- Guendelman 2005, conversación personal.
- Wilson, E., A. Der Kiureghian and E. Bayo, "A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis", Short Communications, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 9 1981: 187-194.