

Métodos de selección y escalamiento de registros sísmicos para análisis de la respuesta en el tiempo

Fecha de entrega: 8 de Marzo 2009
Fecha de aceptación: 20 de Mayo 2009

Claudio Oyarzo

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Casilla 297, Concepción, Chile, coyarzo@ucsc.cl (actualmente en Department of Civil and Environmental Engineering, The University of Auckland, Private Bag 92019, Auckland Mail Centre, Auckland 1142, New Zealand, coya001@aucklanduni.ac.nz)

En este artículo se desarrolla un análisis crítico de las recomendaciones establecidas en la norma sísmica chilena para instalaciones industriales (NCh 2369 Of2004) relativas a análisis de la respuesta en el tiempo. Para este fin, se presenta un método para la selección de registros sísmicos adecuados para realizar análisis de respuesta en el tiempo. Adicionalmente, se presentan los resultados de un estudio comparativo de los métodos de escalamiento de registros propuestos en la norma europea, norteamericana y neozelandesa. Se identifican las diferencias entre cada uno de los métodos y su efecto en la respuesta estructural de un modelo de un grado de libertad. A partir de este estudio, se extraen algunas recomendaciones para su posible inclusión en la norma chilena.

Palabras clave: norma sísmica, análisis de la respuesta en el tiempo, selección de registros, escalamiento de registros, terremotos de Chile

This article presents a critical analysis of the recommendations for time-history analysis contained in the Chilean standard for seismic design of industrial facilities (NCh 2369 Of2004). For this purpose, a method for the selection of earthquake records to be used in time-history analysis is presented. In addition, this article presents the results of a comparative study of the record scaling methods proposed by the European, North American, and New Zealand standards. The differences between these methods and their effects on the structural response of a single degree of freedom system are identified. Some recommendations to improve the Chilean standard are obtained from these studies.

Keywords: seismic standard, time-history analysis, record selection, record scaling, Chilean earthquakes

INTRODUCCIÓN

El análisis de respuesta en el tiempo (ART) es un método de análisis estructural dinámico paso a paso, en el cual un modelo numérico de una estructura es sometido a la acción de un conjunto de acciones variables en el tiempo. Este tipo de análisis pretende reproducir la respuesta real de una estructura debido a excitaciones dinámicas de distinto origen, por ejemplo: sismos, oleaje, vibraciones inducidas por maquinaria o tráfico. Dicha respuesta es utilizada para determinar los parámetros de interés para el diseño (esfuerzos y deformaciones). La Figura 1 ilustra un caso particular de análisis de una estructura bajo el efecto de un sismo. En el último tiempo, este método ha ido ganando adeptos gracias al desarrollo de computadores con mayores capacidades de procesamiento y almacenamiento. Actualmente, existen numerosos programas computacionales que permiten este tipo de análisis y que además son capaces de considerar el comportamiento inelástico de los materiales y otras

fuentes de no linealidad en el modelo (efecto P- Δ , conexiones, etc.). Hoy, ya no es raro que el ART sea utilizado para el diseño de importantes obras alrededor del mundo, saliendo del ámbito puramente académico.

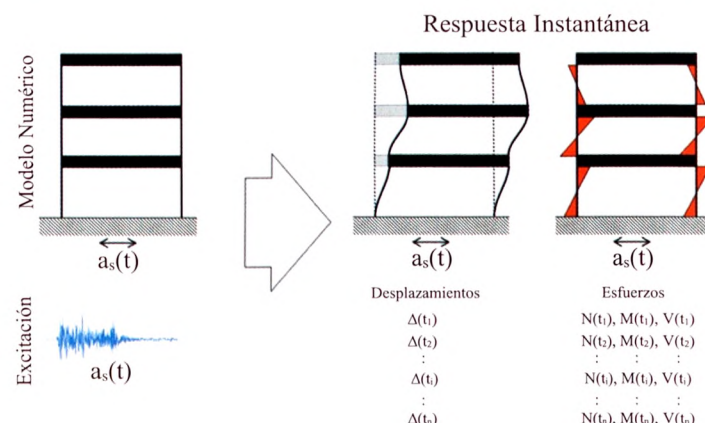


Figura 1: Representación esquemática del procedimiento aplicado en el ART

El desarrollo de métodos de ART también se ha visto reflejado en la incorporación de recomendaciones relativas a este tópico en los códigos de diseño de diferentes países. La más reciente versión de la norma chilena para el diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales (INN Chile, 2003) propone en la sección 5.8.2 la utilización de análisis ART para determinar las solicitaciones sísmicas. Ella recomienda *“utilizar al menos tres registros reales, representativos de las zonas sísmogénicas consideradas, escalados de modo que el espectro resultante de combinar los espectros de cada registro, mediante la raíz cuadrada del promedio de los cuadrados de los valores individuales escalados, no quede en ningún punto del rango de frecuencias de interés por debajo del espectro de diseño”* (INN Chile, 2003).

Alternativamente, se permite utilizar registros sintéticos generados por modelos numéricos que cumplan con las condiciones establecidas previamente. Adicionalmente, se indica que si se utilizan *“tres registros diferentes, se adoptarán para el diseño los valores máximos del parámetro de interés (fuerza axial, corte, momento flector y deformaciones), obtenidos de aplicar cada uno de ellos”* (INN Chile, 2003). Sin embargo, en estas recomendaciones existe una serie de imprecisiones que requieren ser atendidas y desarrolladas. Algunas de las preguntas que surgen son: ¿cómo elegir los registros representativos de las zonas sísmogénicas consideradas?, ¿cuáles son las características sísmológicas de dichas zonas?, ¿tres registros es un número suficiente para asegurar un diseño seguro?, ¿es el valor máximo de los parámetros de interés obtenido a partir de tres registros la mejor opción de diseño?, ¿a qué se refiere la norma con “el rango de frecuencias de interés”?, ¿cuál es la experiencia extranjera respecto a métodos de selección y escalamiento de registros para ART?

El objetivo del presente estudio es abordar las preguntas expuestas anteriormente. En primer término, se presenta una propuesta para la selección de registros sísmicos adecuados a las características sísmológicas propias del emplazamiento del proyecto; en segundo término, a modo de ejemplo de la experiencia internacional, se comparan los métodos de escalamiento propuestos en la norma europea, norteamericana y neozelandesa; finalmente, se entregan algunos comentarios y recomendaciones a la normativa vigente en Chile.

SELECCIÓN DE REGISTROS SÍSMICOS

Actualmente, existe un gran número de registros reales

disponibles en bases de datos en internet (COSMOS, 1999; EQC New Zealand and GNS Science, 2004; PEER Center, 2005). Esto facilita la identificación de registros que cumplan con las características sísmogénicas definidas como deseables. Sin embargo, esta abundancia de registros dificulta la selección objetiva e imparcial de registros. Esto lleva a que el proceso de selección tienda a ser más bien aleatorio, o bien, se tienda a escoger registros que generen una respuesta más “deseable” y omitir aquellos que entreguen resultados “inconvenientes”. Esta última situación no implica necesariamente una falta ética por parte del profesional a cargo, pues actualmente no existen directrices que lo guíen en el proceso de selección de registros. En consecuencia, no siempre hay razones suficientes que induzcan a preferir un determinado registro por sobre otro. En general y tradicionalmente, la tarea de seleccionar registros adecuados para ART ha quedado en manos de los sísmólogos. La experiencia internacional ha demostrado que los sísmólogos tienden a ser “prudentes” al recomendar registros para propósitos de ART, suponiendo que todos los parámetros relacionados a las características sísmológicas de los terremotos (magnitud, distancia a la fuente, profundidad de la fuente, mecanismo de falla y tipo de suelo) influyen significativamente en la respuesta estructural, lo que no es necesariamente cierto. Este relativo conservadurismo está más relacionado a una falta de conocimiento respecto a la respuesta estructural esperable que a hechos estrictamente científicos (Iervolino and Cornell, 2005).

Esto es perfectamente entendible dadas las diferentes áreas de especialización que tienen los ingenieros y sísmólogos. Esto ha hecho del proceso de selección un mecanismo complejo y muchas veces poco claro que depende en gran medida de la experiencia y criterios del sísmólogo a cargo. Lo que no siempre es fácil de justificar científicamente.

Para resolver este tipo de problemas y prevenir posibles vicios, en algunos países se ha optado por establecer de forma explícita conjuntos de registros para ser utilizados en ART (Comartin *et al.*, 1996). Pero a su vez, en el último tiempo se han hecho significativos esfuerzos para ayudar en el proceso de selección de registros y existen numerosos estudios que proponen procedimientos para escoger registros sísmicos apropiados para ART (Baker and Cornell, 2006; Bommer and Acevedo, 2004; Cornell, 2005; Dhakal *et al.*, 2007). Recientemente, Oyarzo-Vera *et al.* (2009) presentan un procedimiento para la selección de registros sísmicos para ART en Nueva Zelanda, cuya metodología y criterios de selección podrían ser

metodología y criterios de selección podrían ser aplicables en Chile. Este estudio establece zonas con características sismológicas comunes. Dichas zonas han sido definidas en base a los mapas de riesgo sísmico, como lo muestra la Figura 2. Dichos mapas están incluidos en la norma neozelandesa SNZ (2004) y son construidos a partir de un análisis probabilístico (Stirling *et al.*, 2002), en conjunto con información histórica relativa a las características de los terremotos registrados en cada zona (magnitud profundidad, distancia epicentral y mecanismo de falla). Como resultado de este estudio, se han definido 11 zonas (Figura 3). Para cada una de estas zonas se ha establecido una serie de propiedades que los registros deberían tener para ser compatibles con las características sismológicas propias de la zona (magnitud, distancia más corta a la falla, tipo de suelo, mecanismo de falla y profundidad). Más aun, se ha establecido un conjunto de registros apropiados para cada zona. En el proceso de selección se ha tenido especial cuidado de escoger registros cuyo espectro de aceleraciones tenga una forma parecida al espectro definido por la norma para la zona y suelo en cuestión. Dado que el espectro de la norma depende del tipo de suelo sobre el cual se emplaza la estructura, es necesario establecer un conjunto de registros apropiados para cada tipo de suelo.

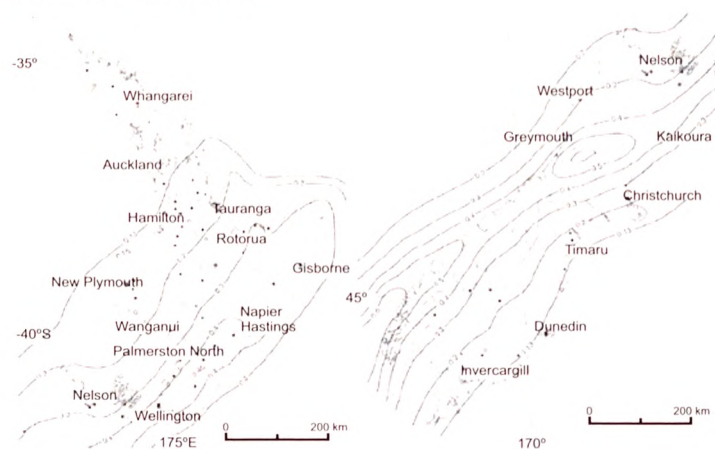


Figura 2: Factor de riesgo sísmico (SNZ, 2004): a) Isla Norte y b) Isla Sur

Respecto al número de registros a considerar y qué valor del parámetro de interés es más adecuado para el diseño o evaluación estructural del comportamiento, estudios recientes (Dhakal *et al.*, 2007; Oyarzo-Vera and Chouw, 2008) han demostrado que la respuesta máxima obtenida a partir del análisis de un conjunto de tres registros no es la mejor opción. Si dentro del conjunto de registros seleccionados se escoge un registro

que presente un máximo instantáneo (“peak”) de aceleraciones particularmente alto, es esperable que éste genere solicitaciones en la estructura también significativamente altas. Por lo tanto, al aplicar el criterio propuesto por la norma chilena (respuesta máxima de un conjunto de tres registros), el diseño quedará finalmente determinado por la respuesta a este registro específico; o más aun, al particular “peak” de aceleraciones de este registro. Con esto, pierde todo sentido la utilización de múltiples registros, pues el diseño quedaría determinado por las singularidades de un registro, en lugar de las propiedades generales del conjunto de registros seleccionados. Para resolver este problema, algunas normas extranjeras (ASCE, 2007; ECS, 2004) proponen la utilización de al menos siete registros y consideran como parámetros de diseño la respuesta estructural promedio a la acción de este conjunto de registros.

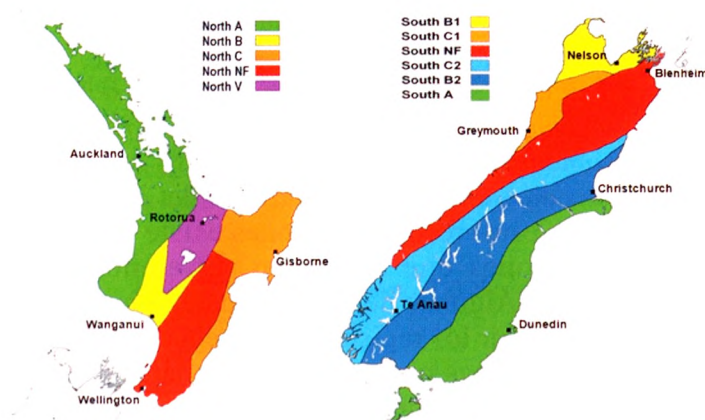


Figura 3: Zonificación para la selección de registros a ser utilizados en ART, a) Isla Norte y b) Isla Sur

ESCALAMIENTO DE REGISTROS SÍSMICOS

Una vez que se han seleccionado los registros adecuados, es necesario escalar dichos registros de manera que se ajusten a la intensidad de los terremotos esperados para el emplazamiento específico del proyecto en estudio. En general, este ajuste consiste en aplicar factores de escala lineales de manera de que el espectro de aceleraciones de los registros se ajuste al espectro de diseño definido por la norma en un rango de períodos cercano al período natural de la estructura. Sin embargo, en la comunidad científica no existe completo acuerdo en cómo escalar estos registros, tal como queda demostrado al comparar los diferentes métodos propuestos en diferentes normativas. Finalmente, esto acaba afectando la respuesta estructural. En este estudio se comparan los métodos propuestos por la norma europea, las directrices norteamericanas y la norma neozelandesa.

Métodos propuestos en algunas normas internacionales

La norma europea Eurocode 8 (EC8) (ECS, 2004) recomienda escalar los registros de aceleraciones de manera que el espectro promedio del conjunto de registros sea siempre mayor al 90% de espectro de diseño en un rango de períodos entre $0.2 T_1$ y $2.0 T_1$, donde T_1 es el período fundamental de la estructura a ser considerada. Adicionalmente, se exige que el valor de la ordenada del espectro promedio en $T = 0$ sea mayor que el valor del espectro de diseño en dicho punto. Esta norma impone la utilización de al menos tres registros. En el caso que se utilicen menos de siete registros, se deberá considerar la respuesta máxima de la estructura para obtener los parámetros de diseño; pero, si se utilizan siete o más registros, se recomienda utilizar la respuesta estructural promedio para obtener los parámetros de diseño.

Las recomendaciones propuestas para Estados Unidos en el documento de la ASCE (2007) ofrece el método más simple, pero éste es también el más conservador. Ella propone que el espectro promedio de los registros se ajuste al espectro de diseño multiplicado por un factor 1.3 en un rango de períodos entre $0.2 T_1$ y $1.5 T_1$. Al igual que la norma europea, recomienda que en caso de que se utilicen menos de siete registros, se considere la respuesta máxima de la estructura para obtener los parámetros de diseño; pero si se utilizan siete o más registros, se utilice la respuesta estructural promedio.

La norma neozelandesa SNZ (2004) presenta un método de escalamiento más elaborado. Esta norma recomienda el uso de al menos tres registros, los que deben ser escalados utilizando dos factores: el factor de escala del registro (k_1) y el factor de escala de la familia de registros (k_2). El propósito del factor k_1 es ajustar el espectro de cada registro al espectro de diseño de manera de minimizar la función:

$$f = \log \left(k_1 \frac{\text{Espectro de Registro}}{\text{Espectro de Diseño}} \right) \quad (1)$$

en el rango de períodos $0.4 T_1$ y $1.3 T_1$. El factor k_2 se aplica para asegurar que la energía de al menos el espectro de uno de los registros ya escalados por el factor k_1 sea mayor a la energía contenida en el espectro de diseño. Dicho factor k_2 corresponde al máximo valor

obtenido para el cociente entre la aceleración espectral definida por el espectro de la norma y la aceleración espectral obtenida de la componente principal de cada registro escalado, considerando el conjunto completo de registros, siempre y cuando ésta sea mayor que 1,

$$k_2 = \text{Max}_{\text{conjunto}} \left\{ \max \left(\frac{\text{Espectro de Diseño}}{k_1 \text{ Espectro de Registro}} \right) \right\} > 1.0 \quad (2)$$

La norma neozelandesa, a diferencia de las antes mencionadas, propone en todos los casos la utilización de la respuesta máxima de la estructura para determinar los valores de diseño. Este último punto ha sido motivo de discusión dentro de la comunidad de ingenieros en Nueva Zelanda, por los motivos antes expuestos. Es muy probable que dicha discusión tenga como resultado una enmienda de la norma y el criterio de utilizar la respuesta promedio de siete registros se imponga.

Estudio comparativo de los métodos de escalamiento

Para evaluar el efecto del método de escalamiento sobre la respuesta estructural, se ha desarrollado un ART de un sistema de un grado de libertad bajo la acción de un conjunto de siete registros escalados según los métodos propuestos en EC8, ASCE/SEI y NZS.

El sistema de un grado de libertad ha sido modelado utilizando el programa computacional de análisis estructural no lineal Ruaumoko (Carr, 2004). El sistema posee un período natural $T_1 = 0.5$ s y un amortiguamiento del 15% (Figura 4). Su comportamiento histerético ha sido representado por el modelo de Takeda modificado (Otani, 1981), con parámetros $\alpha = 0.4$ y $\beta = 0$, carga de fluencia (F_y^+ , F_y^-) igual a 22.8 kN y una rigidez de post fluencia igual a $0.168 k_0$ (Figura 5).

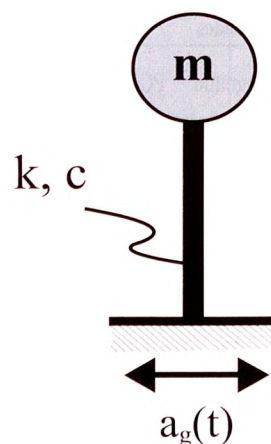


Figura 4: Modelo de un grado de libertad

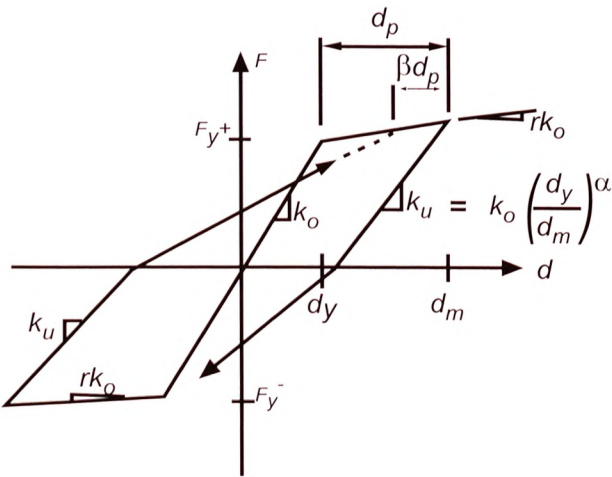


Figura 5: Modelo histérico de Takeda modificado (Carr, 2004)

Los registros sísmicos presentados en la Tabla 1 han sido elegidos para satisfacer las condiciones exigidas para la ciudad de Wellington (Nueva Zelanda) y suelo firme, mayor detalle respecto a las características de cada registro se puede encontrar en Oyarzo-Vera *et al.* (2009). En dicho grupo se han incluido tres registros: “Tabas”, “Lucerne” e “Izmit”; capturados cerca de la fuente y que manifiestan características de impulsivas (*forward directivity*) (Somerville *et al.*, 1997), siguiendo la recomendación establecida en la norma neozelandesa (SNZ, 2004) para Wellington.

La Tabla 1 también incluye los factores de escala obtenidos al aplicar los distintos métodos. Los espectros de dichos registros sin escalar y escalados de acuerdo a los diferentes métodos se presentan en la Figura 6. La Figura 7 presenta a modo de ejemplo el registro “Llolleo” original y escalado según los tres métodos.

Tabla 1: Registros sísmicos seleccionados para Wellington/suelo firme

Registro	Propiedades			Factores de escala		
	Fecha	Magnitud	PGA (g)	EC8	ASCE /SEI	NZS
El Centro (EE.UU.)	19-May-1940	7.0	0.347	1.774	2.562	1.241
Llolleo (Chile)	03-Mar-1985	7.8	0.646	0.815	1.177	0.679
La Unión (México)	19-Sep-1985	8.1	0.163	2.410	3.481	2.257
Hokkaido (Japón)	26-Sep-2003	8.3	0.283	2.639	3.812	1.514
Tabas (Irán)	16-Sep-1978	7.2	1.041	0.493	0.712	0.505
Lucerne (EE.UU.)	28-Jun-1992	7.3	0.778	1.153	1.666	1.275
Izmit (Turquía)	17-Ago-1999	7.5	0.215	2.724	3.934	1.926

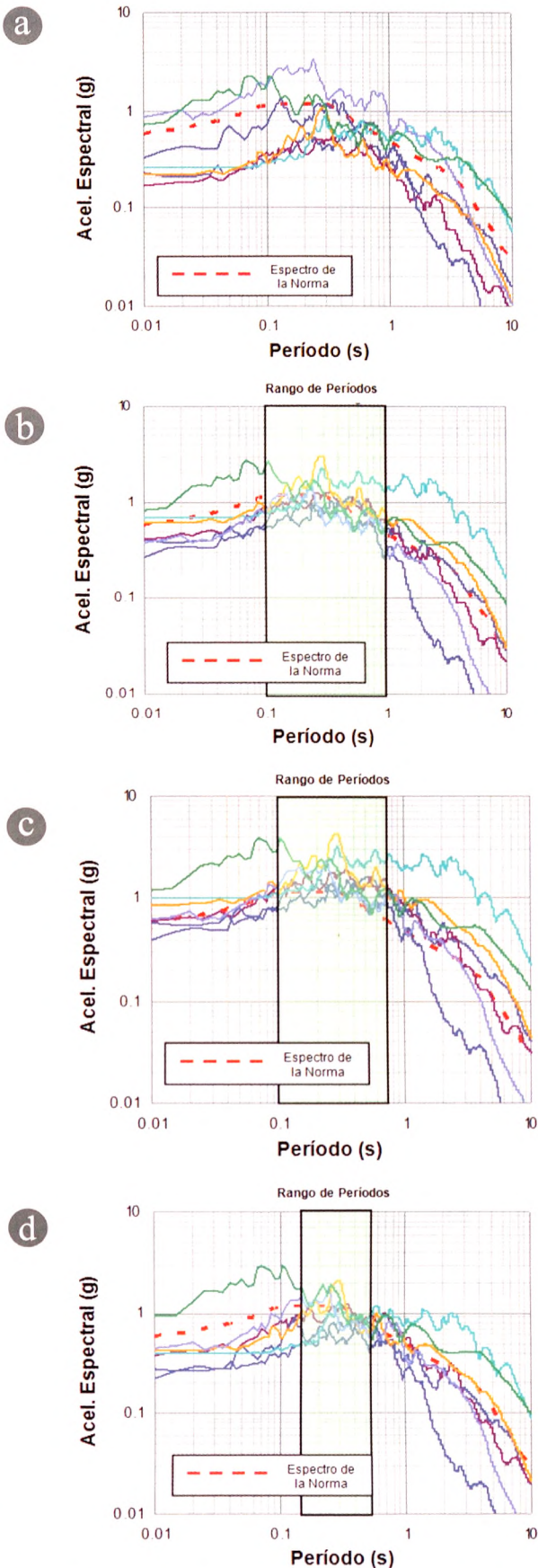


Figura 6: a) Espectros no escalados, b) espectros escalados según EC8, c) espectros escalados según ASCE/SEI y d) espectros escalados según NZS

La primera diferencia significativa entre estos métodos es el rango de períodos considerado para el escalamiento. El rango de períodos definido por EC8 es el más amplio ($0.1\text{ s} < T < 1.0\text{ s}$), mientras que el rango de períodos definido por NZS es el más estrecho ($0.2\text{ s} < T < 0.65\text{ s}$), lo que permite un mejor ajuste con el espectro de diseño y una menor dispersión.

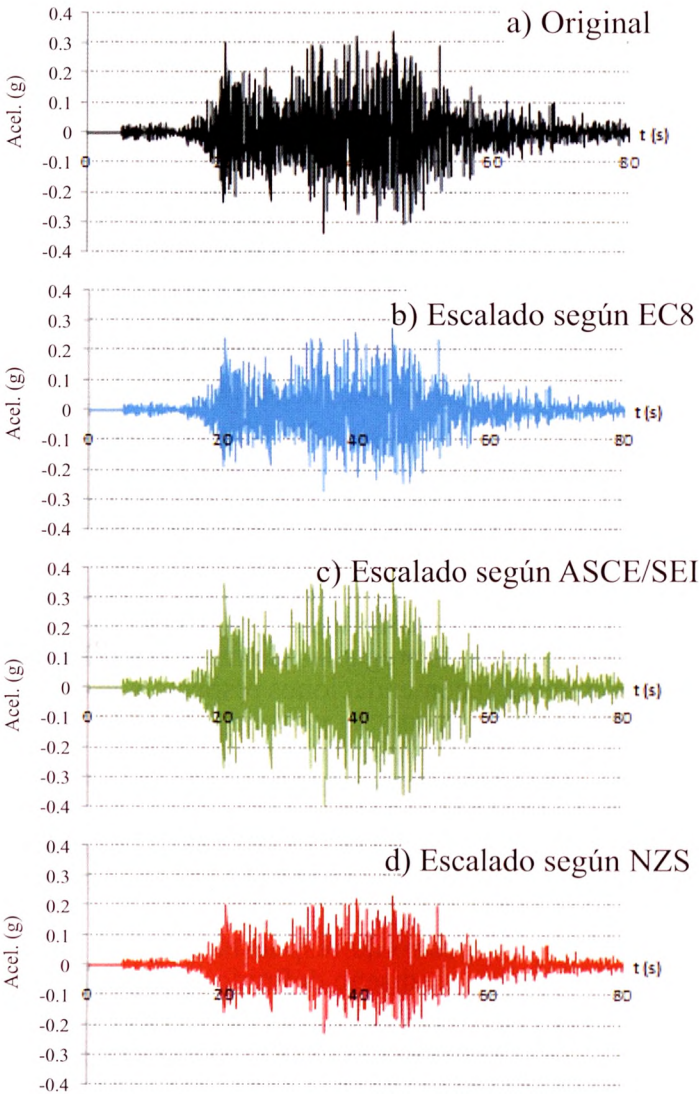


Figura 7: Registro Llole

ANÁLISIS DE RESULTADOS

La respuesta del sistema es evaluada a través del desplazamiento máximo (u_{max}) registrado en la estructura. En este estudio, se compara la respuesta generada por cada uno de los registros escalados de acuerdo a cada uno de los tres métodos presentados. A modo de ejemplo, la Figura 8 presenta la respuesta del sistema al registro “Llole”. Un resumen de los resultados de dicho análisis es presentado en la Tabla 2 y en la Figura 9. Cabe hacer la aclaración que en la

Figura 9 la situación de colapso ha sido representada con un desplazamiento máximo igual a 100 mm, no obstante, realmente el desplazamiento máximo calculado es mayor.

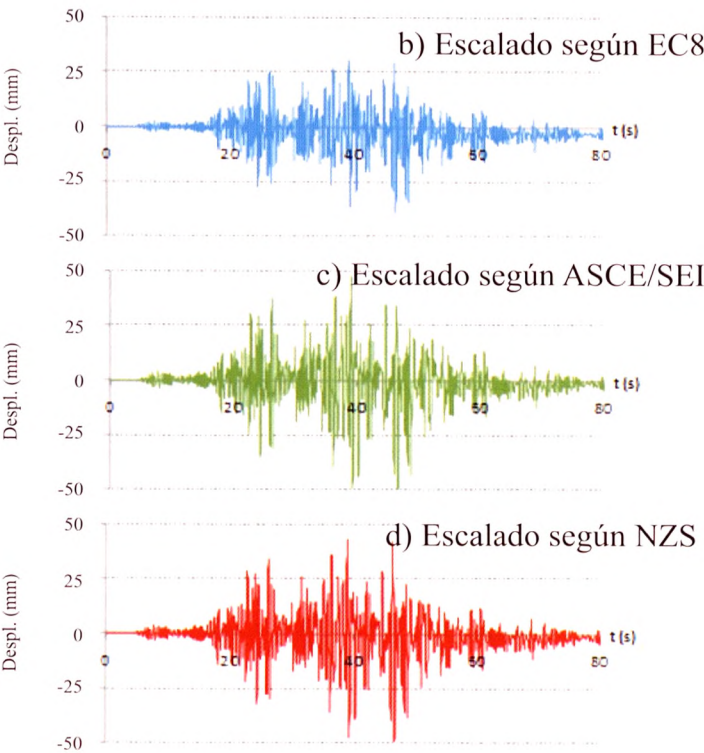


Figura 8: Respuesta estructural del sistema bajo la acción del registro Llole

Tabla 2: Respuesta estructural del sistema de un grado de libertad

Registro	U _{max} (mm)		
	EC8	ASCE/SEI	NZS
El Centro (EE.UU.)	72.70	colapso	49.61
Llolle (Chile)	38.98	53.98	31.54
La Unión (México)	44.84	69.97	41.35
Hokkaido (Japón)	colapso	colapso	50.65
Tabas (Irán)	33.26	51.01	33.59
Lucerne (EE.UU.)	20.19	29.33	22.33
Izmit (Turquía)	46.89	colapso	28.27
Valor máximo	72.7	69.97	50.65
	144%	138%	100%
Valor promedio	42.8	51.1	36.8
	116%	139%	100%
Desviación estándar	17.5	16.7	10.8
	41%	33%	29%

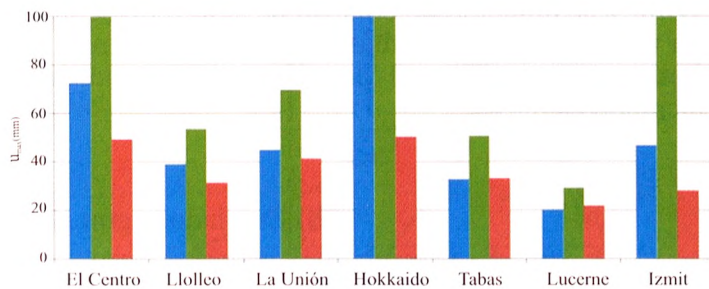


Figura 9: Máxima respuesta estructural

En términos generales, los valores de u_{max} más pequeños son los obtenidos del análisis de la estructura bajo la acción de los registros escalados según NZS, seguidos por aquellos obtenidos con los registros escalados por EC8. La mayor respuesta se obtiene al escalar los registros según ASCE/SEI. Al aplicar el método de escalamiento de EC8 se detecta colapso estructural para el registro "Hokkaido". Cuando el método de escalamiento utilizado es ASCE/SEI, se logra el colapso con el registro "El Centro", "Hokkaido" e "Izmit". El método NZS no genera colapso de la estructura para ninguno de los registros utilizados.

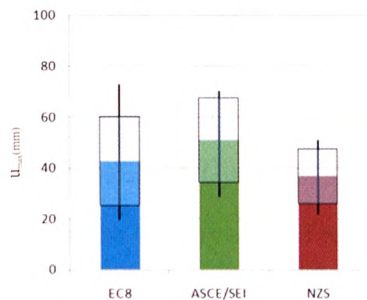


Figura 10: Valor promedio de la respuesta máxima

Tal como lo ilustra la Figura 10, el valor promedio de u_{max} de menor magnitud corresponde al método NZS. El valor obtenido por los métodos EC8 y ASCE/SEI son 16% y 39% mayores que el valor obtenido por NZS, respectivamente. Referente a la dispersión de los datos, la menor desviación estándar se obtiene al aplicar el método NZS (29%), seguido por el método ASCE/SEI (33%) y, finalmente, el método EC8 (41%).

Relativo al valor máximo de u_{max} (excluido colapso) obtenido con NZS (50.7 mm), éste es comparable con el valor promedio de u_{max} obtenido con EC8 (42.8 mm) y ASCE/SEI (51.1 mm), tal como se muestra en la Figura 11. Esto indica que si se desarrolla un ART basado en la respuesta de siete registros, las recomendaciones entregadas por NZS (utilizar el valor máximo de u_{max}) es equivalente a las propuestas de EC8 y ASCE/SEI (utilizar el valor promedio de u_{max}). Pero tal como se mencionó anteriormente, el criterio

aplicado por NZS se ve fuertemente influenciado por las características particulares de registros específicos (por ejemplo: "peaks" de aceleración). Considerando esta última observación, si se comparan solamente los valores promedios de u_{max} al utilizar siete registros, el método NZS se revela como el menos conservador y el que entrega la menor desviación estándar.

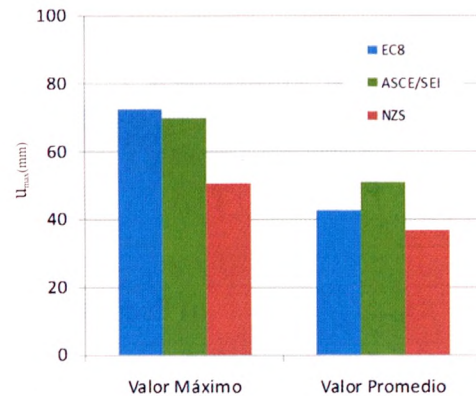
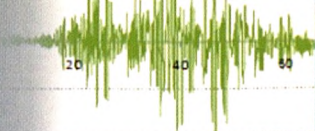


Figura 11: Respuesta máxima y respuesta promedio

COMENTARIOS SOBRE LA NORMA CHILENA

Considerando lo expuesto anteriormente y basándose en la metodología desarrollada para Nueva Zelanda, es posible volver a las preguntas planteadas al principio y hacer algunas recomendaciones respecto a la norma chilena:

- Es recomendable definir zonas con características sísmológicas comunes; establecer explícitamente las características de los registros sísmicos adecuados para dichas zonas, de manera de facilitar el proceso de selección; y, en lo posible, establecer conjuntos de registros cuyo espectro de respuesta tenga un perfil similar al espectro de diseño definido en la norma.
- La experiencia internacional ha demostrado que es más conveniente la utilización de conjuntos de siete o más registros y considerar la respuesta estructural promedio para determinar los valores de diseño (esfuerzos y deformaciones).
- Al momento de escalar los registros, es más conveniente utilizar un método de ajuste más elaborado sobre un rango de períodos estrecho (por ejemplo, el método propuesto en NZS), que un método de ajuste simple aplicado a un rango de períodos amplio (por ejemplo, el método propuesto en EC8 o ASCE/SEI). En el caso chileno, la opción recomendada es establecer un rango de períodos de interés estrecho ($0.4 T_1 < T < 1.3 T_1$) y ajustar el espectro de los registros al espectro de diseño (no amplificado, ni reducido) establecido en la norma, de manera similar a la sugerida en la norma neozelandesa.



CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente artículo se ha realizado un análisis crítico de las recomendaciones relativas a análisis tiempo-historia incluidas en la norma chilena para el diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, identificando imprecisiones y algunos tópicos que requieren mayor desarrollo.

Respecto a la selección de registros se recomienda un procedimiento de zonificación y caracterización sísmológica que facilite el proceso. Más aun, se recomienda establecer de forma explícita conjuntos de registros adecuados para cada zona.

Relativo al escalamiento de registros, al revisar algunos de los métodos propuestos en normas extranjeras, es posible inferir que un procedimiento similar al propuesto en la norma neozelandesa sería el más adecuado, en el cual el espectro de respuesta de los registros sísmicos seleccionados se ajusta al espectro de diseño establecido en la norma en un rango de periodos relativamente estrecho. Sin embargo, la experiencia internacional ha demostrado la conveniencia de utilizar para diseño la respuesta promedio del ART de siete registros en lugar de la respuesta máxima de un número menor de registros.

AGRADECIMIENTOS

El autor quiere agradecer el apoyo que el Gobierno de Chile y la Universidad Católica de la Santísima Concepción le han entregado para sus estudios de doctorado en la Universidad de Auckland (Nueva Zelanda), a través de la "Beca Presidente de la República" y "Beca de Perfeccionamiento Académico", respectivamente.

REFERENCIAS

ASCE (2007). ASCE/SEI 41-06. Seismic rehabilitation of existing buildings. American Society of Civil Engineers, Reston, Va., xvi, 410 p.

Baker, J. and Cornell, A. (2006). Spectral shape, epsilon and record selection. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* **35**, 1077-1095

Bommer, J. J. and Acevedo, A. B. (2004). The use of real earthquake accelerograms as input to dynamic analysis. *Journal of Earthquake Engineering* **8**, 43-91

Carr, A. J. (2004). Ruaumoko – A program for inelastic time-history analysis. Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand

Comartin, C., Niewiaroski, R. and Rojahn, C. (1996). ATC-40 Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. SSC 96-01, Applied Technology Council, CA, USA

Cornell, C. (2005). On earthquake record selection for nonlinear dynamic analysis. *The Esteve Symposium*, Mexico, August 2005

COSMOS (1999). COSMOS Virtual Data Center. <http://db.cosmos-eq.org/scripts/default.plx> (01.May.2009)

Dhakal, R., Singh, S. and Mander, J. (2007). Effectiveness of earthquake selection and scaling procedure method in New Zealand. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* **40**(3), 160-171

ECS (2004). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium

EQC New Zealand and GNS Science. (2004). GeoNet Strong Motion Data. <ftp://ftp.geonet.org.nz/strong/processed> (01.May.2009)

Iervolino, I. and Cornell, A. (2005). Record selection for nonlinear seismic analysis of structures. *Earthquake Spectra* **21**(3), 685-713

INN Chile. (2003). Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales. NCh 2369 Of 2003." Instituto Nacional de Normalización, Santiago, Chile

Otani, S. (1981). Hysteresis models of reinforced concrete for earthquake response analysis. *Journal of Faculty of Engineering, University of Tokyo* **36**(2), 407-441

Oyarzo-Vera, C., Fleming, R., McVerry, G. and Ingham, J. (2009). Seismic zonation and default suite of ground motion records for time-history analysis in New Zealand. *New Zealand Society of Earthquake Engineering Conference, Christchurch, New Zealand, 3-5 April 2009*

Oyarzo-Vera, C. and Chouw, N. (2008). Comparison of record scaling methods proposed by standards currently applied in different countries. *14th World Conference on Earthquake Engineering*, Beijing, China, 12-17 October 2008

PEER Center. (2005). PEER NGA Database. <http://peer.berkeley.edu/nga/index.html> (01.May.2009)

SNZ (2004). NZS 1170.5:2004 - Structural design actions. Earthquake actions. Standards New Zealand, Wellington, New Zealand

Somerville, P. G., Smith, N. F., Graves, R. W. and Abrahamson, N. A. (1997). Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity. *Seismological Research Letters* **68**(1), 199-222

Stirling, M., McVerry, G. and Berryman, K. (2002). A new seismic hazard model for New Zealand. *Bulletin of the Seismological Society of America* **92**(5), 1878-1903