

ALGUNAS CONSIDERACIONES ACERCA DEL
DISEÑO SÍSMICO DE LAS OBRAS CIVILES
EN CHILE

PETER WELKNER M.*

RESUMEN

El proyecto de Norma NCh 433.cR 89 describe una metodología detallada para los fines del Diseño Sísmico de Estructuras y plantea una zonificación sísmica del país para estos efectos.

En el presente trabajo se entregan algunas consideraciones básicas para el Diseño Sísmico de Obras Civiles en general, se describe una metodología destinada a determinar el riesgo sísmico y el coeficiente sísmico de diseño para una obra determinada y se propone un listado preliminar de Coeficientes Sísmicos Regionales.

SUMMARY

The new Chilean Seismic Code, NCh 433.cR 89, describes a detailed method of seismic analysis for structures and proposes a seismic regionalization of the country for these purposes.

This paper presents some basic considerations for the seismic design of Civil Works, describes a general method of analysis to determine the seismic risk and seismic coefficient for a given Project and gives tentative Regional values of this coefficient along the country.

*Ingeniero Civil, U. de Chile, Ingeniero Asociado, E. C. Rowe & Asociados. Profesor de Geofísica, Universidad de Santiago de Chile.

I. INTRODUCCIÓN

El proyecto de Norma NCh 433.cR 89 (I) plantea un método de análisis detallado y riguroso para el diseño Sismorresistente de edificios. Asimismo, introduce por primera vez en Chile el concepto de zonificación sísmica del país.

No obstante lo anterior, los preceptos de dicha norma no son siempre aplicables al diseño de obras civiles en general, tales como Centrales Hidroeléctricas; obras de infraestructura para el transporte terrestre, marítimo y aéreo; obras hidráulicas, y en especial, todo tipo de grandes obras de tierra.

En estos casos, los criterios de diseño sismo-resistente para un Proyecto determinado hacen necesario analizar la sismicidad del área de emplazamiento respectiva y definir un sismo de diseño compatible con el riesgo de falla admisible para el Proyecto.

En general, se suele definir para un área determinada un Sismo Base de Diseño y un Sismo Máximo Posible. En el primer caso, todas las obras constitutivas del Proyecto deben estar diseñadas para resistir las correspondientes sollicitaciones dinámicas sin sufrir daños ni deformaciones apreciables; para el Sismo Máximo Posible se acepta que algunas estructuras —especialmente aquellas que no sean vitales—, puedan sufrir algún tipo de daño, reparable a un costo y dentro de un plazo razonables.

En muchos casos, se define a priori como Sismo Base de Diseño al evento cuyo período de retorno medio sea igual a 100 años. Sin embargo, en general es preferible definir el Sismo Base de Diseño en función de una probabilidad de excedencia razonable (por ejemplo, entre 10 y 20%).

2. ALCANCE DE LOS ESTUDIOS

De acuerdo con la magnitud del Proyecto y el grado de precisión que se desee alcanzar en el diseño sismo-resistente de las obras involucradas, se pueden distinguir los siguientes métodos de caracterización del sismo de diseño:

1° Determinación de un coeficiente sísmico que depende solamente de los parámetros focales del sismo de diseño (Magnitud y distancia hipocentral).

Permite realizar un análisis sísmico simplificado a través del llamado Método Pseudoestático, que consiste en asimilar el efecto dinámico a una fuerza horizontal que actúa en el centro de masas de la estructura.

2° Determinación de un espectro de respuesta que depende de los

parámetros focales del sismo de diseño, de las características del suelo de fundación y del período propio de la estructura en estudio.

Permite realizar un análisis pseudoestático que toma en cuenta la amplificación de las ondas sísmicas en función de las propiedades elásticas del subsuelo y de la roca basal.

El espectro de respuesta permite determinar las aceleraciones, velocidades y desplazamientos de cada estructura en función de sus períodos propios y modos de vibrar.

3° Determinación de un acelerograma sintético que simule la sollicitación dinámica del sismo de diseño.

Permite desarrollar un análisis dinámico en base a modelos matemáticos de las estructuras en estudio.

Para los estudios de prefactibilidad de grandes obras civiles o factibilidad de obras medianas, basta con llevar a cabo un análisis de tipo pseudoestático, utilizando un coeficiente sísmico que dependa solamente de las características del sismo de diseño.

En párrafos posteriores, se entrega un listado preliminar de los coeficientes sísmicos aproximados para las distintas regiones del país y se describe una metodología general para determinar estos valores cuando se estime necesario.

3. SISMICIDAD DE CHILE

3.1. Descripción general

En términos generales, la actividad sísmica a lo largo del territorio nacional está estrechamente asociada a lo que se ha dado en llamar Tectónica Global de Placas. Esta teoría postula la existencia de un número de no más de 10 a 15 grandes placas o casquetes esféricos que cubren íntegramente la superficie de la tierra, a manera de cascarón, y que se mueven horizontalmente con velocidades relativas del orden de algunos centímetros por año. Debido a que las velocidades y direcciones de movimiento son diferentes para cada placa, se producen desplazamientos relativos y tensiones a lo largo de los bordes de contacto, las que generan sismos de variada Magnitud.

En el caso específico de Chile intervienen fundamentalmente la placa de Nazca y la placa Sudamericana. El borde de contacto entre ellas se sitúa a lo largo de la fosa marina de Chile, a una distancia de la costa que varía entre 100 a 200 km. La placa de Nazca tiene un desplazamiento relativo de unos 9 cm/año hacia el este respecto a la placa Sudamericana y representa por lo tanto un movimiento de convergencia entre ambas placas que

trae consigo la subducción de la placa marina por debajo del continente según un plano inclinado, conocido como plano o zona de Benioff. Un porcentaje muy grande de los sismos chilenos ocurre en la zona de Benioff y reciben el nombre de Sismos Subductivos; por la geometría de este plano, los sismos cerca de la fosa son de carácter superficial y se profundizan hacia el este, llegando a tener profundidades de foco de unos 100 a 300 km en la zona cordillerana (2).

La inclinación de la zona de Benioff no es la misma a lo largo de Chile, variando entre unos 10 a 30°. Las zonas de mayor inclinación corresponden al Norte Grande y a Chile Central, coincidiendo en general con la ocurrencia de una depresión intermedia y volcanismo activo en la Cordillera de los Andes. A pesar que estos procesos de subducción y cambios de inclinación se producen a considerable profundidad, el cambio abrupto de manto parece reflejarse en la superficie, produciendo cambios fisiográficos, geológicos y sismotectónicos (3).

Como consecuencia de lo anterior, se observa una mayor proporción de sismos de gran Magnitud hacia el sur de la Región Metropolitana que en el resto del país, aun cuando el número total de temblores tiende a decrecer en general de norte a sur.

La sismicidad del país disminuye notablemente hacia el sur de la península de Taitao, coincidiendo con el borde austral de la placa de Nazca. En la zona del estrecho de Magallanes se aprecia nuevamente un leve aumento de la actividad sísmica, provocada en este caso por la convergencia tangencial entre las placas Antártica y Sudamericana.

Las características de sismicidad no sólo varían de norte a sur sino que también de este a oeste. La historia sísmica del país muestra que los sismos costeros, en general más superficiales, han alcanzado Magnitudes mayores que los generados al interior del continente. La Magnitud máxima de sismos costeros sobrepasa el valor $M_S = 8$ (escala de Richter basada en el análisis de las ondas superficiales), en cambio, los sismos más cercanos a la cordillera sólo alcanzan valores $M_S = 7.5$, excluyendo los sismos generados en territorio argentino y que no han producido efectos mayores en Chile.

El plano de Benioff no es sin embargo la única fuente de sismos a lo largo de la costa oeste de sudamérica. Algunas regiones localizadas hacia el interior del continente se caracterizan por tener sismos con profundidades de foco menores que aquellos situados en la zona de Benioff, los que se conocen con el nombre de sismos corticales. La Magnitud de estos sismos corticales no excede valores del orden de $M_S = 7$ en territorio chileno; un ejemplo típico de sismo cortical lo constituye el terremoto del

4 de septiembre de 1958, con epicentro en el Cajón del Maipo, con una profundidad focal del orden de 10 km (4).

Sin embargo, debido a su menor distancia hipocentral, los sismos corticales pueden ser decisivos para el diseño de obras civiles situadas en áreas cordilleranas.

3.2. Fuentes de información

En Chile, los estudios de sismología están concentrados principalmente en el Departamento de Geología y Geofísica de la Universidad de Chile, División Geofísica, institución que cuenta con un banco de datos sísmicos completo y actualizado del país.

A nivel continental y mundial es posible obtener información sismológica complementaria en el Centro Regional de Sismología de Lima, Perú, y en el United States Geological Survey, Denver, Colorado.

4. METODOLOGÍA GENERAL

Los estudios de sismicidad y riesgo sísmico deben ser encomendados necesariamente a profesionales especializados. No obstante lo anterior, en los párrafos siguientes se describen las etapas básicas que deben contemplar dichos estudios:

1º. Recopilación de antecedentes

Utilizando las fuentes de información indicadas anteriormente, se deberá recopilar los antecedentes de los sismos ocurridos en un radio de 150 km en torno al punto de interés.

El listado de los sismos observados en esa área deberá incluir como mínimo los siguientes parámetros focales: tiempo origen; coordenadas del epicentro; profundidad focal; Magnitud sísmica.

Al mismo tiempo y como marco de referencia, se requiere conocer la historia sísmica del área en estudio. Para estos efectos, se recomienda revisar los antecedentes de sismicidad histórica de Chile recopilados por (5, 6 y 7).

2º. Distribución espacial

Los epicentros de los sismos observados se ubican en un plano a una escala adecuada, ilustrando tanto el rango de Magnitud como de profundidad focal de cada sismo a través de una simbología apropiada. Este plano deberá contener de preferencia la información geológica relevante del

área en estudio, especialmente desde el punto de vista estructural (megafracturas y fallas geológicas regionales).

Adicionalmente, se recomienda representar la ubicación de los focos sísmicos en un plano vertical orientado este-oeste, identificando nuevamente el rango de Magnitud correspondiente a cada evento a través de una simbología apropiada.

3°. Áreas sísmicas

Por simple inspección de las figuras descritas en el punto anterior, es posible identificar los sismos de origen subductivo y separarlos de los eventuales sismos corticales; estas agrupaciones implican la existencia de una o más áreas de generación de temblores que podrían afectar a la obra en estudio.

4°. Distribución en Magnitud

Para cada una de las áreas sísmicas identificadas anteriormente, se estudia la distribución en Magnitud de los sismos observados, agrupando los temblores en rangos discretizados de Magnitud y determinando a través de una regresión lineal los parámetros "a" y "b" de la relación de Gutenberg-Richter (8).

$$\log N = a - b M_s$$

en que N = número de sismos por año, con magnitud mayor o igual que M_s .

5°. Distribución en el tiempo

De la relación anterior es posible deducir el número anual de sismos correspondiente a una Magnitud determinada; el inverso de este valor indica el período de retorno medio θ para dicha Magnitud:

$$\theta = 10^{-(a-b M_s)}$$

6°. Riesgo sísmico

La probabilidad de excedencia de un evento con período de retorno θ en un tiempo T está dada por la relación:

$$PR = 1 - e^{-T/\theta}$$

De esta forma, es posible determinar para cada área de generación de temblores la Magnitud sísmica correspondiente a un período de retorno de 100 años o bien a un riesgo sísmico de 10 a 20%.

7°. Aceleración de diseño y coeficiente sísmico

La aceleración sísmica en cm/seg^2 para el diseño de las obras, se calcula a partir de la Magnitud M_S del Sismo Base de Diseño y de la distancia hipocentral mínima R (km) correspondiente a cada una de las áreas sísmicas identificadas, haciendo uso de la relación de Fresard y Saragoni (9):

$$a_{\text{máx}} = \frac{1.088 \times e^{0,85 M_S}}{(R + 60)^{1,59}}$$

El coeficiente sísmico se obtiene dividiendo el valor anterior por la aceleración de gravedad ($g = \text{cm/seg}^2$):

$$k = a_{\text{máx}}/g$$

8°. Sismo Máximo Posible

En el caso de los sismos de origen subductivo, la Magnitud del Sismo Máximo Posible se suele considerar igual al mayor valor observado históricamente, aumentado en 0,2 unidades.

Para el caso de los sismos corticales, es importante deducir alguna probable correlación espacial entre la ubicación de los focos sísmicos y fallas geológicas conocidas. En caso afirmativo, la Magnitud del Sismo Máximo Posible se puede correlacionar con la longitud máxima probable de la falla geológica L (m), a través de la relación de Slemmons (10):

$$M_S = 1,85 + 1,15 \times \log (L/2)$$

La aceleración y el coeficiente sísmico correspondiente al Sismo Máximo Posible, se determinan en forma totalmente análoga a lo descrito en el punto 7°.

9°. Elección de los parámetros de diseño

Determinados los coeficientes sísmicos correspondientes a cada una de las áreas sísmicas ubicadas en la zona de influencia del Proyecto, se elegirán los mayores valores para el Sismo Base de Diseño y el Sismo Máximo Posible, respectivamente.

Las obras se proyectarán para resistir sin daños apreciables las sollicitaciones derivadas del Sismo Base de Diseño; se comprobará adicionalmente que los daños eventuales provocados por el Sismo Máximo Posible, sean factibles de reparar a un costo razonable y sin interrumpir su operación durante un período demasiado prolongado.

5. COEFICIENTES SÍSMICOS REGIONALES

En la tabla siguiente se presenta un cuadro-resumen de coeficientes sísmicos aproximados, obtenidos a través de un análisis preliminar de la sismicidad correspondiente a cada una de las 13 regiones administrativas del país.

Estos coeficientes representan la sollicitación de un Sismo Base de Diseño con período de retorno de 100 años y tienen solamente el carácter de una guía para estudios preliminares de grandes obras de ingeniería, debiendo llevarse a cabo estudios complementarios cuando la magnitud del Proyecto o la sismicidad de la zona así lo justifiquen:

Región	Coeficientes sísmicos regionales aproximados		
	Sector Costero	Sector Cordillerano	
I	0,21	0,21	
II	0,21	0,21	
III	0,16	0,10	
IV	0,25	0,12	
V	0,39	0,11	
VI	0,14	0,12	
VII	0,38	0,12	
VIII	0,42	0,10	
IX:	Al norte de Temuco	0,28	0,21
	Al sur de Temuco	0,28	0,16
X		0,28	0,12
XI		0,10	0,10
XII:	Al norte de Puerto Natales	0,10	0,10
	Al sur de Puerto Natales	0,18	0,18
Metropolitana:	Al norte de Santiago	0,12	0,12
	Al sur de Santiago	0,16	0,16

Los valores anteriores fueron obtenidos superponiendo el mapa de fuentes sísmicas elaborado por Barrientos (11) a la división administrativa del país, y determinado en cada zona sísmica la distancia media hipocentral a partir del mapa de sismicidad preparado por E. Kausel (12).

REFERENCIAS

1. Proyecto de Norma NCh 433.cR 89 (1989). *Diseño Sísmico de Edificios*. Instituto Nacional de Normalización, Santiago de Chile.
2. BARAZANGI, M. and B.L. ISACKS (1976). *Spatial distribution of earthquakes and subduction of the Nazca plate beneath South America*, *Geology*, Vol. 4, pp. 686-692.
3. JORDAN, T.E., B.L. ISACKS, R.W. ALLMENDINGER, J.A. BREWER, V.A. RAMOS and C.J. ANDO (1983). *Andean and tectonics related to the geometry of the subducted Nazca plate*, *Geol. Soc. Am. Bull.*, Vol. 94, pp. 341-361.
4. WELKNER, P. y R. THIELE (1988). *Evidencias de neotectonismo en la alta cordillera de la Región Metropolitana*, V Congreso Geológico Chileno, Tomo II, pp. F 305 - F 318.
5. MONTESSUS DE BALLORE, F. (1911-1916). *Historia Sísmica de los Andes Meridionales*, Ed. Cervantes, Barcelona-Santiago de Chile (6 Vols.).
6. GREVE, F. (1964). *Historia de la Sismología en Chile*, Departamento de Geofísica, Universidad de Chile, Publicación N° 40.
7. LOMNITZ, C. (1970). *Major Earthquakes and Tsunamis in Chile during the period 1535 to 1955*, *Geol. Rundschau* Band 59, pp. 938-960.
8. GUTENBERG, B., and C.F. RICHTER (1954). *Seismicity of the Earth and Associated Phenomena*, 2nd ed., Princeton University Press, Princeton, N.Y.
9. FRESARD, M. y G.R. SARAGONI (1985). *Análisis de los Acelerogramas de los Sismos de 1981 en la Zona Central de Chile*, Sección Ingeniería Estructural, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Publicación SES 1 3/85 (1981).
10. SLEMMONS, D.B. (1977). *Faults and Earthquake Magnitude*, Report 6, Misc. Paper S - 73-1, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station.
11. BARRIENTOS, S.E. (1980). *Regionalización sísmica de Chile*, Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias con mención en Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Santiago.
12. KAUSEL, E. (1983). *Sismicidad de Chile*, Atlas de la República de Chile, Instituto Geográfico Militar, Santiago.