

PERFIL BIO-SISMICO DE EDIFICIOS

Un instrumento de Calificación Sísmica¹

TOMAS GUENDELMAN B.

Presidente de la Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica

A partir de una muestra estadística de 585 edificios reales construidos en el país, los autores determinan valores y rangos confiables de 13 indicadores sísmicos que se sugiere emplear como referentes para calificar nuevos proyectos. La naturaleza de la muestra, que se observa en la figura N°1, permite evaluar edificios de hasta 40 pisos.

La necesidad de esta investigación es consecuencia de los fenómenos atribuibles a los acelerados cambios tecnológicos de los últimos 30 años, que han tenido un importante efecto en los procedimientos de análisis y diseño de edificios de hormigón armado, observándose un significativo aumento en el uso de software estructural y sísmico en las oficinas de proyectos. Paradójicamente, este indiscutible avance está asociado a una pérdida de comprensión del comportamiento de la estructura resistente, debido a las dificultades de globalizar resultados a partir de deformaciones y tensiones calculadas en numerosas fibras, de numerosas secciones, para cada miembro de la estructura. Si se agrega a lo anterior el hecho que el volumen de información necesario para el empleo de tales procedimientos es significativo, será fácil comprender que existe un amplio margen para errores humanos, de difícil detección e indiscutible gravedad.

¹ Este artículo constituye un extracto del trabajo «Perfil Bio-Sísmico de Edificios», cuyos autores son los Ingenieros Civiles Tomás Guendelman, Mario Guendelman y Jorge Lindenberg. El trabajo se encuentra publicado en las Memorias de las Séptimas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica y 1^{er} Congreso Iberoamericano de Ingeniería Sísmica, 26-29 de Noviembre-1997, La Serena, Chile, Volumen I, páginas 377 a 386.

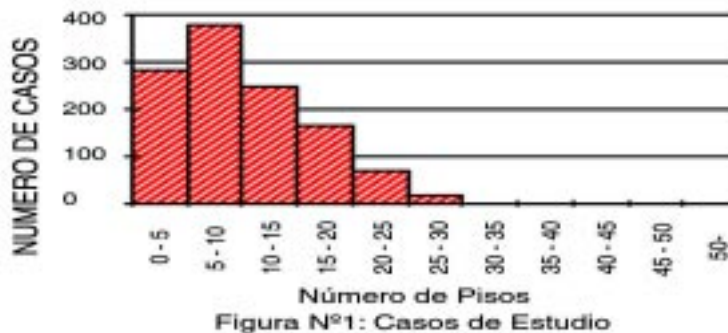
Con ocasión de las Séptimas Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, celebradas en La Serena, en Noviembre de 1997, los Ingenieros señores Tomás Guendelman, Mario Guendelman y Jorge Lindenberg presentaron un trabajo denominado "Perfil Bio-Sísmico de Edificios", en el que se establece una metodología de calificación sísmica de edificios de hormigón armado, relevante de su "estado de salud". Sus recomendaciones derivan del reconocimiento nacional e internacional del satisfactorio comportamiento que tuvieron los edificios chilenos durante el pasado sismo del 3 de Marzo de 1985.

En términos prácticos, se observa con temor cómo la experiencia acumulada pierde terreno frente a la destreza computacional. Michael Pregnoff, en entrevista concedida en 1996 a Stanley Scott, para la serie "Connections: The EERI Oral History Series", señala que "... un ingeniero joven, sin experiencia, normalmente cree que mientras más complejo sea el modelo teórico que utilice, los resultados estarán más próximos a la verdad".

Tradicionalmente, el diseño sísmico de edificios es la consecuencia de un proceso interactivo que se inicia con un prediseño, continúa con un análisis normativo y concluye con la verificación del prediseño inicial. Sin embargo, es necesario tener presente

que la responsabilidad del ingeniero estructural no está acotada al sólo cumplimiento de las disposiciones normativas, lo que hace necesario revisar el efecto de otros factores que pudieran ser críticos en el diseño.

Sólo a modo de ejemplo, no pueden quedar ausentes de consideraciones especiales aspectos tales como: detección de mecanismos potenciales de falla (Vulnerabilidad Sísmica); evaluación de las debilidades de la estructuración del edificio (Peligrosidad Estructural); situaciones de exposición sísmica de la estructura durante el proceso de construcción; grado de acoplamiento entre las direcciones de análisis; redundancia y requerimientos de ductilidad; direcciones sísmicas alternativas; etc. El estu-



dio formal de cualesquiera de estos factores pudiera requerir el empleo de modelos teóricos sofisticados, que incorporen capacidades no lineales y que exijan la realización de análisis de respuesta con registros de aceleraciones. Sin embargo, es posible que en muchos casos sea factible calificar, y no sólo cuantificar, los resultados de un análisis, mediante el empleo de la experiencia acumulada y el buen criterio.

El análisis del Perfil Bio-Sísmico puede conducir, en forma simple, a detectar deficiencias de la estructura resistente, originando eventuales correcciones, o bien, recomendando estudios complementarios de mayor rigor analítico, pero limitando tales casos a aquellas situaciones que realmente los requieran. La elección de indicadores y los rangos considerados satisfactorios, podrán modificarse conforme a la experiencia del ingeniero estructural que realiza el análisis y diseño de un edificio, lo que no altera el concepto que se pretende introducir con este trabajo. Se podrá observar que algunos indicadores están relacionados entre sí, sin embargo no se han eliminado, debido a que detectan, con diferente sensibilidad, diversos problemas de estructuración.

INDICADORES DEL PERFIL BIO-SISMICO DE EDIFICIOS

1.- Indicadores de Rigidez

Cuociente Altura Total/Periodo

primer modo Traslacional:

Este índice, con dimensiones de velocidad, ha sido considerado como un mejor estimador de la rigidez del edificio que otros

provenientes de proposiciones de uso frecuente. La figura N°2 ilustra la dependencia que se observa en la práctica chilena, entre la altura total H del edificio y el periodo del primer modo traslacional T, observándose una fuerte concentración de los valores en torno a una recta que pasa por el origen, de pendiente comprendida entre 50 y 60 m/seg. En términos generales, es posible señalar que valores de H/T entre 20 y 40 m/seg identifican los edificios flexibles; entre 40 y 70, los de rigidez normal; y sobre 70, hasta un máximo de 150, a los rígidos. Valores inferiores a 20 m/seg indican que la estructura es muy flexible y que, probablemente, presentará problemas de cumplimiento de las disposiciones de desplazamiento que fijan las normas de análisis y diseño sísmico. En el otro extremo, se considera que valores superiores a 150 m/seg corresponden a estructuras con excesiva rigidez lateral.

Efecto P-Δ:

Se propone medir este efecto a través del cociente entre el momento flector basal ($M_{p,\Delta}$) generado por los productos acumulados de los pesos de cada piso por sus respectivos desplazamientos laterales, y el momento volcante basal (M_b) debido a la acción sísmica. Se estima que los valores para los que este efecto puede ser ignorado están comprendidos entre 0.00 y 0.05, rango ampliamente satisfecho por los edificios de la muestra.

Desplazamiento del nivel superior:

Este parámetro no está explícitamente restringido por la normativa sísmica vigente, sino indirectamente, en el párrafo 5.9,

a través del control sobre los máximos desplazamientos relativos. La evaluación de este indicador, para la muestra estadística de este estudio, señala que, para edificios flexibles, sus valores se sitúan entre 1 y 2 por mil de la altura total H del edificio, y que para rigideces normales, (H/T del orden de 50 m/seg), se concentran en torno a 0.5 por mil, lo que se conjuga adecuadamente con el criterio de calificación de rigideces señalado anteriormente, haciendo recomendable que, para evitar rigideces excesivas, este parámetro no esté por debajo de 0.2 por mil.

Máximos desplazamientos de entrepisos:

La limitación de desplazamientos de entrepiso constituye uno de los aspectos más importantes de la norma chilena NCh433.Of96, expresadas en el párrafo 5.9. El subpárrafo 5.9.2 limita los desplazamientos entre centros de gravedad a 2 por mil de la altura de entrepiso y el subpárrafo 5.9.3 limita el desplazamiento incremental, de cualquier punto en la planta del edificio con respecto al de los centros de masa, a 1 por mil de dicha altura. El análisis de los resultados para la muestra de este estudio permite sugerir, en forma similar a lo señalado para el desplazamiento del nivel superior, que para evitar excesiva rigidez, los desplazamientos de entrepiso, medidos en los centros de gravedad, no tengan valores inferiores a 0.2 por mil. Los desplazamientos adicionales en cualquier punto de la planta no están sujetos a esta restricción, debido a que dependen de los giros de las plantas en torno a un eje vertical, valores que, deseablemente, deben ser bajos.

2.- Indicadores de Acoplamiento

Existe consenso en recomendar un razonable alejamiento entre los períodos vibratorios con predominio traslacional, en dos direcciones perpendiculares, y rotacional con respecto a un eje vertical. Numerosas investigaciones han demostrado que este fenómeno, muchas veces denominado sintonía modal, puede provocar fuertes amplificaciones dinámicas de la respuesta, comparadas con los efectos que originaría un análisis de tipo estático. Una de las formas de controlarlo con-

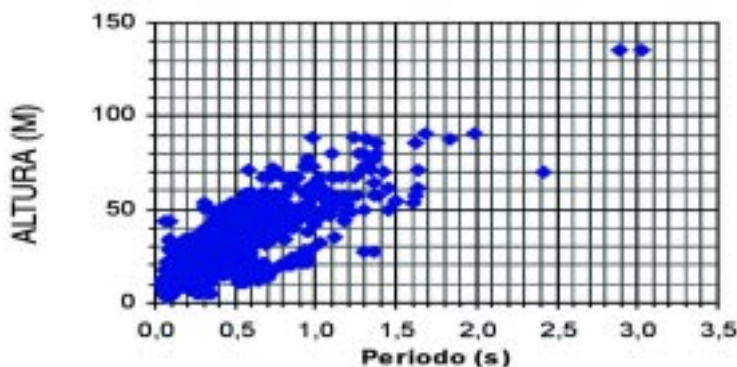


Figura N°2: Periodo Fundamental

siste en lograr estructuraciones que separen los modos fundamentales de manera tal que el cociente entre períodos fundamentales se aleje de la unidad, en alrededor de un 20%.

La sola consignación del cociente de períodos es insuficiente para calificar el grado de acoplamiento que presenta un edificio, debiendo registrarse también los efectos que tal sintonía provoca. Desde el punto de vista del acoplamiento rotacional, se mide la relación entre la masa equivalente rotacional acoplada y la excentricidad dinámica (momento torsor basal dividido por el esfuerzo de corte basal). La primera de estas variables se expresa como una fracción de la masa equivalente traslacional directa y la segunda como una fracción del radio de giro de la planta. Del mismo modo, para evaluar los efectos del acoplamiento traslacional, se registra la estadística del cociente de masas equivalentes traslacionales, acoplada y directa. Además, los efectos debidos al acoplamiento traslacional, también se presentan a través de las relaciones de esfuerzos de corte acoplados y directos y de los momentos volcantes acoplados y directos.

3.- Indicadores de Redundancia Estructural y Demanda de Ductilidad

Número de elementos relevantes en la resistencia sísmica:

Este Indicador se utiliza para medir la Redundancia Estructural, parámetro que permite calificar la capacidad de redistribución de esfuerzos de la estructura, particularmente importante en la medida que la sollicitación la lleva a incursionar en el rango no lineal. Tal situación puede producirse en el momento en que algunos miembros alcanzan sus límites elásticos y otros comienzan a tomar parte de la sollicitación, o aumentan su compromiso en la distribución global de esfuerzos. Las ventajas de la redundancia para proporcionar reservas de resistencia, principalmente en el caso sísmico, son reconocidas en toda la literatura y códigos sísmicos, principalmente las Normas ANSI de cargas y el informe ATC 3, que ha inspirado la filosofía de las principales normas sísmicas modernas. Recientemente, el informe ATC 19 ha recogido sendas proposiciones de Bertero y de Whittaker para incorporar el concepto de

PERFIL BIO-SISMICO : EDIFICIO 17 PISOS



INDICADORES SISMICOS SISMO X SISMO Y CALIFICACION DE VALORES

RIGIDEZ

1.-Altura Total / Período Traslacional (m/seg)	42,974	121,633	
2.-Efecto P-1 ($M_{p,0} / M_b$)	0,011	0,002	
3.-Desplazamiento total nivel superior (1000/h)	0,493	0,179	
4.-Mín. desplaz. de entrapje en centros de gravedad (1000/h)	0,763	0,237	
5.-Mín. desplaz. de entrapje en puntos extremos (1000/h)	0,647	0,344	

ACOPLAMIENTO TRASLACION - ROTACION Y TRASLACION - TRASLACION

6.-Período Rotacional / Período Traslacional	0,836	1,366	
7.-Masa Eq. Rotac. Acoplada / Masa Eq. Traslac. Directa	0,897	0,564	
8.-Excentricidad Dinámica (M/Q) / Radio de Giro Basal	0,263	0,798	
9.-Masa Eq. Trasl. Acoplada / Masa Eq. Trasl. Directa	0,879	0,028	
10.-Corte Basal Acoplado / Corte Basal Directo	0,133	0,108	
11.-Mto. Volcante Basal Acoplado / Mto. Volcante Basal Directo	0,107	0,039	

REDUNDANCIA ESTRUCTURAL Y DEMANDA DE DUCTILIDAD

12.-Nº de elementos relevantes en la resistencia sísmica	5	4	
13.-Factor de Reducción Espectral Efectiva (R^{**})	2,505	3,126	

Factor de Redundancia, que debería emplearse para reducir el Factor de Modificación de Respuesta, penalizando a las estructuras con menos de 4 líneas resistentes verticales.

Factor de Reducción Espectral Efectivo (R):**

La resistencia a la acción sísmica que se suministra a una estructura puede hacer que ésta se aleje de un comportamiento elástico, lo que sólo puede analizarse mediante un procedimiento de respuesta en el tiempo aplicado a un modelo no-lineal. La dificultad analítica que impone un análisis de esta naturaleza ha originado el desarrollo, de aceptación mundial, del concepto de Factor de Modificación de Respuesta, "R", que se asocia a la determinación de un factor de reducción de la acción sísmica, con el objeto de generar un sismo de diseño, susceptible de analizar mediante el empleo de un modelo lineal. ATC 19 recomienda que R sea igual al producto de tres componentes: R_m (Factor de Ductili-

dad), R_s (Factor de Resistencia) y R_r (Factor de Redundancia).

Los valores de diseño que establece la norma chilena, se deben obtener de un análisis sísmico dinámico, con un espectro elástico reducido por el factor R^* , función del Factor de Modificación de Respuesta y del período de mayor masa traslacional equivalente, en la dirección de análisis. Estos resultados deben posteriormente modificarse, amplificándolos si el corte basal resultara inferior al corte basal mínimo, o reduciéndolos, si fuese superior al corte basal máximo, lo que permite definir un Factor de Reducción Espectral Efectivo R^{**} .

Los valores estadísticos de este indicador muestran que, en general, R^{**} está por debajo de 7, con una alta concentración en torno a 4. Se sugiere que, para valores de R^{**} comprendidos entre 3 y 7, se complemente el análisis de norma con procedimientos no lineales aproximados tipo "push-over" y que para valores superiores a 7, sea imprescindible utilizar técnicas más refinadas.

APLICACION DEL MODELO

Previo a la publicación de este trabajo, los autores efectuaron una marcha blanca del procedimiento en aproximadamente 500 edificios, lo que permitió calibrar valores y rangos normales de los indicadores sísmicos, en conformidad con la práctica chilena. Posteriormente a la publicación, el procedimiento ha sido empleado permanentemente, con útiles resultados.

Con el fin de ilustrar la forma de aplicación del procedimiento, se presenta la planilla de la figura adjunta (en página anterior), que ilustra el caso de un edificio de 17 pisos. En ella se consignan los valores numéricos de los 13 indicadores sísmicos, para acciones independientes en dos direcciones (denominadas x e y), y en forma gráfica, sobre una matriz preimpresa de rangos aceptables. Este edificio cumple con las disposiciones normativas, pero exhibe un inconveniente nivel de acoplamiento entre la torsión y la traslación según "y", cuya corrección es factible si la detección es oportuna. **BIT**



PROCESO DE PLANIFICACIÓN DE COSTOS									
Item	Descripción	Unidad	Cantidad	Valor Unitario	Valor Total	Porcentaje	Clase	Subclase	Observaciones
1000	CONCRETO	m ³	100	1.200	120.000	10%	100	100	
2000	ACERO	kg	5000	2.000	10.000.000	90%	200	200	
3000	ALBAÑILERÍA	m ²	1000	1.000	1.000.000	1%	300	300	
4000	PAVIMENTACIÓN	m ²	1000	1.000	1.000.000	1%	400	400	
5000	MANO DE OBRA	h	10000	1.000	10.000.000	1%	500	500	
6000	ENERGÍA	kWh	10000	1.000	10.000.000	1%	600	600	
7000	AGUA	m ³	10000	1.000	10.000.000	1%	700	700	
8000	TRANSPORTE	km	10000	1.000	10.000.000	1%	800	800	
9000	OTROS	h	10000	1.000	10.000.000	1%	900	900	
10000	TOTAL				1.200.000.000	100%			

Software standard Windows 95/98/NT 4.0 Conectado con AutoCAD y ArchiCAD

- Cubicación sobre archivos CAD
- Planificación integrada de costos y tiempos
- Gestiona compras, bodega y control financiero
- Poderoso generador de informes personalizable
- Control por naturaleza de insumos
- Seguimiento por días y por meses
- Desviaciones presupuestarias por centros de costo
- Preparado para el año 2000

Más de cien documentos impresos predefinidos

Cubique, presupueste y controle costos con



Bandera 566 Of. 72 www.aminfo.cl
(56-2) 697 2683 · 697 2785 Fax 696 1617 comercial@bd.aminfo.cl

Marque el 23 en su tarjeta de consulta