

PERFIL BÍO-SÍSMICO DE EDIFICIOS

Tomás Guendelman B.¹, Mario Guendelman B.¹, Jorge Lindenberg B.¹

1 I.E.C. INGENIERÍA S.A.
Santiago, Chile

RESUMEN

Se presenta una metodología de calificación sísmica de edificios de hormigón armado a través de la evaluación de **Indicadores** que se comparan con valores considerados satisfactorios, conformando así una suerte de "**Perfil Bio-Sísmico**", relevante a la "**salud**" del edificio. El cálculo de los indicadores sísmicos se realiza a partir de los resultados que provienen del análisis sísmico normativo. El principal objetivo de este estudio se centra en dar apoyo profesional a las oficinas de proyectos en la detección de las bondades y defectos de la estructura del edificio.

SUMMARY

A methodology whereby reinforced concrete buildings are seismically qualified through the evaluation of **Indicators** that are compared with values considered satisfactory, is presented, providing in this way a sort of "**Bio-Seismic Profile**", relevant to the "**health**" of the building. The computation of the seismic indicators is performed using the results from the seismic analysis. The main objective of this study is to provide professional support for engineering firms in the detection of defects and favorable aspects of the building's structure.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA DE MODELOS Y MÉTODOS DE ANÁLISIS SÍSMICO

Producto de los permanentes avances tecnológicos y de la adecuada instrumentación en sitios en que han ocurrido sismos importantes, se ha podido realizar numerosos estudios, cuyos resultados y conclusiones han sido integrados a la normativa internacional. En el caso chileno, el terremoto del 3 de Marzo de 1985 constituyó una experiencia que se encuentra de manifiesto en la norma sísmica NCh433.Of96 (Ref. 1).

Los procedimientos de análisis y diseño de edificios de hormigón armado no escapan a esta tendencia, observándose un significativo aumento en el uso de software estructural y sísmico en las oficinas de proyectos. Paradojalmente, este indiscutible avance está asociado a una pérdida importante 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.

Resulta interesante observar la evolución histórica de las estimaciones de las solicitaciones sísmicas y de los métodos de análisis correspondientes para comprobar que, en la medida que los procedimientos analíticos aumentan en rigor, la comprensión de los resultados se hace cada vez menos transparente.

El primer modelo que se empleó para el análisis sísmico manual de edificios consistió en una simple varilla, empotrada en su base, solicitada por un conjunto de fuerzas laterales estáticas. Estas fuerzas, calculadas como el producto de la masa de cada piso por la correspondiente aceleración lateral a ese nivel, sufrió variaciones que iban desde el supuesto de una ley de aceleraciones uniformes en altura, pasando luego a una triangular invertida, y finalmente a diversas expresiones de mejor aproximación al modo fundamental de la estructura. Esta representación fue motivo de numerosas investigaciones tendientes a calibrar sus resultados, primero, y a encontrar procedimientos correctos de distribución de los esfuerzos globales entre los diferentes elementos resistentes verticales, después. Estas crudas hipótesis iniciales de distribución en función de las rigideces basales o de las de entrepiso de los elementos resistentes, con la consecuente violación de las condiciones de compatibilidad cinemática simultánea en todos los niveles, estimularon la investigación del problema de interacción entre marcos y muros y el desarrollo de los modelos continuos, encontrándose grandes aportes, en ambas líneas, en la literatura técnica internacional.

Hacia fines de los años 60, con la entronización definitiva de la computación digital, se inicia la aplicación del método dinámico de superposición modal, el empleo de los espectros de pseudo-aceleración y las diferentes técnicas de cálculo de respuesta en el tiempo, asociada a registros de terremotos reales y artificiales. Se desarrolla el modelo pseudo tridimensional, con compatibilidad cinemática de desplazamientos laterales en todos los pisos; se admite que los elementos resistentes verticales sólo tengan capacidades en sus propios planos y que el efecto de monolitismo estructural se pueda concebir a través de áreas tributarias, en forma de alas colaborantes.

El cambio tecnológico de mediados de los 70 origina una amplia disponibilidad de memoria directa y discos de gran capacidad de almacenamiento lo que, entre otras cosas, influye notablemente en el desarrollo de herramientas tridimensionales formales, con nudos de 6 grados de libertad, elementos finitos incorporados directamente en los modelos y capacidades de análisis no lineal. La globalización de resultados empieza a perder nitidez, en la misma medida en que el modelo teórico se va refinando. En términos prácticos, se observa con temor como la experiencia acumulada pierde terreno frente a la destreza computacional. Michael Pregnoff, en entrevista concedida recientemente a EERI (Ref. 2), 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 importante tener presente que la responsabilidad

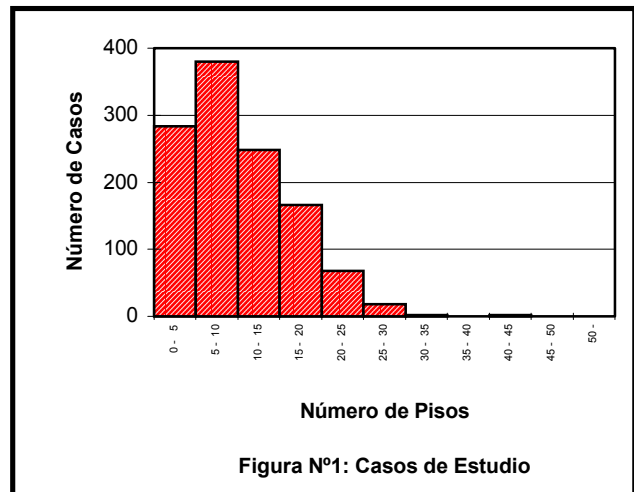
del ingeniero estructural no está acotada al sólo cumplimiento de las disposiciones normativas, lo que hace necesario revisar el efecto de otros factores que pudieran ser críticos en el diseño.

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 estudio 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 presente trabajo muestra una metodología de calificación sísmica de edificios de hormigón armado a través de la evaluación de un conjunto de **Indicadores Sísmicos**, cuyos valores se comparan con aquellos considerados satisfactorios, conformando así una suerte de "**Perfil Bio-Sísmico**", relevante a la "**salud**" del edificio. El cálculo de los indicadores sísmicos se realiza a partir de los resultados que provienen del análisis sísmico normativo.

La elección de los indicadores sísmicos y la calificación de sus valores, conforme a rangos, constituye una apreciación subjetiva de los autores, que se apoya en resultados extraídos del análisis, en dos direcciones, de 585 edificios reales construidos en el país, que generan 1170 casos de estudio.

La Fig. 1 identifica el número de pisos de los edificios de la muestra, desprendiéndose de ello que la validez de las proposiciones del presente trabajo, calibradas para edificios de menos de 40 pisos, deberán revisarse si se desea emplearlas en edificios de mayor altura.



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, mediante los métodos sofisticados que estuvieran disponibles, 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.

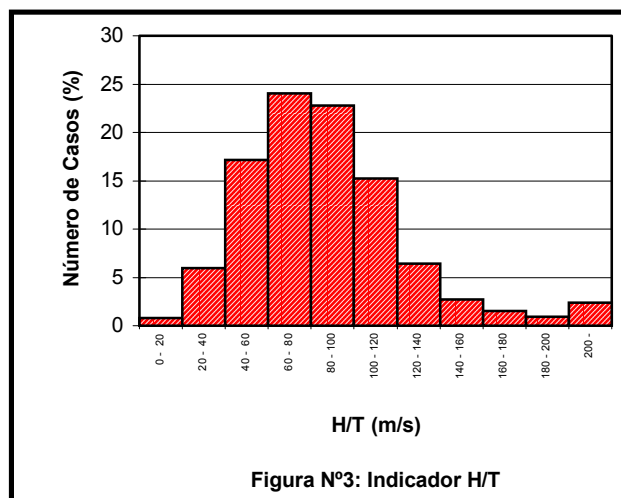
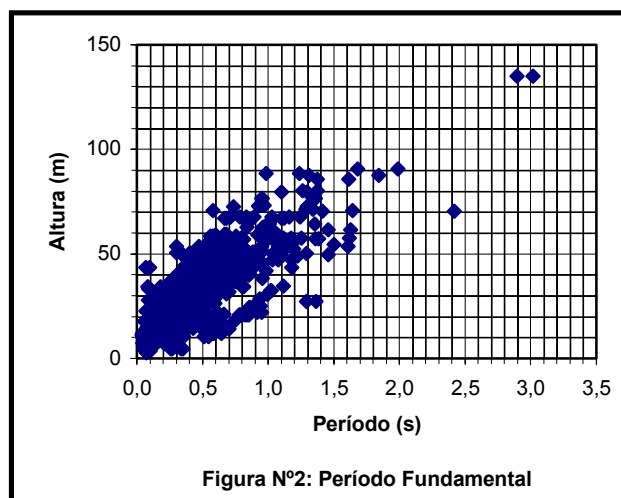
INDICADORES DEL PERFIL BÍO-SÍSMICO DE EDIFICIOS

1.- Indicadores de Rigidez

- **Cuociente Altura Total/Período 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 empíricas de uso frecuente.

La Fig. 2 ilustra la dependencia que se observa en la práctica chilena, entre la altura total H del edificio y el período 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 sugieren que la estructura es extremadamente 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.

La Fig. 3 muestra la distribución estadística del indicador H/T .



- **Efecto P- Δ :** Se propone medir este efecto a través del cuociente 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, como se aprecia en la Fig. 4. Sin embargo, en edificios flexibles, pudiera experimentarse situaciones diferentes, lo que hace recomendable consignar el valor de este indicador.

El efecto P- Δ , de naturaleza no lineal, puede linearizarse si el indicador toma valores menores o iguales a 0.10. En tal caso, se puede incorporar el efecto P- Δ , por simple adición de los momentos volcantes debido a P- Δ en los momentos volcantes sísmicos, en cada piso. Para valores superiores a 0.10, se recomienda una consideración más rigurosa del problema, atendiendo al mayor riesgo de inestabilidad elástica del edificio. La práctica habitual considera, alternativamente, tomar en cuenta este efecto a través de un control de desplazamientos relativos de entrepiso. SEAOC (Ref. 3), en forma específica, recomienda no tomar en cuenta el problema si el desplazamiento relativo en cualquier piso es inferior a 0.02h/Rw. Ambos criterios son adecuados y podría optarse por uno u otro en forma indistinta.

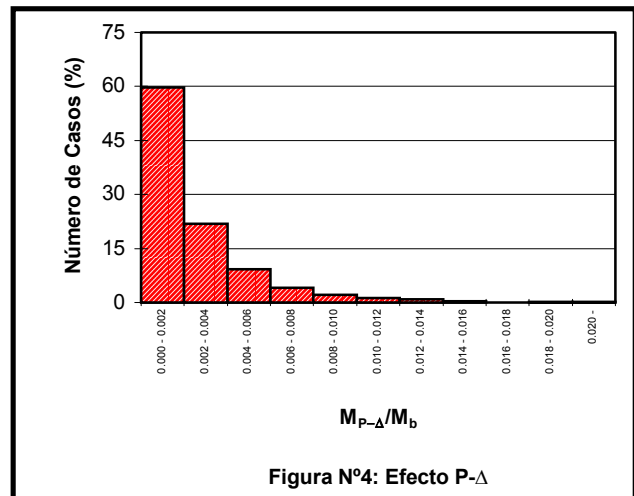


Figura N°4: Efecto P- Δ

- **Desplazamiento del nivel superior:** Este parámetro no está explícitamente restringido por la normativa sísmica vigente, sino indirectamente, en el párrafo 5.9 (Ref. 1), a través del control sobre los máximos desplazamientos relativos.

La Fig. 5 consigna los valores del desplazamiento del nivel superior del edificio en función del parámetro H/T, pudiendo observarse 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. Esto se conjuga adecuadamente con el criterio de calificación de rigideces señalado anteriormente, haciendo recomendable sugerir que, para evitar rigideces excesivas, este parámetro no esté por debajo de 0.2 por mil.

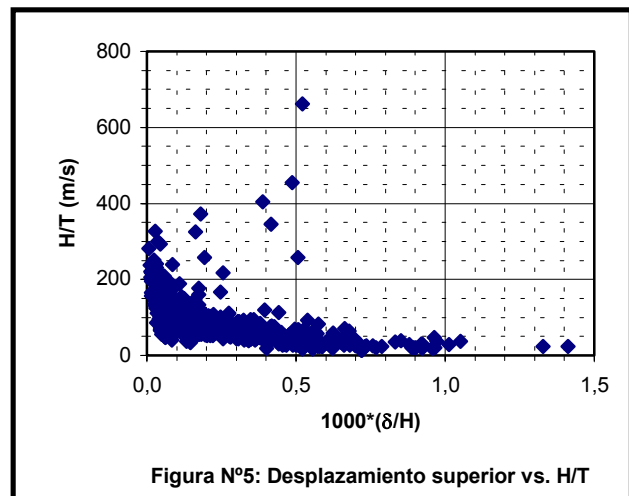
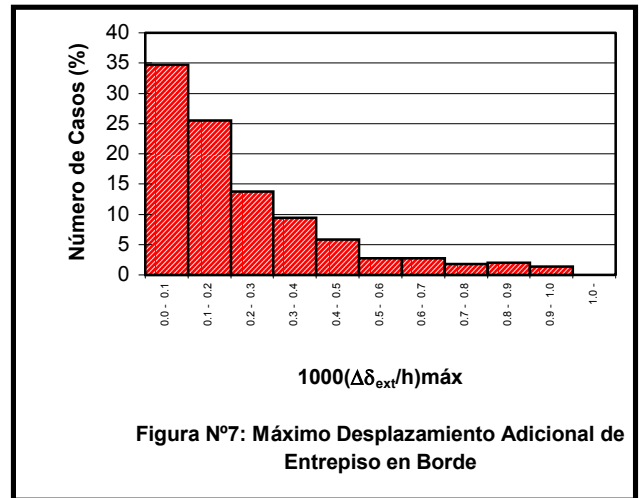
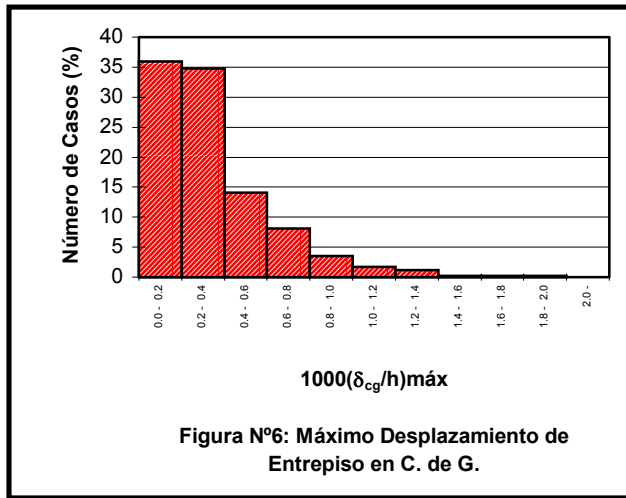


Figura N°5: Desplazamiento superior vs. H/T

- **Máximos desplazamientos de entrepisos:** La limitación de desplazamientos de entrepiso constituye uno de los aspectos más relevantes de la norma chilena NCh433.Of96 (Ref. 1), 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.

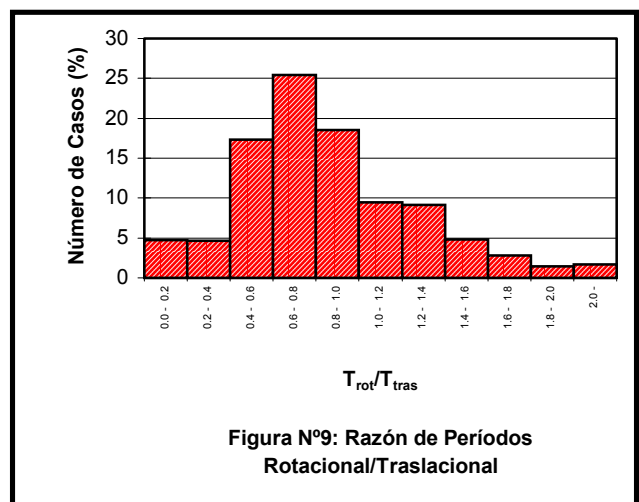
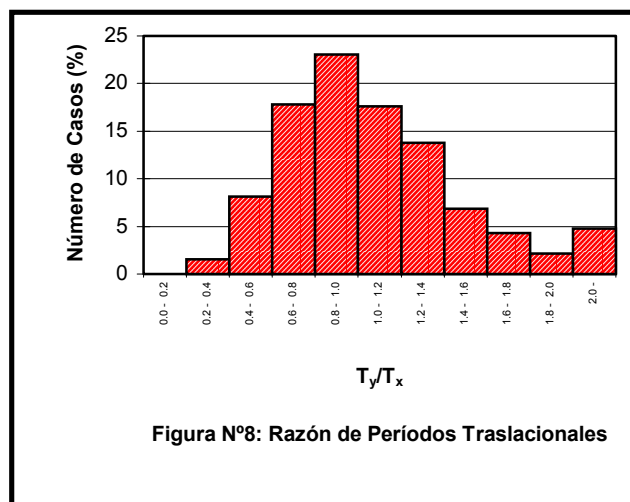
Las Figs. 6 y 7 exhiben los máximos valores en altura que se miden en los edificios de la muestra de este estudio, tanto para los desplazamientos relativos en centros de gravedad como en puntos extremos de las plantas. El análisis de estos resultados permite sugerir, en forma similar a lo señalado para el desplazamiento del nivel superior, que 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 **intonía 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 consiste 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%.

Los valores que alcanzan diversos parámetros asociados al acoplamiento estructural, que se obtienen del análisis dinámico normativo de los edificios empleados en este trabajo, se ilustran en las figuras 8 a 13, siguientes. La Fig. 8 muestra la distribución estadística de los cocientes entre períodos preponderantemente traslacionales, y la Fig. 9 hace lo propio entre los períodos predominantemente rotacional y traslacional.



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 ha considerado relevante medir la relación entre la masa equivalente rotacional acoplada y la excentricidad dinámica (momento torsor basal dividido por el esfuerzo de corte basal), lo que se muestra en la Fig. 10. 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.

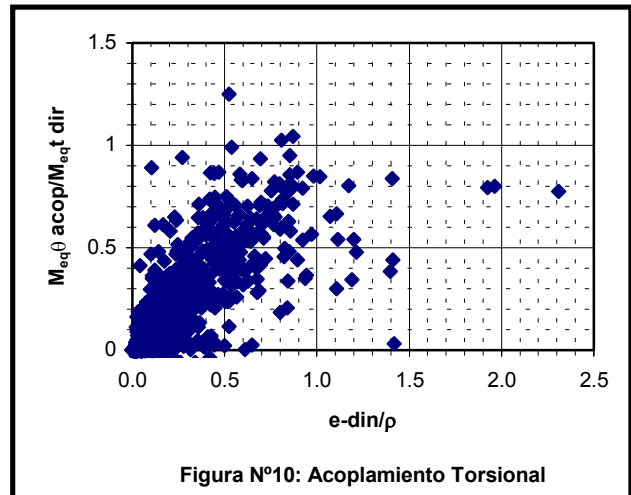


Figura N°10: Acoplamiento Torsional

Del mismo modo, para evaluar los efectos del acoplamiento traslacional, se registra la estadística del cociente de masas equivalentes traslacionales, acoplada y directa, según se observa en la Fig. 11. Además, los efectos derivados del acoplamiento traslacional también se presentan a través de las relaciones de esfuerzos de corte acoplados y directos, Fig. 12, y de los momentos volcantes acoplados y directos, Fig. 13.

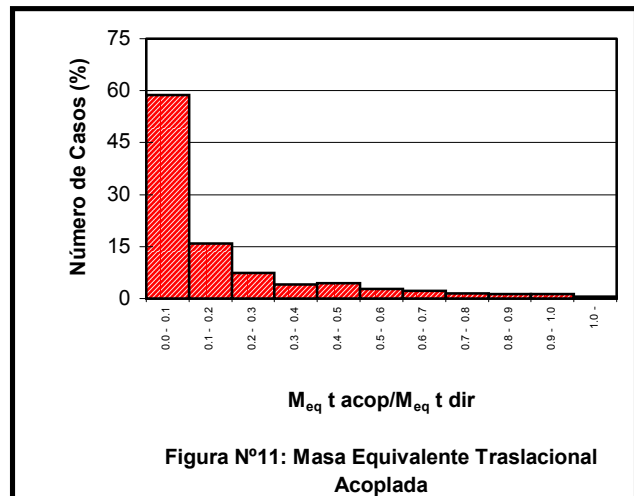


Figura N°11: Masa Equivalente Traslacional Acoplada

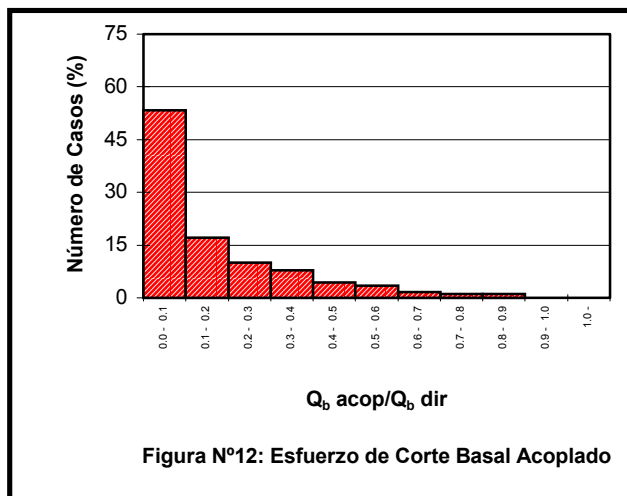


Figura N°12: Esfuerzo de Corte Basal Acoplado

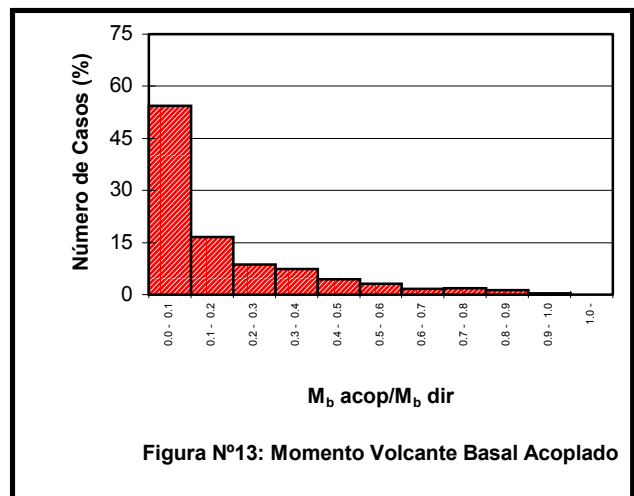


Figura N°13: Momento Volcante Basal Acoplado

Todos los parámetros descritos anteriormente se incorporan a la lista de indicadores que se propone en este trabajo, con la sola excepción del cociente entre períodos traslacionales, cuyo efecto se puede apreciar mejor en los cocientes de esfuerzos basales.

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 (Ref. 4), que ha inspirado la filosofía de las principales normas sísmicas modernas. Recientemente, el informe ATC 19 (Ref. 5) ha recogido sendas proposiciones de Bertero y de Whittaker para incorporar el concepto de **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.

Sin lugar a dudas, el concepto de redundancia estructural es legítimo, pero por ahora sólo tiene valor cualitativo. En el presente trabajo se propone que el número de elementos relevantes en la resistencia sísmica constituya el indicador sísmico asociado a la redundancia estructural.

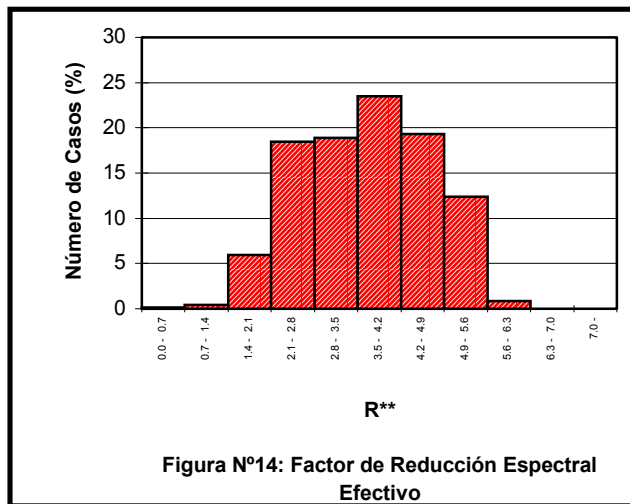
- **Factor de Reducción Espectral Efectivo (R^{**}):** La resistencia a la acción sísmica que se suministra a una estructura puede hacer que ésta se aleje de un comportamiento elástico, lo que sólo puede analizarse mediante un procedimiento de respuesta en el tiempo aplicado a un modelo no-lineal. La 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 (Ref. 5) sugiere que **R** sea igual al producto de tres componentes: R_{μ} (Factor de Ductilidad), 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. Posteriormente, si para el diseño se emplea el método de factores de carga y resistencia, la acción sísmica se debe amplificar por 1.4, lo que permite definir un **Factor de Reducción Espectral Efectivo R^{**}** , dado por la expresión:

$$R^{**} = \frac{R^*}{1.4f_{\min}f_{\max}}$$

en que:

R^* : factor de reducción de la aceleración espectral
 f_{\min} : factor de amplificación por corte mínimo
 f_{\max} : factor de reducción por corte máximo



Los valores estadísticos de este indicador se consignan en la Fig. 14, de la que se desprenden los rangos de valores que se proponen en el Perfil Bio-Sísmico. Como se puede observar, los valores máximos de R^{**} están 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” (Ref. 6, Ref. 7) y que para valores superiores a 7, sea imprescindible utilizar técnicas más refinadas.

CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo se resumen en la planilla denominada **Perfil Bio-Sísmico**, en la que se consignan los diferentes indicadores que se propone medir en el análisis sísmico normativo de un edificio, y los rangos que califican las bondades o defectos de su estructuración. Para facilitar la comprensión de esta planilla, se ilustra una aplicación para un edificio de 17 pisos.


AGRADECIMIENTOS

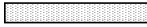
Los autores agradecen la valiosa colaboración de los ingenieros que participaron en el análisis y diseño de los edificios constituyentes de la muestra empleada en este estudio.


REFERENCIAS

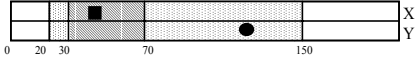
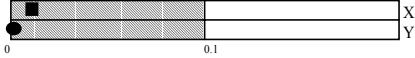
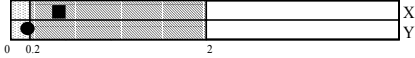
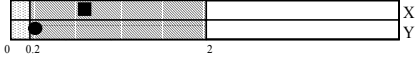

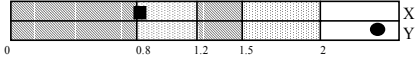
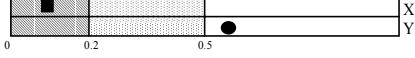
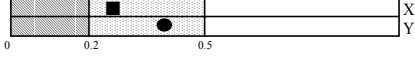
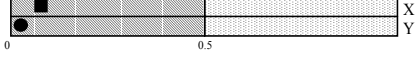
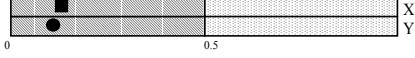
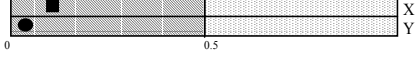

1. Instituto Nacional de Normalización, “Diseño Sísmico de Edificios”, Norma NCh433.Of96, (1996).
2. Pregnoff, Michael V., Rinne, John E., Scott, Stanley (Interviewer), “Connections: The EERI Oral History Series”, (1996).
3. Structural Engineers Association of California, “Recommended Lateral Force Requirements”, (1990).
4. Applied Technology Council, “ATC 3-06, Tentative Provisions for the Development of Seismic Regulations for Buildings”, (1978).
5. Applied Technology Council, “ATC 19, Structural Response Modification Factors”, (1995).
6. Bartolomé, P., Guendelman, T., Moroni, M.O., “Proposiciones Relativas al Análisis Sísmico No Lineal de Edificios Altos de Hormigón Armado Estructurados con Marcos Rígidos”, XXII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, (1983)
7. Structural Engineers Association of California, “Performance Based Seismic Engineering of Buildings - VISION2000”, (1995).

PERFIL BIO-SISMICO : EDIFICIO 17 PISOS


Valores dentro de rangos normales


Valores aceptables ligeramente
apartados de rangos normales


Valores fuera de rango

INDICADORES SISMICOS	SISMO X	SISMO Y	CALIFICACION DE VALORES
<u>RIGIDEZ</u>			
1.-Altura Total / Período Traslacional (m/seg)	42,974	121,633	
2.-Efecto P-Δ ($M_{P-\Delta} / M_b$)	0,011	0,002	
3.-Desplazamiento total nivel superior ($1000\delta/H$)	0,493	0,179	
4.-Máx. desplaz. de entrepiso en centros de gravedad ($1000\delta_{cg}/h$)	0,763	0,257	
5.-Máx. desplaz. de entrepiso en puntos extremos ($1000\delta_{ext}/h$)	0,647	0,844	
<u>ACOPLAMIENTO TRASLACION - ROTACION Y TRASLACION - TRASLACION</u>			
6.-Período Rotacional / Período Traslacional	0,836	2,366	
7.-Masa Eq. Rotac. Acoplada / Masa Eq. Traslac. Directa	0,097	0,564	
8.-Excentricidad Dinámica (M_t/Q_b) / Radio de Giro Basal	0,263	0,399	
9.-Masa Eq. Trasl. Acoplada / Masa Eq. Trasl. Directa	0,079	0,029	
10.-Corte Basal Acoplado / Corte Basal Directo	0,133	0,109	
11.-Mto. Volcante Basal Acoplado / Mto. Volcante Basal Directo	0,107	0,039	
<u>REDUNDANCIA ESTRUCTURAL Y DEMANDA DE DUCTILIDAD</u>			
12.-Nº de elementos relevantes en la resistencia sísmica	5	4	
13.-Factor de Reducción Espectral Efectivo (R^{**})	2,505	3,126	