

CAPITULO 3

CRITERIOS DE ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE HOSPITALES

3. CRITERIOS DE ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE HOSPITALES

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describen los criterios utilizados para evaluar la vulnerabilidad de los hospitales, tanto para sus componentes estructurales como no estructurales.

En la parte relacionada con las componentes estructurales, se detallan los criterios y métodos para la evaluación preliminar de la vulnerabilidad sísmica de la estructura, destacando los aspectos más importantes de los índices seleccionados (Hirosawa, Shiga y Meli), y de las variaciones de las características del edificio en altura, como son: la variación del área de la planta entre pisos consecutivos, variación de la resistencia entre pisos consecutivos, variación de la rigidez de entrepiso, excentricidad del piso y variación del peso entre pisos consecutivos. Además, se establecen los valores para calificar la estructura tanto desde el punto de vista de su seguridad como de su regularidad.

En relación con las componentes no estructurales, se detallan los servicios y elementos considerados, estableciéndose un procedimiento de evaluación de su vulnerabilidad sísmica.

3.2 VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL

Existen varios métodos para evaluar la vulnerabilidad estructural en caso de sismo, los que se pueden agrupar en los de tipo cuantitativo y en los de tipo cualitativo. Los métodos cuantitativos son generalmente extensiones propias de los procedimientos de análisis y diseño antisísmico recomendados por las normas modernas, mientras que los métodos cualitativos están asociados a criterios de evaluación con índices globales que consideran las

características generales de la estructura.

Teniendo en cuenta el carácter preliminar de este estudio, se ha escogido el uso de métodos cualitativos, recomendando el uso de los métodos cuantitativos para una etapa posterior en sistemas considerados vulnerables después de este estudio.

Muchos de los métodos cualitativos son aplicables a estructuras de cierto tipo, teniendo limitaciones como el número de pisos que poseen las estructuras y el material con el que están construidas.

Los métodos cualitativos seleccionados para este estudio se basan en el cálculo de índices que relacionan la capacidad resistente de la estructura y el nivel de sollicitación que produce la acción de los sismos. Para ello toman en consideración diversos factores tales como: la forma de la planta (grado de simetría), densidad de elementos resistentes, configuración estructural, variación de las características de la estructura en altura, rigidez y ductilidad de los elementos, entre otros. Es necesario aclarar que estos índices no consideran la totalidad de los efectos que influyen en el comportamiento sísmico del edificio, pero toman la información suficiente para determinar si es o no vulnerable.

El hecho de aplicar estos índices en estructuras que han sido afectadas por sismos, ha servido para calibrarlos y establecer límites y rangos de seguridad para calificar si el edificio es vulnerable o no.

De los índices existentes se han escogido aquellos que son aplicables a la realidad chilena y de fácil determinación. El valor de los índices se complementa con un análisis de la variación que presentan las características del edificio con la altura.

A continuación se resumen los índices utilizados en este estudio y las características del edificio que se estudian para analizar su seguridad.

3.2.1 MÉTODO DE HIROSAWA.

El método propuesto por Hirosawa es utilizado oficialmente en Japón por el Ministerio de Construcción en la evaluación de la seguridad sísmica de edificios de hormigón armado. El método recomienda tres niveles de evaluación, que van de lo simple a lo detallado, y se basa en el análisis del comportamiento sísmico de cada nivel del edificio en las direcciones en las que se orientan los ejes sismorresistentes del edificio.

El método fue propuesto originalmente para utilizarlo en edificios de hormigón armado de altura media existentes o dañados, del orden de seis a ocho pisos estructurados principalmente con muros. En estudios más recientes el método se ha aplicado a edificios mixtos de hormigón armado y albañilería [Iglesias, 1989], lo que será aprovechado en el presente estudio considerando que estas estructuraciones mixtas son frecuentes en Chile en los edificios de altura media estructurados con muros.

La vulnerabilidad estructural se establece considerando que:

Si $I_h > I_{so}$, el edificio se puede considerar que tiene un comportamiento sísmico seguro frente a un evento sísmico.

Si $I_h < I_{so}$, el edificio se puede considerar que tiene un comportamiento incierto frente a un evento sísmico, luego se considera como inseguro.

3.2.1.1 CÁLCULO DEL ÍNDICE I_H .

Este índice se calcula mediante la ecuación siguiente:

$$I_h = E_o * S_D * T \quad \text{Ec. 3.1}$$

donde

E_o : índice sísmico básico de comportamiento estructural.

S_D : índice de configuración estructural.

T : índice de deterioro de la edificación.

3.2.1.2 CÁLCULO DE E_o

Al aplicar el primer nivel de evaluación, el término E_o se determina a partir de un cálculo simple de la resistencia última de corte de cada piso. Esta resistencia se calcula para cada dirección de la planta por la suma de los productos del área de la sección transversal de un muro o columna y de su resistencia de corte, reduciendo este producto por un factor (α_i) que considera la presencia de elementos que alcanzan su resistencia a un nivel de deformación menor que el resto de los elementos sismorresistentes, por ejemplo columnas cortas o muros de albañilería, reforzados o no, si se comparan con muros o columnas de hormigón armado.

El índice E_o es proporcional al producto del coeficiente de resistencia (C) y del de ductilidad (F).

$$E_o \propto C * F \quad \text{Ec. 3.2}$$

Para el cálculo de E_o , todo elemento o subestructura vertical que forma parte de la estructura sismorresistente debe clasificarse en algunas de las categorías siguientes:

- i) Columnas cortas de hormigón armado: Son todas las columnas en las que la relación h_o/D , entre la altura libre (h_o) y el ancho de la sección transversal (D), es igual o menor que 2. El comportamiento sísmico de estas columnas está controlado por una falla de corte frágil por el reducido nivel de deformación en el que se alcanza la resistencia y por la baja capacidad de deformación inelástica. Para establecer la altura libre se ha considerado la presencia de los elementos arquitectónicos que reducen la altura de la columna en la medida que no se aíslen de ella.
- ii) Columnas de hormigón armado: Son todas las columnas en las que la relación h_o/D es mayor que 2.
- iii) Muros de hormigón armado: Son los elementos de hormigón armado con una sección transversal en que la relación entre el lado mayor y el lado menor de la sección transversal es mayor que 3.
- iv) Muros de relleno de albañilería: Son aquellos muros de albañilería, normalmente con

escaso o ningún refuerzo, ubicados en el interior de los vanos de la subestructura resistente (pórticos) sin aislarlos de ella.

v) Muros de albañilería armada o muros de albañilería confinada con elementos esbeltos de hormigón armado, pilares y cadenas.

vi) Muros de albañilería simple o parcialmente confinada.

Los muros considerados corresponden a aquellos muros que se han diseñado y construido en forma tal que puedan transmitir cargas horizontales y verticales de un nivel al nivel inferior y a la fundación; no se consideran aquellos muros que sólo resisten las cargas provenientes de su propio peso como son: parapetos y tabiques de relleno o divisorios aislados de la estructura sismorresistente.

Esta clasificación debe hacerse para determinar la resistencia y para atender la menor capacidad de deformación inelástica y capacidad de disipación de energía que presentan algunos elementos, por ejemplo las columnas cortas y los muros de albañilería de relleno sin refuerzo, cuando el comportamiento sísmico está controlado por ellos.

El índice E_0 se calcula con la ecuación siguiente:

$$E_0 = \frac{(n_p + 1)}{(n_p + i)} * \{ \alpha_1 * (C_{mar} + C_{rc} + C_a + C_{ma}) + \alpha_2 * C_w + \alpha_3 * C_c \} * F \quad \text{Ec. 3.3}$$

donde:

α_1 : Factor de reducción de la capacidad resistente de acuerdo con el nivel de deformación en que alcanzan la resistencia los elementos que controlan el comportamiento sísmico [Murakami et al., 1992]. Los valores de estos factores se entregan en la tabla 3.1 cuando la capacidad sísmica está controlada por los elementos más frágiles (Tipo A), los menos frágiles (Tipo B) y los dúctiles (Tipo C) respectivamente.

n_p : Número de pisos del edificio.

i : Nivel que se evalúa.

C_{mar} : Índice de resistencia proporcionada por los muros de relleno de albañilería.

- C_{sc} : Índice de resistencia proporcionada por las columnas cortas de hormigón armado.
- C_a : Índice de resistencia proporcionada por los muros de albañilería no reforzada o parcialmente confinada.
- C_{ma} : Índice de resistencia proporcionada por los muros de albañilería confinada.
- C_w : Índice de resistencia proporcionada por los muros de hormigón armado.
- C_c : Índice de resistencia proporcionada por las columnas no cortas de hormigón armado.
- F**: Índice de ductilidad asociados a los elementos verticales.
- $F = 1.0$ si C_{mar} , C_a y C_{sc} son iguales a cero
- $F = 0.8$ si C_{mar} , C_a y C_{sc} son distintos de cero

En caso que los muros de albañilería confinada controlen la capacidad resistente, el valor de F es igual a 1.0 considerando la capacidad de deformación inelástica que se logra con los elementos de confinamiento.

La capacidad sísmica debe calcularse en primer lugar considerando la falla del grupo de elementos más frágiles; sin embargo si la falla de este grupo no produce inestabilidad del sistema, la capacidad sísmica debe calcularse considerando el próximo grupo despreciando la resistencia de los elementos que han fallado.

Tabla 3.1: Valores de los coeficientes α_i .

TIPO	α_1	α_2	α_3	MODO DE FALLA
A	1.0	0.7	0.5	Muros de relleno de albañilería o columnas cortas o muros de albañilería no reforzada y parcialmente confinada o muros de albañilería confinada controlan la falla.
B	0.0	1.0	0.7	Muros de hormigón armado controlan la falla.
C	0.0	0.0	1.0	Columnas de hormigón armado controlan la falla.

El término $(n+1)/(n+i)$ considera la relación entre el coeficiente de corte basal y el coeficiente de corte del piso i [Unemura, 1980], cuando estos esfuerzos de corte se establecen en función del peso del edificio por sobre el nivel considerado.

Los índices de resistencia (C_i) se han determinado considerando las características de refuerzo de los muros de hormigón armado construidos en Chile (cuantía y modalidad de refuerzo), lo que incorpora modificaciones en las expresiones propuestas por Hirosawa e Iglesias. Para los muros de albañilería se usa la resistencia propuesta por Iglesias para los muros de relleno (muros tipo diafragma) y la resistencia de agrietamiento diagonal recomendada por Raymond (1990) para los muros de albañilería confinada.

Las ecuaciones usadas son:

$$C_{mar} = \frac{0.6 \cdot 0.85 \cdot \tau_0 \cdot \sum A_{mar}}{\sum_{j=1}^{n_p} W_j} \quad \text{Ec. 3.4}$$

$$C_{sc} = \left(\frac{f'_c}{200} \right) \cdot \frac{(15 \cdot \sum A_{sc})}{\sum_{j=1}^{n_p} W_j} \quad \text{Ec. 3.5}$$

$$C_{ma} = \frac{0.6 \cdot (0.45 \cdot \tau_0 + 0.25 \cdot \sigma_0) \cdot \sum A_{ma}}{\sum_{j=1}^{n_p} W_j} \quad \text{Ec. 3.6}$$

$$C_a = C_{ma} \quad \text{Ec. 3.7}$$

$$C_w = \left(\frac{f'_c}{200} \right) \cdot \frac{(30 \cdot \sum A_{m1} + 20 \cdot \sum A_{m2} + 12 \cdot \sum A_{m3} + 10 \cdot \sum A_{m4})}{\sum_{j=1}^{n_p} W_j} \quad \text{Ec. 3.8}$$

$$C_c = \left(\frac{f'_c}{200} \right) \cdot \frac{(10 \cdot \sum A_{c1} + 7 \cdot \sum A_{c2})}{\sum_{j=1}^{n_p} W_j} \quad \text{Ec. 3.9}$$

donde:

f'_c = Resistencia cilíndrica a la compresión del hormigón.

$\sum A_{mar}$ = Suma de las áreas de los muros de relleno de albañilería del piso en evaluación en la dirección analizada.

$\sum A_{sc}$ = Suma del área de las columnas cortas de hormigón armado del piso en evaluación.

$\sum A_{ma}$ = Suma de las áreas de los muros de albañilería confinada del piso en evaluación en la dirección analizada.

- $\sum A_{m1}$ = Suma de las áreas de los muros de hormigón armado del piso en evaluación con columnas en ambos extremos, con cuantía de refuerzo horizontal igual o mayor que 1.2% y una esbeltez (H/L) del muro mayor que 2. En estos muros la resistencia al corte está controlada por la resistencia de aplastamiento de la diagonal comprimida debido a su alta cuantía de refuerzo horizontal [Wakabayashi, 1986].
- $\sum A_{m2}$ = Suma de las áreas de los muros de hormigón armado del piso en evaluación, que cumplan con alguna de las siguientes características:
- i) Muros con columnas en ambos extremos, cuantía de refuerzo horizontal menor que 1.2% y una esbeltez mayor que 2.
 - ii) Muros con columnas en ambos extremos y una esbeltez del muro igual o menor que 2. En estos muros la resistencia al corte es proporcionada principalmente por la armadura horizontal [Wakabayashi, 1986].
- $\sum A_{m3}$ = Suma de las áreas de los muros de hormigón armado del piso en evaluación, sin columnas o con una columna en alguno de sus extremos y una esbeltez del muro igual o menor que 2. En estos muros la resistencia al corte está definida por la carga de agrietamiento diagonal del hormigón debido a su reducida cuantía de armadura de refuerzo [Wakabayashi, 1986].
- $\sum A_{m4}$ = Suma de las áreas de los muros de hormigón armado del piso en evaluación, sin columnas o con una columna en alguno de sus extremos y una esbeltez del muro mayor a 2. En estos muros la resistencia al corte está dada por las ecuaciones de la norma ACI-318 [ACI, 1984]
- $\sum A_{c1}$ = Suma de las áreas de las columnas de hormigón armado donde la relación entre la altura libre (h_o) y el ancho (D) es menor que 6 [Hirosawa, 1992].
- $\sum A_{c2}$ = Suma de las áreas de las columnas de hormigón armado donde la relación entre la altura libre (h_o) y el ancho (D) es igual o mayor que 6 [Hirosawa, 1992].
- W_j = Peso del piso j.
- τ_o = Resistencia básica de corte de la albañilería.
- σ_o = Tensión normal debido al esfuerzo axial que producen las cargas verticales de peso propio y la sobrecarga de uso.

- L** = Largo del muro.
- H** = Altura del piso si L es mayor o igual que 3 m o altura libre del muro si L es menor que 3 m.

En estas ecuaciones las áreas se deben expresar en cm^2 , las resistencias y tensiones en kgf/cm^2 y los pesos en kgf . Los coeficientes que acompañan a las áreas corresponden a la resistencia al corte de los diferentes tipos de elementos que forman el sistema sismorresistente, expresadas en kgf/cm^2 .

Considerando las características de los edificios de albañilería construidos en Chile, la tensión normal debido al esfuerzo axial se calcula como $1.0 \cdot n$, donde n es el número de pisos por sobre el piso analizado [Küpfer, 1993].

3.2.1.3 CÁLCULO DE S_D

Este coeficiente cuantifica la influencia de las irregularidades de la configuración estructural y de la distribución de rigidez y de masa en el comportamiento sísmico de la edificación.

La información para calcular S_D se obtiene principalmente de los planos estructurales y se complementa con visitas a terreno. Las características del edificio que se consideran en la determinación de este coeficiente son: regularidad de la planta, relación largo-ancho de la planta, estrangulaciones de la planta, espesor de las juntas de dilatación, dimensiones y ubicación de patios interiores, existencia de subterráneo, uniformidad de la altura de los pisos, excentricidad de rigidez en planta, irregularidades de la distribución de las masas y de la rigidez de entrepiso de los pisos en altura, etc.

Hirosawa propone calcular S_D cuando se usa el primer nivel de evaluación de vulnerabilidad con la ecuación siguiente:

$$S_D = q_1 * q_2 * q_3 * q_4 * q_5 * q_6 * q_7 * q_8 \quad \text{Ec. 3.10}$$

donde:

$$q_i = \{1.0 - (1 - G_i) * R_i\} \quad \text{para } i = 1,2,3,4,5,7,8.$$

$$q_i = \{1.2 - (1 - G_i) * R_i\} \quad \text{para } i = 6.$$

Al revisar la ecuación 3.10 se observa que en la medida que se pierde la regularidad en las características de la estructura se castiga al sistema reduciendo su capacidad resistente con G_i y para cuantificar el efecto o influencia que pueda tener la irregularidad en la respuesta, el que no es igual para cada uno de los factores considerados, se usa el término R_i .

Los valores de G_i y R_i recomendados por Hirosawa se indican en la tabla 3.2.

Tabla 3.2: Valores de G_i y R_i .

ITEM	G_i			R_i
	1.0	0.9	0.8	
1.- Regularidad.	regular (a_1)	mediano (a_2)	irregular (a_3)	1.0
2.- Relación Largo-Ancho.	$B \leq 5$	$5 < B \leq 8$	$B > 8$	0.5
3.- Contracción de planta.	$0.8 \leq c$	$0.5 \leq c < 0.8$	$c < 0.5$	0.5
4.- Atrio o patio interior.	$R_{ap} = 0.1$	$0.1 < R_{ap} \leq 0.3$	$0.3 < R_{ap}$	0.5
5.- Excentricidad de atrio o patio interior.	$f_1 = 0.4$ $f_2 = 0.1$	$f_1 \leq 0.4$ $0.1 < f_2 \leq 0.3$	$0.4 < f_1$ $0.3 < f_2$	0.25
6.- Subterráneo.	$1.0 \leq R_{as}$	$0.5 \leq R_{as} < 1.0$	$R_{as} < 0.5$	1.0
7.- Junta de dilatación.	$0.01 \leq s$	$0.005 \leq s < 0.01$	$s < 0.005$	0.5
8.- Uniformidad de altura de piso.	$0.8 \leq R_h$	$0.7 \leq R_h < 0.8$	$R_h < 0.7$	0.5

La descripción de cada una de las características se entrega en el Anexo A.

Según Hirosawa, el valor de S_D se calcula usando el valor más desfavorable entre los obtenidos para la característica en los diferentes pisos, valor que se asume como representativo del edificio completo.

3.2.1.4 CÁLCULO DE T

Este índice cuantifica los efectos que produce el deterioro de la estructura debido al paso de tiempo o bien a la acción de sismos pasados u otras acciones que puedan haber-

la afectado. El índice se calcula a partir de la información obtenida de las visitas al edificio y de la información que proporcione el propietario.

El índice T se determina con la tabla 3.3; considerando que se usa un valor único del índice T para el edificio, este valor debe corresponder al menor valor obtenido de la tabla 3.3.

Tabla 3.3: Valores del índice T para diferentes causas y tipos de deterioro.

DEFORMACIÓN PERMANENTE (T_1)

CARACTERÍSTICA	T_1
El edificio presenta inclinación debido a asentamiento diferencial.	0.7
El edificio está construido sobre relleno artificial.	0.9
El edificio ha sido reparado debido a deformaciones presentadas anteriormente.	0.9
Visible deformación de vigas y columnas.	0.9
No presenta signos de deformación.	1.0

GRIETAS EN MUROS O COLUMNAS (T_2)

CARACTERÍSTICA	T_2
Presenta filtraciones con corrosión visible de armaduras.	0.8
Grietas inclinadas visibles en columnas.	0.9
Grietas visibles en muros.	0.9
Presenta filtraciones, pero sin corrosión de armaduras.	0.9
Nada de lo anterior.	1.0

INCENDIOS (T_3)

CARACTERÍSTICA	T_3
Ha experimentado incendio pero no fue reparado.	0.7
Ha experimentado incendio y fue adecuadamente reparado.	0.8
No ha experimentado incendio.	1.0

USO DEL CUERPO (T_4)

CARACTERÍSTICA	T_4
Almacena sustancias químicas.	0.8
No almacena sustancias químicas.	1.0

TIPO DE DAÑO ESTRUCTURAL (T₅)

CARACTERÍSTICA	T ₅
Daño estructural grave.	0.8
Daño estructural fuerte.	0.9
Daño estructural ligero o no estructural.	1.0

Tabla 3.4: Clasificación de daños causados por sismo [Iglesias et al., 1987].

TIPO DE DAÑO	DESCRIPCIÓN
No estructural.	Daños únicamente en elementos no estructurales.
Estructural ligero.	Grietas de menos de 0.5 mm de espesor en elementos de hormigón armado. Grietas de menos de 3 mm de espesor en muros de albañilería.
Estructural fuerte.	Grietas de 0.5 a 1 mm de espesor en elementos de hormigón armado. Grietas de 3 a 10 mm de espesor en muros de albañilería.
Estructural grave.	Grietas de más de 1 mm de espesor en elementos de hormigón armado. Aberturas en muros de albañilería. Aplastamiento del hormigón, rotura de estribos y pandeo del refuerzo en vigas, columnas y muros de hormigón armado. Agrietamiento de capiteles y consolas. Desplome de columnas. Desplome del edificio en más de 1% de su altura. Asentamiento de más de 20 cm.

3.2.1.5 CÁLCULO DEL ÍNDICE I_{50}

Este índice se calcula con la ecuación siguiente:

$$I_{50} = E_{50} * Z * G * U \quad \text{Ec. 3.11}$$

donde:

E_{50} = Resistencia sísmica básica requerida.

Z = Factor de zona sísmica, su valor depende del peligro sísmico del lugar donde se ubica el edificio, encontrándose entre el rango $0.5 \leq Z \leq 1$.

G = Factor de influencia de las condiciones topográficas y geotécnicas.

U = Factor de importancia del edificio por su uso.

En el caso particular de este estudio, la determinación de los valores mínimos del índice de Hirosawa (I_{so}) se realiza utilizando la Norma Chilena de diseño sismorresistente Nch433.Of93, considerando un estado límite último. Este estado se produce cuando ocurre un sismo de gran magnitud y baja probabilidad de ocurrencia, por ejemplo un sismo de subducción de magnitud $M_s = 8.5$ frente a las costas de Chile en la zona en que se ubican los hospitales de este estudio.

Por lo tanto, el valor mínimo del índice de Hirosawa para que la vulnerabilidad estructural de los edificios sea calificada como baja, se puede establecer a partir del diseño elástico que recomienda la norma Nch433.Of93 con una reducción mínima de él, reducción similar a la recomendada para sistemas de comportamiento frágil ($R=2$), y amplificando por un factor que considera los factores de reducción que se le han aplicado a la capacidad resistente de los distintos elementos ($Fac=1.4$). Así resulta:

$$(I_h)_{min} = I_{so} = \begin{cases} \frac{Fac*2.1*S*A_o}{R} & , \text{ para } T \leq T_o \\ \left(\frac{Fac*2.1*S*A_o}{R} \right) * \frac{2*T*T_o}{(T^2 + T_o^2)} & , \text{ para } T > T_o \end{cases} \quad \text{Ec. 3.12}$$

donde:

A_o = 0.4 para zona sísmica 3 y 0.3 para zona sísmica 2.

n = Número de pisos del edificio sin incluir estanques o apéndices (sala de máquinas de ascensores, cajas de escala proyectadas sobre el último nivel, etc.).

S = Efecto de amplificación del suelo. Toma los valores de 0.9, 1.0, 1.2 y 1.3 para los suelos tipo I, II, III y IV, respectivamente (NCh433.Of93).

T = Período fundamental de la estructura Igual a $0.10*n$ para edificios estructurados con marcos (Midorikawa, 19), a $0.035*n$ para edificios estructurados con muros, (Baeza, 1963), y a $0.05*n$ para edificios con estructuración mixta.

T_o = Parámetro que depende del suelo de fundación. Igual a 0.15, 0.30, 0.75 y 1.2 para suelos tipo I, II, III y IV, respectivamente.

El valor de I_{so} para que la vulnerabilidad estructural sea calificada como alta se obtiene con la ecuación 3.12 haciendo $R=7$.

3.2.2 ÍNDICES DE SHIGA

Shiga (1977) propone un criterio para calificar los edificios de hormigón armado de altura media aprovechando la información obtenida en 52 edificios de este tipo de la ciudad de Hachinoha, dañados durante el terremoto de Tokachi-Oki en 1968 en Japón.

Según Shiga en este tipo de estructura el nivel de daño depende de la densidad de muros y del nivel de la tensión de corte media que se produce. Para establecer el posible daño sísmico que pueda experimentar un edificio de este tipo, Shiga recomienda calcular los tres índices siguientes: Índice de área de muros (I_{sm}), Índice de área de columnas (I_{sc}) e Índice de tensión media de corte nominal (I_{st}).

El índice I_{sm} representa el área de muros de hormigón armado disponible en el piso y en cada dirección de la planta para resistir las fuerzas reactivas que actúan en este piso. Este índice se calcula a partir de la relación entre el área de muros en cada dirección del piso del edificio ($\sum A_m$) y el área de las plantas ubicadas sobre el nivel considerado

$\sum_{j=i}^{n_p} A_{pj}$. La expresión del índice I_{sm} es la siguiente:

$$I_{sm} = \frac{\sum A_m}{\sum_{j=1}^{n_p} A_{pj}} \quad \text{Ec 3.13}$$

El índice de área de columnas, I_{sc} , se calcula en forma análoga al índice I_{sm} , sólo que en este índice se considera el área de las columnas del piso del edificio ($\sum A_c$), quedando expresado por:

$$I_{sc} = \frac{\sum A_c}{\sum_{j=1}^{n_p} A_{pj}} \quad \text{Ec 3.14}$$

El índice I_{st} es una medida de la tensión de corte nominal promedio que actúa en el piso y se define por la relación entre el peso sísmico nominal total del edificio sobre el piso ($\sum W_j$) y el área total de muros y columnas en una dirección determinada del piso, resultando:

$$I_{st} = \frac{\sum_{j=1}^{n_p} W_j}{\sum A_m + \sum A_c} \quad \text{Ec. 3.15}$$

Para determinar los valores mínimos de los índice de Shiga, se establece la relación de éstos con el de Hirosawa:

$$I_{st} * I_{sm} = w_o * I_{so} \quad \text{Ec. 3.16}$$

Donde w_o es el peso promedio por unidad de planta del edificio por sobre el nivel considerado e I_{so} es el valor límite del índice de Hirosawa.

Para establecer el valor máximo de I_{st} para edificios chilenos de hormigón armado, se aprovecha la información reunida por Ridell et al. (1993) y la relación entre la densidad de muros en el primer piso y el número de pisos establecida por Arias (1993). Con esto se obtiene un valor máximo de I_{st} de 16 kgf/cm². Por lo tanto, para cada piso, la ecuación 3.16 queda como:

$$I_{sm} > \frac{w_{oi} * I_{so} * (n+i)}{16 * (n+1)} \quad \text{Ec. 3.17}$$

donde

$$w_{oi} = \frac{\sum_{j=1}^n W_j}{\sum_{j=1}^n A_{pj}}$$

Estos índices se utilizan en este trabajo para establecer la vulnerabilidad de los pisos donde predominan los muros de hormigón armado, los pocos muros de albañilería que puedan existir se incluyen como muros equivalentes de hormigón de igual resistencia al