

CAPÍTULO 3

CÁLCULO DEL ÍNDICE DE COMPORTAMIENTO SÍSMICO ESTRUCTURAL (I_s)

3.1 INTRODUCCIÓN

(1) El índice de comportamiento estructural de un edificio (I_s), se calcula para cada nivel en las direcciones larga y corta del mismo, conforme a la ecuación 3.1. Sin embargo, en cuanto al índice S_D , empleado dentro de la evaluación del primer nivel, así como en la determinación del índice T , no requiere diferenciar los niveles y las direcciones del edificio.

$$I_s = E_o S_D T \quad (3.1)$$

donde, E_o : índice básico de capacidad existente (conforme al subcapítulo 3.2)

S_D : índice de configuración estructural (conforme al subcapítulo 3.3)

T : índice de edad (conforme al subcapítulo 3.4)

(2) Para el cálculo del índice I_s , se podrá considerar cualquiera de los métodos de evaluación de primer, segundo o tercer nivel. La descripción de cada procedimiento de evaluación se indica abajo. Conforme se incrementa el nivel de la misma, se aumenta también la minuciosidad en el procedimiento de cálculo, e igualmente se considerará que la confiabilidad de los resultados irá creciendo.

(i) Procedimiento de evaluación de primer nivel

El índice E_o , se calculará considerando la resistencia última aproximada, basándose en los porcentajes de muros estructurales y columnas respecto al área total de piso. Los índices S_D y T , se determinarán con un procedimiento simplificado acorde con el nivel aproximado de cálculo del índice E_o . Los lineamientos de la presente norma, son relativamente adecuados empleando el método aproximado para estructuras con gran cantidad de muros estructurales; en el caso de muros con poca densidad de muros estructurales, el procedimiento de cálculo tiende a sub valorar el índice E_o .

(ii) Procedimiento de evaluación de segundo nivel

El índice E_o , se calculará considerando la hipótesis de que las vigas presentan una resistencia alta, siendo un procedimiento aproximado con mayor minuciosidad que el procedimiento de primer nivel. El procedimiento considera la resistencia última, el mecanismo de falla, así como la capacidad de deformación de columnas y muros estructurales. Respecto a los índices S_D y T , se requiere de una investigación más detallada que la que se usa en el procedimiento del primer nivel. La resistencia de los elementos verticales tiene influencia en la capacidad de deformación, así como en el valor del índice E_o ; así, en el caso de edificaciones a base de marcos de gran ductilidad, el valor del índice E_o tiende a presentar valores mayores que los calculados con el procedimiento de primer nivel. También, debido a que la confiabilidad de

este procedimiento es superior a la de primer nivel, al realizar una evaluación de comportamiento ante sismo considerando la presente norma, se puede pensar que el nivel para evaluar la seguridad se reduce. Respecto a este aspecto, existe una relación similar entre los procedimientos de evaluación de segundo y tercer nivel.

(iii) Procedimiento de evaluación de tercer nivel

El índice E_o se calculará considerando los mecanismos de fluencia de marcos resistentes a momento y la rotación en la base o cimentación de muros estructurales entre otros aspectos. La determinación de los índices S_D y T , se hará de manera similar al planteado en el procedimiento de segundo nivel. Las características del edificio se inspeccionan e investigan a gran detalle, por lo que el nivel de confiabilidad de los resultados son superiores a los del procedimiento de segundo nivel.

Comentarios

(1) Respecto a los índices suplementarios E_o , S_D y T

El procedimiento de cálculo de los índices suplementarios usados en la ecuación 3.1, se presenta en los subcapítulos 3.2 a 3.4. Se presenta una explicación sencilla sobre la filosofía en que se sustentan dichos índices.

(i) E_o (Índice básico de comportamiento y resistencia estructural)

(a) Es un índice que señalará la importancia en las características de comportamiento ante sismo de un sistema estructural, cuando éste fue sujeto de un proceso comparativamente adecuado de diseño y construcción. También, dependiendo de la precisión del procedimiento de cálculo, como se indica en el párrafo 2), se establecen tres niveles de procedimiento de evaluación, siendo el procedimiento de primer nivel el de menor detalle, y el de tercer nivel el procedimiento de mayor detalle y precisión.

(b) Considerando los índices de resistencia C y capacidad de deformación F ; el índice de resistencia C , será más alto a mayor capacidad del sistema estructural a resistir fuerza lateral; el índice de capacidad de deformación F , será más alto a mayor capacidad de deformación lateral del sistema estructural y mayor capacidad de disipación de energía por deformación en el intervalo de comportamiento inelástico. Por lo tanto, el valor del índice E_o , será más alto a mayores valores de los índices C y F .

Por ejemplo, como se muestra en la figura 3.1.1, se tienen dos tipos de sistemas estructurales como uno con alta resistencia lateral y poca capacidad de deformación como es el representado por (A), y otro con menor resistencia lateral pero gran capacidad de deformación como es el representado por (B). Si la respuesta ante la incidencia de un sismo, indicada por el triángulo oscuro dentro de la figura, no supera el límite de falla de la estructura (indicado por el símbolo X), significa que el edificio tiene una capacidad de comportamiento ante sismo de igual o mayor nivel, y por tanto, la filosofía básica será que el índice E_o tenga un valor calculado igual al de dicha respuesta ante sismo. También, el índice E_o podría presentar holgura en cuanto a resistencia y capacidad de deformación respecto a la respuesta ante sismo esperada. Considerando la misma figura 3.1.1, el sistema estructural puede tener una mayor capacidad ante fuerza lateral, o bien, una mayor capacidad de

deformación lateral (representado dentro de la figura como el segundo símbolo X), lo que estaría representado por un valor del índice E_o mayor.

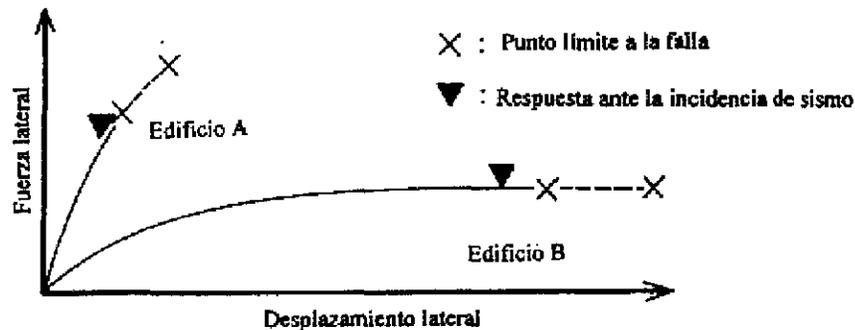


Figura 3.1.1 Relación entre fuerza y desplazamiento lateral en un edificio (1)

(c) Sistemas estructurales con gran resistencia a fuerzas laterales, pero poca capacidad de deformación (consideradas estructuras o elementos frágiles), y sistemas estructurales con gran capacidad de deformación pero poca resistencia a fuerzas laterales (denominadas estructuras o elementos dúctiles); por ejemplo, estructuras a base de marcos resistentes a momento pero con presencia de columnas cortas, y estructuras a base de marcos resistentes a momento y con muy poca o nula presencia de muros estructurales, respectivamente, son las consideradas en la presente norma, donde los principios básicos de la misma para determinar el valor del índice E_o se muestran enseguida.

La relación entre carga lateral y desplazamiento lateral de esta clase de edificaciones se puede pensar que idealmente presentan la forma mostrada en la figura 3.1.2. Es decir, incrementando el desplazamiento lateral, se puede alcanzar el punto 1) presentándose una falla frágil de elementos estructurales (o sistema estructural), donde se presenta un deterioro brusco de la resistencia. Incrementando nuevamente el desplazamiento lateral, se observará también el inicio de incremento de la capacidad de carga lateral, hasta alcanzar el punto 2), donde los elementos (sistema estructural) de comportamiento dúctil fallarán de igual manera. En los sistemas estructurales comunes, en el punto 1) aunque se presenta una falla tipo frágil, el deterioro de la resistencia no es brusco; la degradación de la resistencia puede pensarse que generalmente se presenta gradualmente, como se indica con la línea punteada entre los puntos 1) y 3) de la figura 3.1.2. Sin embargo, esta norma, adopta una hipótesis conservadora, que asume que la degradación de resistencia aparece en forma brusca.

1) El valor del índice E_o del edificio, se tomará como el mayor de los valores calculados para E_o , considerando independientemente como puntos límite de falla al punto 1) y al punto 2), respectivamente. Sin embargo, con respecto a este procedimiento, no es preciso calcular los índices para ambos casos. La ecuación 3.4 de la sección 3.2.1 presenta un procedimiento simplificado donde automáticamente se selecciona el mayor de los valores del índice E_o .

2) Como se menciona en el inciso anterior, en caso que el valor del índice E_o resulte mayor para la condición del punto 2), se considerará éste como el valor del índice E_o para todo el sistema estructural. Sin embargo, para este caso, los elementos (sistema estructural) que presenten falla frágil ante cargas laterales, deberán presentar una ubicación adecuada

que no altere el comportamiento posterior de la estructura. Aun después que los elementos (sistemas estructurales) frágiles hayan fallado, y los elementos (sistema estructural) dúctiles tengan la resistencia adecuada para soportar las fuerzas laterales, si la carga vertical que soportaban los elementos frágiles, no puede ser soportada por los elementos o sistemas de la vecindad del elemento o sistema fallado; o bien, si losas y trabes son incapaces de soportar cargas verticales (peso propio por ejemplo), existiendo la posibilidad de una falla local por deformación excesiva del sistema de piso; aunque el valor del índice E_o determinado conforme el punto 2) resulte superior al valor de E_o para el punto 1), se considerará el valor del índice E_o de toda la estructura como aquel calculado para el punto 1)

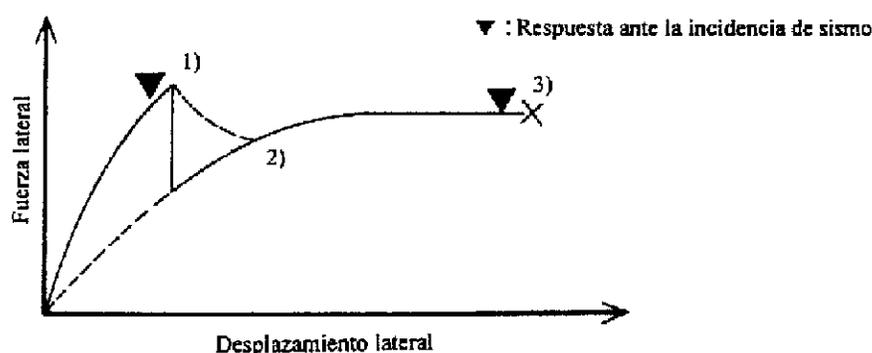


Figura 3.1.2 Relación entre carga lateral y desplazamiento lateral de un edificio (2)

También, a este tipo de elementos o sistema estructural, que aun presentando falla ante fuerzas laterales no represente un efecto importante en las características de comportamiento ante sismo del sistema estructural global, pero que después de la falla son incapaces de soportar las cargas verticales, se les denomina, en principio, elementos estructurales secundarios.

(ii) S_D (Índice de configuración estructural)

Índice con el que se corrige el valor del índice E_o con base en la consideración de la configuración en planta y elevación de la estructura, así como de las distribuciones de rigidez en planta y elevación. Este índice, dentro del proceso de determinación de las características de comportamiento ante sismo de un edificio, se calculará considerando un procedimiento de comprobación de algunos conceptos con dificultad en su evaluación.

(iii) T (Índice de edad)

Índice que corrige el valor del índice básico E_o con base en la edad de la estructura.

Dentro de los aspectos de importancia a revisar dentro del proceso de comprobación, como se indica en el subcapítulo 1.2, está el proceso de inspección preliminar, con el que se investiga sobre algunos conceptos necesarios para el cálculo del índice I_v . También, en la

sección 3.4, se presenta, para el caso de edificios en los que no se cuenta con los planos de diseño, un procedimiento detallado de inspección de campo, (se recomienda su consulta).

(2) *Determinación de la aplicabilidad de los procedimientos de primer, segundo y tercer nivel.*

Por regla, la presente norma, considera aplicables cualquiera de los tres tipos de procedimiento de evaluación en ella presentados. Enseguida, se indican las características de mayor importancia y la metodología para determinar la aplicabilidad de cada uno de dichos procedimientos.

(i) *Características de cada uno de los procedimientos*

La filosofía en la que se sustenta la presente norma de evaluación, es prácticamente la misma para todos los factores y coeficientes que intervienen en los tres tipos de procedimientos, y las características de cada procedimiento es como se indica.

En cuanto al procedimiento de primer nivel, requiere de muy poco trabajo de campo y gabinete, por lo que la confiabilidad de los resultados que se reporten es baja. Sin embargo, para edificios considerados como de alto nivel en las características de comportamiento ante sismo, por ejemplo edificios con una gran densidad de muros, este procedimiento es viable por el poco tiempo que requiere.

El procedimiento de segundo nivel, se constituye como un método que requiere una cantidad media de revisión estructural, por lo que obviamente los resultados en él reportados tendrán mayor confiabilidad que los del procedimiento de primer nivel. En estructuras a base de marcos resistentes a momento, el empleo del procedimiento de primer nivel repercute en una tendencia de sub-valorar las características de comportamiento ante sismo de las estructuras, por lo que se considera aplicable en este caso el procedimiento de segundo nivel.

El procedimiento de tercer nivel, al requerir, entre otros aspectos, la determinación del mecanismo de falla de la estructura, constituye un procedimiento de alto nivel en el que se requiere de tecnología. En los casos que exista duda respecto de los resultados de la aplicación de los procedimientos de primer y segundo nivel, se considera aplicable el procedimiento de tercer nivel. Sin embargo, debido a que es un procedimiento más minucioso que el de segundo nivel, deberá realizarse en los casos y condiciones que sea posible inspecciones más detalladas y profundas que las que se realizan para el procedimiento de segundo nivel.

Una comparación entre los tres procedimientos, se muestra en la tabla 3.1

(ii) *Procedimiento de aplicación de cada uno de los procedimientos de evaluación*

En lo que respecta a la presente norma, cualquiera de los tres niveles de procedimiento de evaluación puede ser usado. La metodología estándar de aplicación de estos procedimientos, es como se indica.

(a) *Todos los procedimientos, de primer, segundo y tercer nivel, son aplicables; los resultados repercuten en una evaluación sintetizada*

(b) Se parte aplicando el procedimiento de primer nivel. Si según la norma de evaluación se cuenta con características de comportamiento ante sismo suficientes y adecuadas, se considera terminado el procedimiento de evaluación.

(c) Se aplican los procedimientos de primer y segundo nivel; posteriormente se aplica el procedimiento de evaluación de mayor nivel.

Cuál de estas metodologías deberá ser empleada, así como la necesidad de aplicar una metodología diferente a las antes mencionadas, dependiendo de las características de la estructura a evaluar y de los tres diferentes procedimientos de evaluación, así como el nivel de confiabilidad deseada por el ingeniero de diseño, se deberá considerar para elegir el procedimiento de evaluación adecuado. El proceso de aplicación de los diferentes procedimientos de evaluación en inciso (b), se muestra para consulta en la figura 3.1.3, por medio de un diagrama de flujo

(iii) Confiabilidad de cada procedimiento de evaluación

Mostrar cuantitativamente los niveles de confiabilidad de los procedimientos de evaluación, es una tarea prácticamente imposible; sin embargo, con base en los resultados de aplicar estos procedimientos en un número suficiente de edificaciones, se puede determinar el comportamiento general, y es lo que se indica.

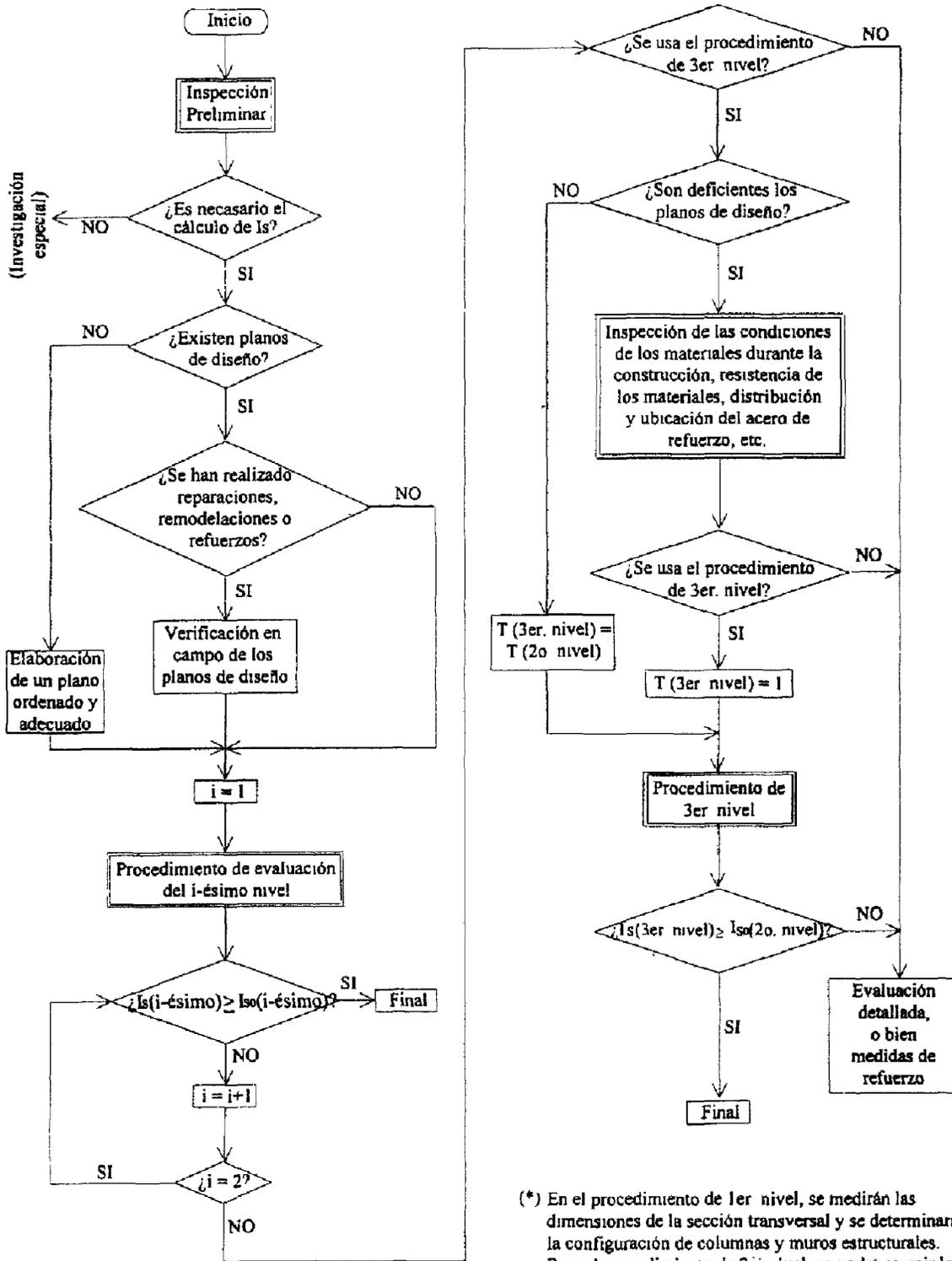
En la figura 3.1.4 se presenta la comparación entre los valores del índice I_s para cuando se tiene un sistema estructural con un gran número de muros y cuando se tiene un sistema principalmente a base de marcos resistentes a momento, conjuntamente con el valor "exacto" para los mismos sistemas estructurales. Los resultados se muestran de manera descriptiva, considerando que los resultados están normalizados.

Cuando se aplica el procedimiento de primer nivel, al ser un método simplificado basado únicamente en los porcentajes de muros y columnas, obviamente existirá dispersión en los resultados calculados para el índice I_s . Respecto a edificaciones que presentan una cantidad considerable de muros estructurales, será necesario realizar la evaluación considerando la dispersión de los resultados y el nivel de confiabilidad de los mismos, que será mayor que para estructuras a base de marcos resistentes a momento. También, como se mencionará en el subcapítulo 3.2 sobre el índice básico de características y capacidad ante sismo E_m , en el caso de edificaciones donde los muros estructurales tengan una ubicación tal que generen torsión de consideración, al aplicar el procedimiento de primer nivel, los resultados reportan sobrevaloración del índice I_s , por lo que será necesario tomar las precauciones adecuadas. Por otro lado, el mismo procedimiento aplicado a sistemas estructurales con poca o nula cantidad de muros, los resultados subvalorarán el índice I_s .

Al usar el procedimiento de segundo nivel en estructuras con gran cantidad de muros, la dispersión de los resultados se reducirá considerablemente; sin embargo, la media de los resultados se prevé no presentará variaciones importantes respecto a aquellos empleando el procedimiento de primer nivel. En el caso de sistemas estructurales donde se sobrevalora el índice I_s , al emplear el procedimiento de segundo nivel, el valor de I_s resultará menor.

Tabla 3.1 Comparación entre los diferentes procedimientos de evaluación.

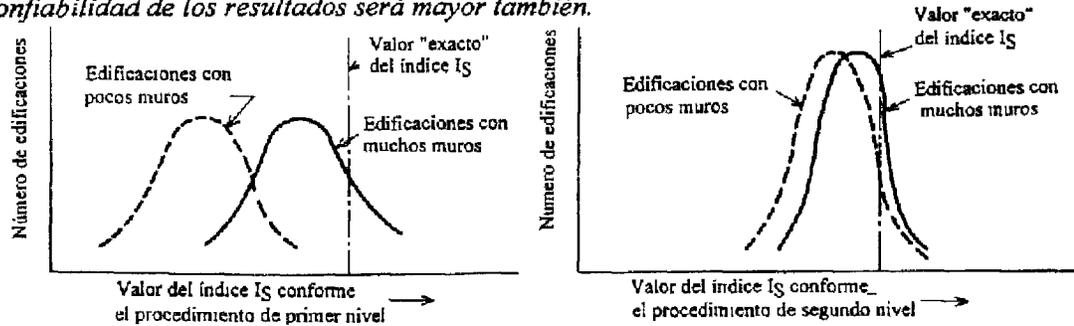
Índice	Procedimiento de evaluación		
	Primer nivel	Segundo nivel	Tercer nivel
C	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo aproximado, con base en el porcentaje de muros y columnas respecto al área del sistema de piso - Clasificación de los elementos verticales. (a) columnas, (b) columnas cortas, (c) muros. 	<ul style="list-style-type: none"> - Cálculo de las resistencias a flexión y cortante de los elementos verticales (con la hipótesis que la resistencia y rigidez de las vigas es infinita) - Clasificación de los elementos verticales (a) columnas de flexión, (b) muro de flexión, (c) columna de cortante, (d) muro de cortante, (e) columna frágil 	<ul style="list-style-type: none"> - Consideración de la resistencia de las vigas y de la rotación de muros estructurales - Clasificación de los elementos: además de las cinco clasificaciones para el procedimiento de segundo nivel, (f) viga de flexión, (g) viga de cortante, (h) rotación de muro.
F	<ul style="list-style-type: none"> (a) columna : 1.0 (b) columna corta: 0.8 (c) muro : 1.0 	<ul style="list-style-type: none"> (a) columna de flexión: 1.27-3.2 (también existe el 1.0) (b) muro de flexión: 1.0-2.0 (c) columna de cortante: 1.0 (d) muro de cortante: 1.0 (e) columna frágil: 0.8 	<ul style="list-style-type: none"> Además de los incisos (a) a (c) indicados en la izquierda. (f) columna fuerte viga débil en flexión: 3.0 (g) columna fuerte viga débil en cortante: 1.5 (h) rotación de muro. 3.0
E _o	<ul style="list-style-type: none"> - Dependiendo de la existencia de elementos estructurales secundarios, existen dos procedimientos de cálculo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Los procedimientos de cálculo se dividen dependiendo de la existencia de columnas frágiles, de elementos estructurales secundarios y de la dimensión de la excentricidad existente (figura 3.2.4) 	<ul style="list-style-type: none"> - Además de las condiciones para el procedimiento de segundo nivel, se pueden establecer las medidas adecuadas para determinar el mecanismo de falla del sistema estructural.
S _p	<ul style="list-style-type: none"> - Consideración de las configuraciones en planta y elevación. 	<ul style="list-style-type: none"> - Además de las condiciones establecidas para el procedimiento de primer nivel, se considerará la rigidez en planta y elevación. - Sin embargo, el factor de corrección de rango de configuración en planta y elevación, será menor que el determinado para el procedimiento de primer nivel. 	<ul style="list-style-type: none"> - Igual al procedimiento de segundo nivel.
T	<ul style="list-style-type: none"> - Con base en la inspección de primer nivel, se realizará una inspección relacionada con el estado de deformación, de agrietamiento, experiencia de daño por fuego, uso, año de construcción, condición del acabado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Con base en la inspección de segundo nivel, se realizará una inspección para determinar los orígenes de los conceptos investigados indicados en la parte izquierda de la tabla. 	<ul style="list-style-type: none"> - Igual que para el procedimiento de segundo nivel. Sin embargo, con base en una inspección minuciosa será posible tomar el valor igual a 1.0



(*) En el procedimiento de 1er nivel, se medirán las dimensiones de la sección transversal y se determinará la configuración de columnas y muros estructurales. Para el procedimiento de 2o. nivel, se podrá asumir los valores de cuantía de acero y resistencia a la compresión del concreto.

Figura 3.1.3 Diagrama de flujo para el cálculo del índice I_s (ejemplo)

Por otro lado, para sistemas estructurales con pocos muros, sistema cuya capacidad de deformación se incrementa respecto a aquellos sistemas con gran cantidad de muros, al aplicar el procedimiento de segundo nivel se piensa que se obtendrán valores del índice I_s más altos a los reportados empleando el procedimiento de primer nivel. Cuando se emplea el procedimiento de tercer nivel, la dispersión de los resultados será menor que la que se obtendría producto del uso del procedimiento de segundo nivel, se puede decir que la confiabilidad de los resultados será mayor también.



(Se puede pensar que el valor del índice I_s determinado por el procedimiento de tercer nivel presenta mayor confiabilidad que el determinado por el procedimiento de segundo nivel)

Figura 3.1.4 Descripción gráfica de la dispersión del índice I_s calculado por diferentes procedimientos de evaluación

3.2 ÍNDICE BÁSICO DE COMPORTAMIENTO E_o

3.2.1 Objetivos principales del cálculo del índice E_o

El índice básico de comportamiento E_o , considerando el valor de los otros índices suplementarios iguales a la unidad, representa las características de comportamiento ante sismo que posee una estructura en base a la capacidad última del edificio, el mecanismo de falla y la capacidad de deformación. A mayor resistencia, mayor capacidad de deformación, mayor ductilidad en el comportamiento y la formación de un adecuado mecanismo de falla, se obtendrán valores más altos del índice E_o .

El índice básico de comportamiento E_o para el nivel i de un edificio de n niveles, se calculará conforme a lo indicado para los procedimientos de primer, segundo y tercer nivel, considerando el índice de resistencia C determinado conforme se indica en la sección 3.2.2, y el índice de ductilidad y capacidad de deformación F conforme se indica en la sección 3.2.3. El valor obtenido del término $(n+1)/(n+i)$, empleado en el lado derecho de las ecuaciones 3.2 a 3.5, podrá modificarse. Sin embargo, en esos casos deberá realizarse una modificación adecuada correspondiente en la ecuación 3.6.

3.2.1.1 Cuando se usa el procedimiento de evaluación de primer nivel

Los elementos verticales de la estructura se dividen en tres rubros mostrados en la tabla 3.2.1, en la que se indican los valores aproximados de los índices de resistencia C y ductilidad F , que se emplearán en las siguientes ecuaciones para determinar el valor de E_o .

- (i) Cuando no hay columnas cortas

Cuando no hay columnas cortas el valor del índice E_o se determinará usando la ec. 3.2.

$$E_o = \frac{n+1}{n+1} (C_W + \alpha_1 C_C) F_W \quad (3.2)$$

donde, n : número de pisos en el edificio

i : número correspondiente al nivel considerado, 1 para el primer nivel y n para el último

C_W : índice de resistencia de muros estructurales, conforme a la ecuación 3.7

C_C : índice de resistencia de columnas, conforme a la ecuación 3.8

α_1 : (Resistencia de columnas al momento de la deformación de resistencia última de muros) / (Resistencia última de columnas), se puede igualar a 0.7. Sin embargo, cuando $C_W \approx 0.0$, se considerará igual a 1.0

F_W : índice de ductilidad de muros (cuando $C_W \approx 0.0$, se considerará el índice de ductilidad de columnas), puede considerarse igual a 1.0

(ii) Cuando hay columnas cortas

En el caso de existencia de columnas cortas, el índice E_o se considerará como el mayor de los valores obtenidos de las ecuaciones 3.3 y 3.2 despreciando la existencia de las columnas cortas. Sin embargo, en el caso que las columnas cortas sean elementos estructurales de segundo orden, se tomará el valor calculado según la ecuación 3.3. Lo que aquí se menciona como elementos estructurales secundarios, son aquéllos que al fallar ante la incidencia de cargas laterales, en la vecindad no haya elementos que pueden soportar las fuerzas verticales que aquéllas soportaban.

$$E_o = \frac{n+1}{n+i} (C_{SC} + \alpha_2 C_W + \alpha_3 C_C) F_{SC} \quad (3.3)$$

donde, C_{SC} : índice de resistencia de columna corta, conforme a la ecuación 3.9

C_W : índice de resistencia de muro estructural, conforme a la ecuación 3.7

C_C : índice de resistencia de columnas excepto columna cortas, conforme a la ec. 3.8

α_2 : (suma de resistencia de muros cuando se alcanza la deformación de capacidad última de columnas cortas) / (suma de capacidad última de muros), puede considerarse igual a 0.7

α_3 : (suma de resistencia de columnas cuando se alcanza la deformación de capacidad última de columnas cortas) / (suma de capacidad última de columnas), puede considerarse igual a 0.5

F_{SC} : índice de ductilidad de columnas cortas, puede considerarse igual a 0.8

Tabla 3.2.1 Clasificación de los elementos verticales en el procedimiento de primer nivel

Nombre	Definición
Columna	Columnas cuya relación $h_o/D \geq 2$
Columna corta	Columnas cuya relación $h_o/D \leq 2$
Muro	Muros independientes de marcos resistentes a momento
Nota: h_o : altura libre de la columna, en el caso de la existencia de muros de parapeto, el peralte de éstos se restará a la altura de la columna (fig. 3.2.1)	
D : peralte de la sección transversal de la columna	

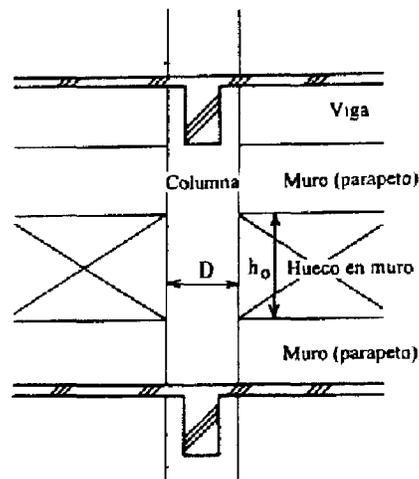


Figura 3.2.1 Altura neta de columna h_o

3.2.1.2 Cuando se usa el procedimiento de evaluación de segundo nivel

En cuanto al procedimiento de segundo nivel, el índice de resistencia se determinará considerando el procedimiento que para el caso de indica en la subsección 3.2.2.2, considerando los patrones de falla de los elementos de soporte vertical de cada nivel, así como la fuerza cortante última resistente según 3.2.2.2, (ii) y (iii). También conforme se indica en la sección 3.2.3, se determinará el índice de ductilidad de cada elemento que resistan cargas verticales. Tomando en cuenta los mecanismos de falla y el valor de los índices de ductilidad antes mencionados, se procede a agrupar todos los elementos que resistan cargas verticales en tres grandes grupos (3.2.2.2, (iv)), a cada uno de los que deberá calcularse los índices de resistencia C y ductilidad F , conforme lo indicado en las secciones 3.2.2 y 3.2.3, respectivamente.

La clasificación según el mecanismo de falla de los elementos verticales se muestra en la tabla 3.2.3; la determinación del índice de ductilidad F , se definirá con base en la clasificación de los elementos verticales en tres grupos, siendo el valor más pequeño el correspondiente al grupo 1, y el mayor para el correspondiente al grupo 3. Finalmente, combinando los valores de los índices de resistencia C y ductilidad F , para cada grupo de elementos verticales, se calcula el valor del índice E_o conforme se expresa en los párrafos (i), (ii) y (iii) indicados.

Tabla 3.2.2 Clasificación de los elementos verticales conforme a su mecanismo de falla para el procedimiento de segundo nivel

Nombre	Descripción
Columna de flexión	Columna donde se presenta la fluencia por flexión antes de la falla por cortante
Muro de flexión	Muro donde se presenta la fluencia por flexión antes de la falla por cortante
Columna de cortante	Columna donde se presenta la falla por cortante antes de la fluencia por flexión. Sin embargo, no hay comportamiento frágil
Muro de cortante	Muro donde se presenta la falla por cortante antes de la fluencia por flexión
Columna frágil	Columna con $h_o/D \leq 2$ (columna corta), o bien columna donde se presenta la falla por cortante frágil, antes de la fluencia por flexión

(i) Cuando no hay columnas con comportamiento frágil.

Cuando no existen columnas con posibilidad de comportamiento frágil, el valor del índice E_o , será el mayor de los calculados conforme las ecuaciones 3.4 y 3.5. Sin embargo, si existe una columna como elemento de segundo orden que esté soportando un gran cortante, se considerará el valor calculado conforme la ecuación 3.5.

$$E_o = \frac{n+1}{n+i} \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + E_3^2} \quad (3.4)$$

donde, $E_1 = C_1 F_1$

$E_2 = C_2 F_2$

$E_3 = C_3 F_3$

C_1 : índice C para el grupo 1 (grupo con el índice F menor)

C_2 : índice C para el grupo 2 (grupo con el índice F medio)

C_3 : índice C para el grupo 3 (grupo con el índice F mayor)

F_1 : índice F para el grupo 1

F_2 : índice F para el grupo 2

F_3 : índice F para el grupo 3

$$E_o = \frac{n+1}{n+i} (C_1 + \alpha_2 C_2 + \alpha_3 C_3) F_1 \quad (3.5)$$

donde, α_2 : (suma de las resistencias de los elementos del segundo grupo cuando se presenta la deformación de capacidad última de los elementos del primer grupo)/(suma de las capacidades últimas de los elementos del segundo grupo); se puede definir conforme a la tabla 3.2.3

α_3 : (suma de las resistencias de los elementos del tercer grupo cuando se presenta la deformación de capacidad última de los elementos del primer grupo)/(suma de las capacidades últimas de los elementos del tercer grupo); se puede definir conforme a la tabla 3.2.4

Tabla 3.2.3 Valores de α_2 para la ecuación 3.5

Grupo 2	Grupo 1	
	Columna frágil	Columna de cortante, muro de cortante
Columna de flexión	0.5	0.7
Muro de flexión	0.7	1.0
Columna de cortante, muro de cortante	0.7	-

Tabla 3.2.4 Valores de α_3 para la ecuación 3.5

Grupo 3	Grupo 1	
	Columna frágil	Columna de cortante, muro de cortante
Columna de flexión	0.5	0.7
Muro de flexión	0.7	1.0
Columna de cortante, muro de cortante	0.7	-

(ii) Cuando hay columnas con comportamiento frágil

Cuando existen columnas con comportamiento frágil, el valor del índice E_o se tomará como el mayor de los valores calculados con las ecuaciones 3.4 y 3.5 considerando la inexistencia de las columnas de comportamiento frágil, y el valor calculado conforme a la ecuación 3.5 considerando la existencia de las columnas frágiles. Cuando no se considera la existencia de las columnas frágiles, el índice de ductilidad para el grupo 1 se considerará el segundo valor más pequeño del obtenido para elementos verticales; modificando así gradualmente los valores para cada grupo de elementos.

Sin embargo, cuando las columnas frágiles sean elementos de segundo orden, el valor del índice E_o será el calculado considerando columna frágil en la ecuación 3.5. También, aunque las columnas de comportamiento frágil no sean elementos de segundo orden, pero existe una columna de cortante como elemento de segundo orden, el valor del índice E_o se tomará como el mayor de los calculados con la ecuación 3.5 considerando la existencia de columnas de comportamiento frágil, y la inexistencia de las mismas.

(iii) Casos especiales

Cuando se calcule el índice S_D , y la relación de excentricidad (e) supere el valor 0.15, definida conforme lo indicado para el índice de forma en el subcapítulo 3.3 para muros estructurales excéntricos, se tomará el valor del índice E_o como el menor de los calculados conforme se indica:

(a) Despreciando la existencia del elemento vertical que da origen a la excentricidad, y calculando el valor de E_o conforme se indica en los incisos (i) y (ii) anteriores.

(b) Despreciando la existencia de la excentricidad, y calculando el valor del índice E_o con la ecuación 3.5. Sin embargo, en este caso el elemento vertical que es el origen de la excentricidad se define como del grupo 1, y elementos verticales con índice de ductilidad F menores a los de elementos definidos como del grupo 1, no se consideran.

3.2.1.3 Cuando se usa el procedimiento de evaluación de tercer nivel

El procedimiento es similar al usado con el procedimiento de segundo nivel, considerando la resistencia de vigas, la capacidad de deformación de los elementos y la resistencia a rotación de muros estructurales, conjuntamente con los conceptos indicados enseguida.

(i) A los cinco tipos de clasificación de mecanismo de falla en elementos verticales presentados en la tabla 2.2.2, se adicionan tres tipos como se indica en la tabla 3.2.5.

(ii) El índice E_o se calculará de manera similar al procedimiento de segundo orden; sin embargo, cuando el comportamiento ante sismo de la estructura está dominado por mecanismos de fluencia por flexión en vigas, por mecanismos de fluencia por flexión en base de muros estructurales o por rotación de los mismos, el índice E_o puede modificarse como se indica

$$E_n' = E_n \frac{2}{3} \frac{2n+1}{n+1} \quad (3.6)$$

donde, n : número de niveles en el edificio.

Tabla 3.2.5 Clasificación de los elementos verticales conforme a su mecanismo de falla para el procedimiento de tercer nivel

Nombre	Descripción
Columna de flexión Muro de flexión Columna de cortante Muro de cortante Columna frágil	Definición conforme la tabla 3 2.2
Columna controlada por falla de flexión en viga	Comportamiento de columna dominado por la falla de flexión en viga previa a su falla por cortante
Columna controlada por la falla de flexión en viga previa a la falla por cortante	Rotación de muro
Columna controlada por cortante en viga	Aparición de rotación en la base del muro previo al fenómeno de fluencia por flexión o falla por cortante

Comentarios

Como se mencionó en los comentarios del subcapítulo 3.1, el índice básico de características de comportamiento y capacidad ante sismo E_n se determina con base en la capacidad última ante fuerza lateral, representado por el índice de resistencia C , y la capacidad de deformación lateral y disipación de energía (mecanismo y configuración de falla), representados por el índice de deformación F . En primer lugar, con el propósito de mostrar de manera general la filosofía de diseño y revisión, se presenta como ejemplo una edificación de un nivel, el cual siempre tendrá la misma configuración o mecanismo de falla; pero variará su capacidad última a carga lateral y su capacidad de deformación lateral.

Según Newmark, cuando las fuerzas restauradoras de un sistema estructural sean de tipo bilineal, la relación entre el coeficiente de cortante basal de la respuesta elástica C_E y la resistencia a la fluencia C_y , considerando la ductilidad de la respuesta sísmica de la estructura μ (definida como la relación entre la respuesta máxima de desplazamientos en comportamiento no lineal d_{max} y el desplazamiento al punto de fluencia d_y), se puede representar aproximadamente con la ecuación (3 2.1) ¹⁾.

$$\frac{C_y}{C_E} = \frac{1}{\sqrt{2\mu-1}} \quad (3.2.1)$$

es decir,

$$C_y \cdot \sqrt{2\mu-1} = C_E \quad (3.2.2)$$

La filosofía básica de la presente norma, debido a que está abocada a edificaciones de concreto reforzado de mediana y baja altura, considera al coeficiente de cortante en la respuesta elástica C_E ; prácticamente constante para edificaciones de periodo corto, por lo que se pueden considerar adecuados los valores de C_y para el índice de resistencia C , el valor de

$\sqrt{2\mu-1}$ para el índice de deformación F . Cuando el mecanismo de falla del sistema estructural es simple y dominado por el primer modo, podrán evaluarse las características de comportamiento ante sismo de una estructura obteniendo el valor de E_o de la ecuación (3.2.3)

$$E_o = C \cdot F \quad (3.2.3)$$

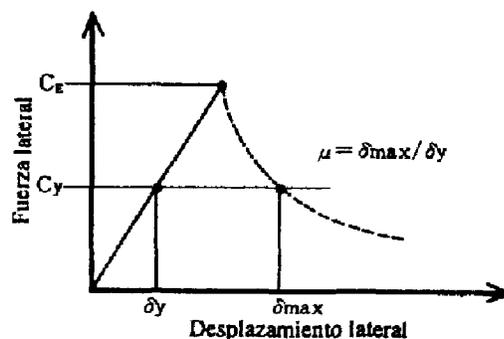


Figura 3.2.1 Respuesta sísmica y resistencia a la fluencia en un modelo bilineal

Por supuesto, los edificios de concreto reforzado que están considerados en la presente norma, no presentan fuerzas restauradoras con características tan simples como el modelo bilineal propuesto; es por eso que como se indica en la sección 3.2.3, considerando la capacidad de deformación y disipación de energía para el mecanismo de falla planteado, se presenta un conjunto de valores para modificar el valor del índice E_o calculado. También, esta filosofía presenta las características de comportamiento ante sismo, de sistemas estructurales cuya respuesta incide en el intervalo de comportamiento inelástico. Se representa las características de comportamiento por medio de la capacidad de deformación y disipación de energía asociada a un valor de resistencia lateral 2)3)4)5)6)7)8). De igual manera, se puede interpretar y evaluar las características de comportamiento ante sismo de un sistema estructural por medio de la energía que en él incide 7)9).

Ahora bien, para sistemas estructurales donde los mecanismos de falla de los diversos elementos son diferentes y varios, así como para el caso de edificaciones de muchos niveles, la filosofía del procedimiento de cálculo del índice E_o , se comenta en los párrafos siguientes.

3.2.1.1 Cuando se usa el procedimiento de evaluación de primer nivel

(i) Cuando se usa el inciso (i) del presente texto.

El procedimiento de evaluación de primer nivel determina el valor del índice E_o con base en el número de muros estructurales así como en el área transversal de columnas, por lo que se considera como un procedimiento aproximado adecuado para edificaciones con una gran cantidad de muros. Por lo tanto, el punto (A) en la figura 3.2.2, correspondiente a la falla del muro, determinará el valor del índice E_o . Para este caso el valor de $F_w=1.0$, por lo que el valor del índice C , será prácticamente el valor del índice E_o para el punto (A).

El término $(n+1)/(n+i)$ empleado en las ecuaciones 3.2 a 3.5 es un factor corrector de la necesidad de tener un mayor valor del índice C en los niveles superiores. En la sección 3.2.1.7 se explicará sobre él mismo. También, la explicación del factor α_1 , se hará en la subsección 3.2.1.5.

(ii) Cuando se usa el inciso (ii) del presente texto

Los conceptos mencionados en este inciso se aplicarán cuando exista un alto riesgo de que se presente una combinación de lo que se definió en la tabla 3.2.1 como falla de cortante en columna corta. Despreciando la influencia de la columna corta, y usando el procedimiento mostrado en el inciso anterior, se puede determinar un punto estándar para el valor del índice E_o (E_{o1}) que se presenta en el punto (A). Cuando se usa la ecuación 3.3 se determina el valor del índice E_o (E_{o2}) para el punto (B). Cuando el valor de E_{o2} es mayor que el de E_{o1} (figura 3.2.3(b)), el valor de E_{o2} será tomado como el valor del índice E_o . Sin embargo, para el caso contrario (figura 3.2.3(a)), existirán dos tipos de determinación y clasificación del índice E_o .

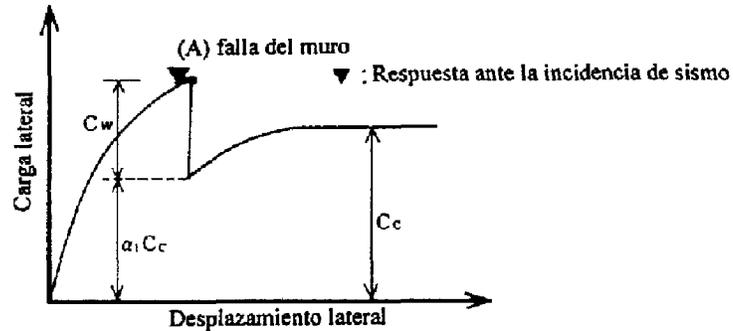


Figura 3.2.2 Cuando el estándar es el punto de falla del muro estructural

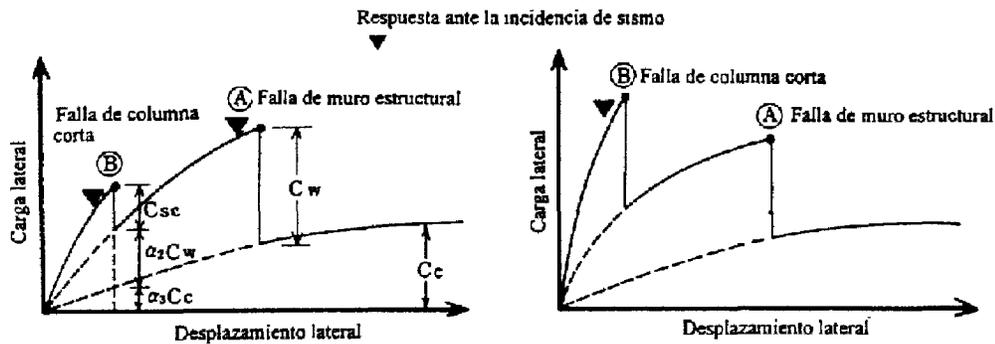


Figura 3.2.3(a) Cuando $E_{o1} \geq E_{o2}$

Figura 3.2.3(b) Cuando $E_{o2} > E_{o1}$

Primero, cuando la columna corta es un elemento secundario, es decir, cuando se presenta la falla en la columna corta ante la incidencia de un sismo, y las cargas verticales que hasta entonces soportaba la misma, no pueden ser soportadas por elementos de la vecindad del elemento fallado (existe debilitamiento de sistemas de piso y trabes, presentándose deformación vertical parcial del sistema de piso; así como, aunque existan elementos en la vecindad que puedan soportar las cargas verticales del sistema de piso, debido a la aplicación de estas cargas axiales se presenta la falla por compresión de los elementos), aunque el valor de E_{o1} sea mayor o igual que el de E_{o2} , el valor del índice E_o se deberá tomar igual al valor de E_{o2} . Sin embargo, cuando la columna corta no es considerada como elemento secundario, podrá determinarse el valor del índice E_o despreciando la presencia de la columna corta.

Ahora bien, la evaluación y determinación de si una columna corta es un elemento secundario, se hará conforme a la explicación de la subsección 3.2.1.4. También, respecto a

los coeficientes α_2 y α_3 , que intervienen en la ecuación 3.3, se comentará sobre ellos en la subsección 3.2.1.5.

3.2.1.2 Cuando se usa el procedimiento de evaluación de segundo nivel

El procedimiento de segundo nivel, parte de las hipótesis de que las vigas son suficientemente fuertes y rígidas, y el método de cálculo de la capacidad última ante fuerzas laterales se obtiene conforme a la resistencia a flexión y cortante de los elementos verticales.

También, en caso de columnas y muros que presentan fluencia por flexión, el valor del índice F , deberá considerar la capacidad de deformación del elemento (ductilidad del mismo) y tratar de asegurar que su valor sea mayor o igual a 1.0.

Cuando se presentan diferentes configuraciones o mecanismos de falla en los elementos verticales (presentándose también diferencias en los valores de los índices F), de igual manera a como se hace para el procedimiento de primer nivel, conforme a la existencia de lo que se define en la tabla 3.2 como columna frágil y elementos secundarios, se tienen dos tipos de métodos (figura 3.2.4)

(i) Cuando no se incluyen a las columnas frágiles y a los elementos secundarios.

Se usarán las ecuaciones 3.4 y 3.5. Con el propósito de mostrar el carácter de la ecuación 3.4, considérese como ejemplo a un sistema estructural con la combinación de columnas de flexión con $F_2=2$, y muros de cortante con $F_1=1$. Se explica sobre la determinación del índice E_o de un nivel del edificio.

La relación entre carga lateral y desplazamiento lateral de esta clase de edificios puede sintetizarse como se indica en la figura 3.2.5. Es decir, el punto (A) representa la falla por cortante del muro, el punto (B) representa la fluencia en la columna de flexión, y el punto (C) representa el estado en que la columna de flexión alcanza su capacidad última de deformación. Para este caso, la relación entre la ductilidad de la columna y el índice F de la misma, se determinará conforme a la ecuación 3.20 presentada en el cuerpo de la norma. Es decir, en el punto (A) se presenta la falla del muro de cortante, en el punto (B) se presenta la fluencia por flexión en columnas de flexión, y en el punto (C) se alcanza la deformación última en columnas de flexión. La relación entre el coeficiente de ductilidad y el índice F , para este caso, se puede determinar con base en la ecuación 3.20 del presente cuerpo. Es decir, el valor de $F_2=2$ para el estado de deformación límite de la columna, resulta 1.8 veces la deformación a la fluencia de la misma. Donde, se consideró que para los dos tipos de edificios, el valor del índice E_o es igual.

Edificio I: $F_1=1$ sistema estructural conformado básicamente por muros de cortante, $C_1=0.9$ para este edificio. Para este caso, $E_{oI}=0.9 \times 1=0.9$

Edificio II: $F_2=2$ sistema estructural conformado básicamente por columnas de flexión, $C_2=0.45$ para este edificio. Para este caso, $E_{oII}=0.45 \times 2=0.9$

Ahora, se puede pensar en un muro que presente las mismas características del edificio I y en una columna que tenga las mismas características del edificio II, además piénsese en un edificio III con un valor del índice $E_o=0.9$.

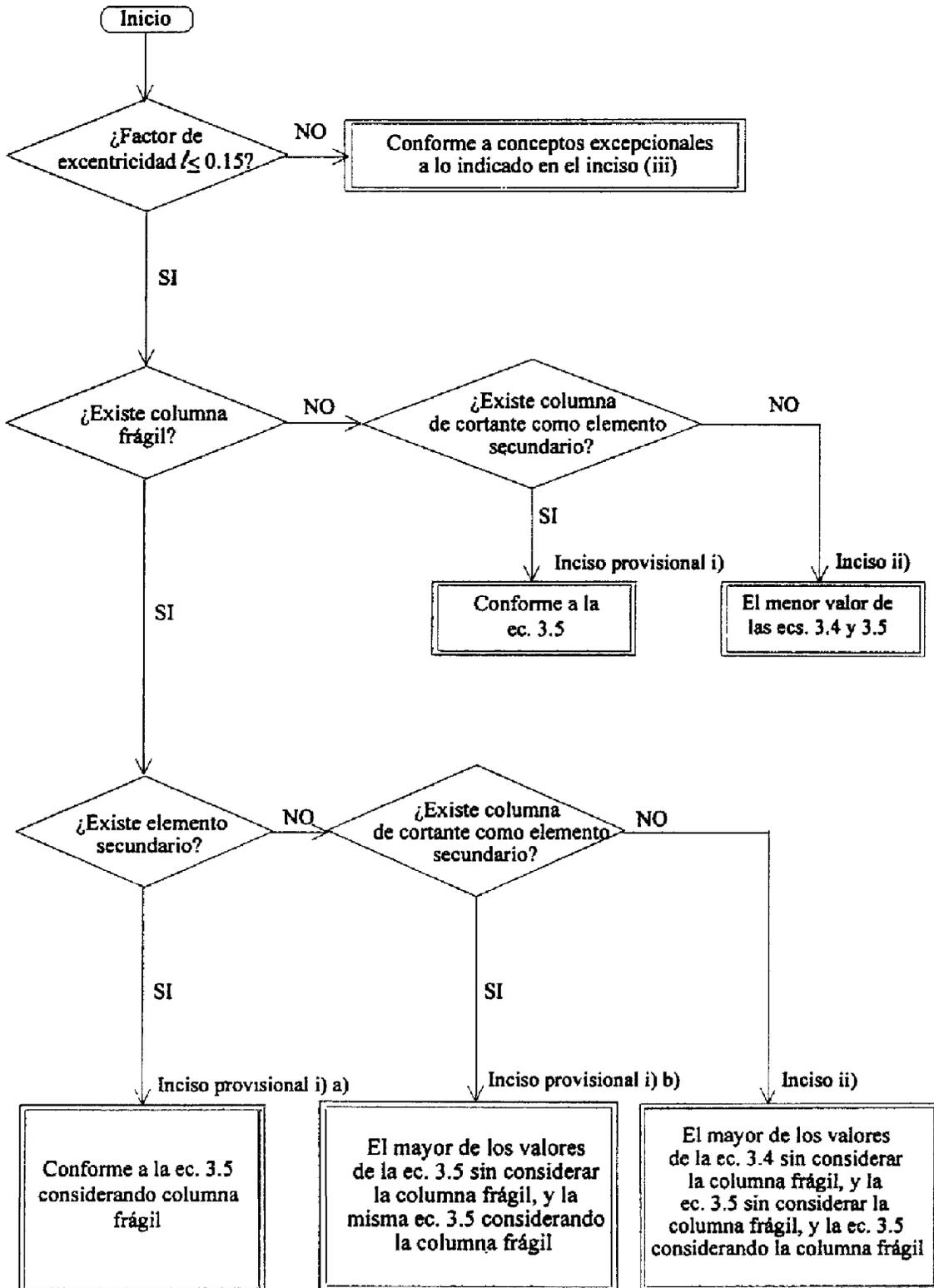


Figura 3.2.4 Diagrama de flujo del método de cálculo de E_o cuando se usa el procedimiento de segundo nivel

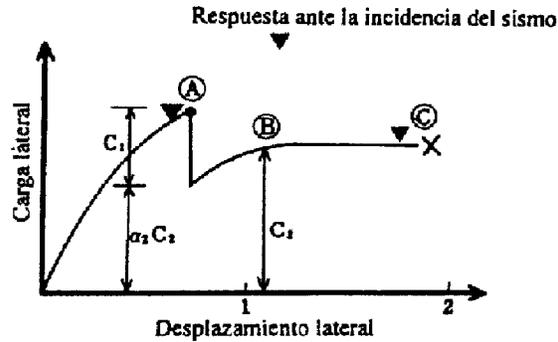


Figura 3.2.5 Índice E_o de un edificio con columnas de flexión y muros de cortante

Finalmente, la resistencia del sistema de muros únicamente será menor que la del edificio I, y la resistencia del sistema de columnas únicamente será menor que la del edificio II; donde C_1 = Capacidad a cortante del sistema de muros/peso total de la estructura, y C_2 = Capacidad a cortante del sistema de columnas/peso total de la estructura. También, se hará $E_1 = (C_1)F_1$ y $E_2 = (C_2)F_2$. En la figura 3.2.6(a) se muestra en el eje vertical el índice de resistencia de las columnas de flexión, y en el eje horizontal el índice de resistencia de los muros de cortante.

Las características del edificio III, serán determinadas de igual manera que los edificios I y II, calculando las propiedades las fuerzas restauradoras y de respuesta del sistema como las mostradas en la figura 3.2.5, o bien puede hacerse una clasificación en el plano del índice de resistencia C , de manera de definir como estándar a cualquiera de las relaciones 1 o 3, y tratar de determinar las características del edificio III como un punto medio de éstas. Sin embargo, con base en resultados de investigaciones recientes, la relación entre los índices de resistencia de sistemas de muros y columnas, se aproxima más a la elipse identificada con el número 2 dentro de la figura 3.2.6(a).^{10) 11) 12)}

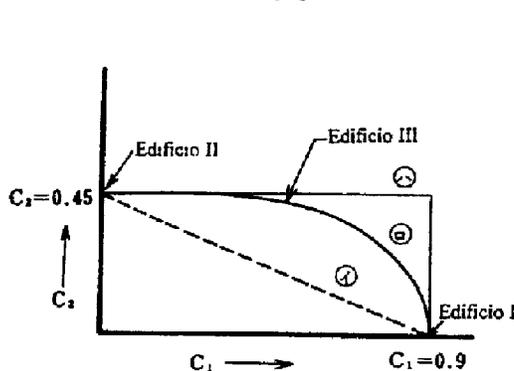


Figura 3.2.6(a) [plano del índice C]

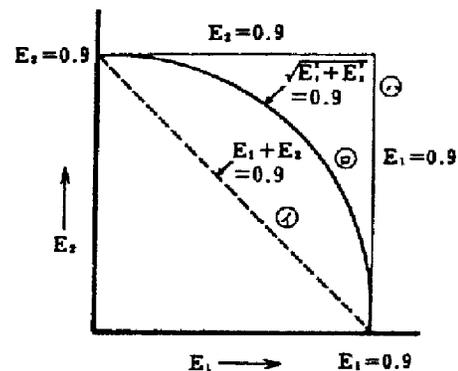


Figura 3.2.6(b) [plano del índice E]

Por ejemplo, considérese un sistema estructural en el que las características de las fuerzas restauradoras de las columnas pueda representarse por un modelo histerético trilineal con degradación de rigidez, y las características de las fuerzas restauradoras de los muros pueda representarse por un modelo histerético trilineal con rigidez orientada al origen. Considerando estos dos modelos y estableciendo el modelo que representa a la ecuación del movimiento del sistema, resolviendo éste para una excitación sísmica incidente y obteniendo las respuestas máximas de desplazamiento, se puede dibujar el contorno de las mismas como se

muestra en la figura 3.2.7. La respuesta de desplazamientos máximos, tratando que estos presenten una ductilidad de desplazamiento constante, se asemeja notablemente a una elipse; con respecto a las estructuras con gran densidad de muros, el índice E_0 representa el punto de colapso del mismo.¹⁰ También, para las mismas edificaciones presentadas en la figura 3.2.6(a), se presenta el contorno de índices E_0 en la figura 3.2.6(b); las edificaciones con valores iguales de E_0 dentro de la figura se representan con el semicírculo que tiene el número 2, el radio de este semicírculo representa los valores del índice E_0 . La ecuación 3.4, representa este tipo de comportamiento, considerando la existencia de tres tipos de elementos verticales dentro de un mismo sistema estructural. Sin embargo, para el tipo de filosofía en que se sustenta la ecuación 3.4, donde se supone aplicable la consideración de los tres tipos de elementos estructurales dentro de un mismo sistema, requiere de una investigación y estudio posterior para clarificar una serie de aspectos relacionados con la confiabilidad de su empleo.

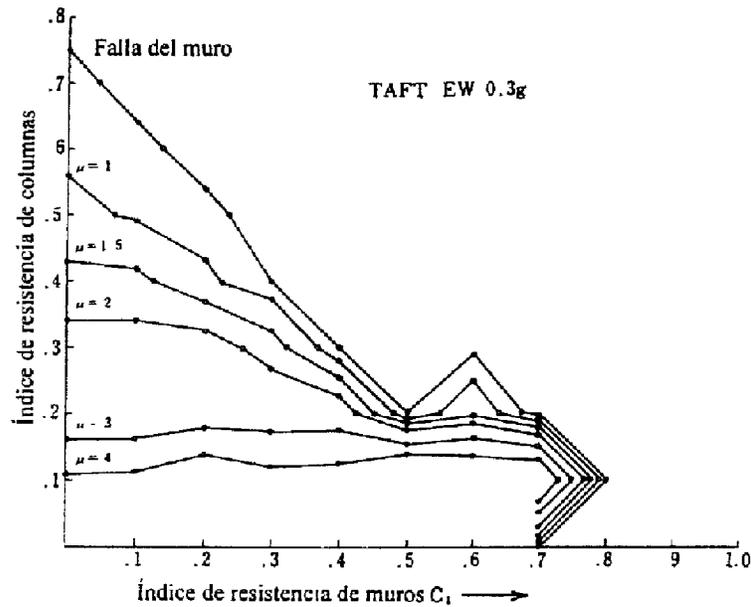


Figura 3.2.7(a) Relación de la respuesta ante sismo de muros y columnas(1) (ref. 10)

Continuando con el mismo tipo de ejemplos, y aplicando la ecuación 3.5 para cuando el edificio estándar es tipo III, será necesario pensar en los niveles a requerir para los índices C de las columnas y muros que componen el sistema estructural.

Primero, para este caso se define $C_3=0$ dentro de la ecuación 3.5, quedando el término del lado derecho de la ecuación como $(C_1+\alpha_2C_2)$. Este valor, representa el coeficiente de capacidad de carga cortante lateral del edificio representado por el punto (A) en la figura 3.2.5. También, el valor de F_1 representa el índice de capacidad de deformación cuando se asume al mismo punto (A) como el que define la falla del edificio, por lo que empleando la ecuación 3.5, la evaluación del índice E_0 se hará en el mismo punto (A), teniendo un carácter igual a la ecuación 3.2 del procedimiento de primer nivel.

Por otra parte, aunque no es necesario mencionarlo, en la figura 3.2.5 el uso de la ecuación 3.4, considerando admisible la falla de los muros estructurales, podría determinar el valor del índice E_0 para el punto (C).

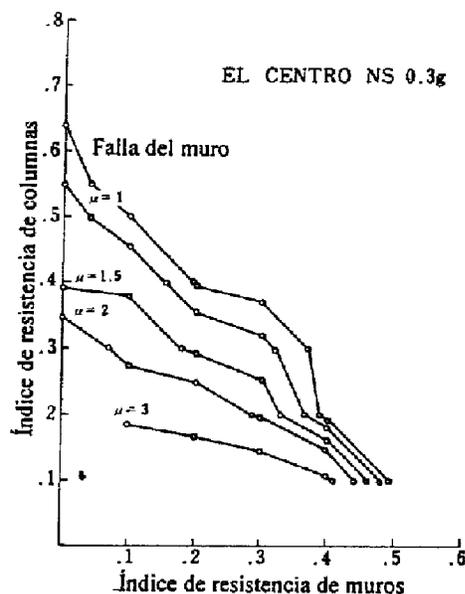


Figura 3.2.7(b) Relación de la respuesta ante sismo de muros y columnas(2)
(ref. 10)

Una relación comparativa del valor de los índices de C se muestra en la figura 3.2.8. Con base en la figura, el punto (M) constituye una frontera, respecto a la cual si el valor del índice C de los muros resulta mayor (para el caso de gran densidad de muros), el valor del índice E_o , determinado con base en la ecuación 3.5, resultará mayor que el valor determinado con la ecuación 3.4. Para el caso de densidad de muros baja, el patrón de comportamiento de los índices E_o , según la ecuación usada, es contrario.

En la presente norma, se empleará el mayor de los valores del índice E_o calculado con las ecuaciones 3.4 y 3.5. En el caso de edificios con una densidad baja de muros, el valor del índice E_o estará controlado por el punto (C) de la figura 3.2.5; es decir, se evalúa las características de comportamiento ante sismo de la estructura con base en el límite de deformación de la columna de flexión. En el caso de edificios con una densidad alta de muros, el valor del mismo índice estará controlado por el punto (A); es decir, se puede pensar que se evaluará con base en la capacidad última del muro estructural. De la misma figura 3.2.8, se puede notar que para el caso de edificios con gran densidad de muros, el uso de la ecuación 3.4 repercute en un resultado del lado de la seguridad respecto al obtenido si se usa la ecuación 3.5; por lo que para sistemas estructurales donde intervengan elementos secundarios, en principio se considera posible el uso de la ecuación 3.4.

(ii) Cuando existen columnas frágiles

Cuando se tiene una columna de pequeña dimensión vertical respecto a la horizontal, se define como columna frágil debido a la tendencia de falla por cortante antes que la falla por flexión. Para edificaciones donde se tiene este tipo de columnas, el procedimiento de evaluación de segundo nivel será ejecutado como se indica enseguida. En estos comentarios no se menciona sobre todos los aspectos y conceptos que contempla la norma, se trata de presentar explicaciones sobre los casos representativos de cada fenómeno y procedimiento de

evaluación. El proceso de aplicación formal, se puede observar en la figura 3.2.4 donde se presenta el diagrama de flujo para el cálculo del índice E_o según el procedimiento de evaluación de segundo nivel.

Como ejemplo, considérese un edificio conformado por columnas frágiles, muros de cortante y columnas de flexión. La relación entre la carga lateral y el desplazamiento lateral de este tipo de edificaciones se supone como se muestra en la figura 3.2.9 del presente texto.

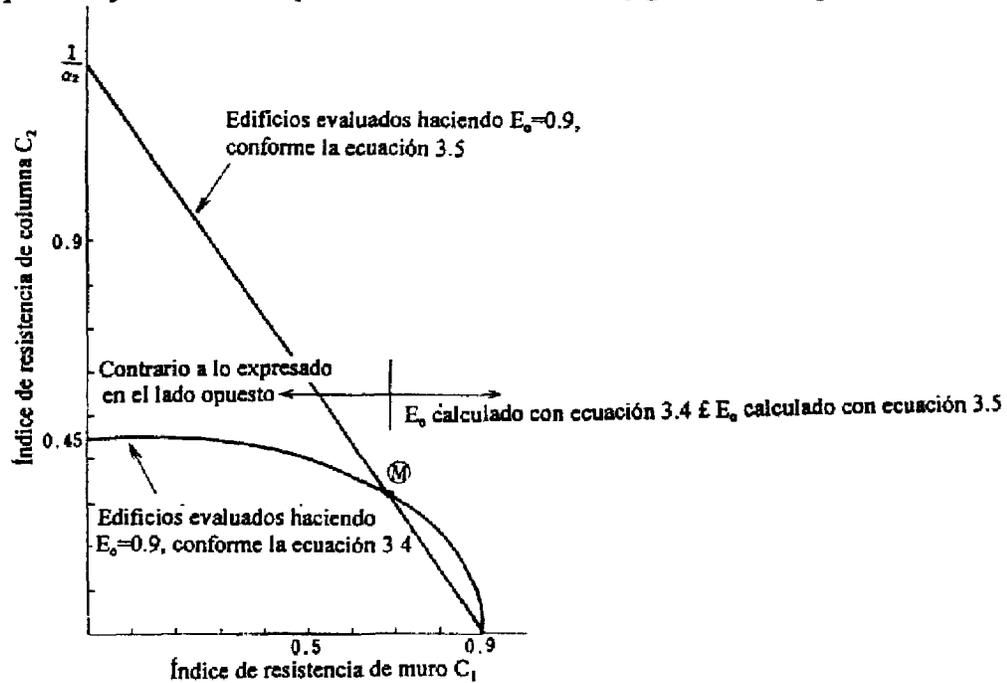


Figura 3.2.8 Comparación de los valores de C calculados con las ecs. 3.4 y 3.5

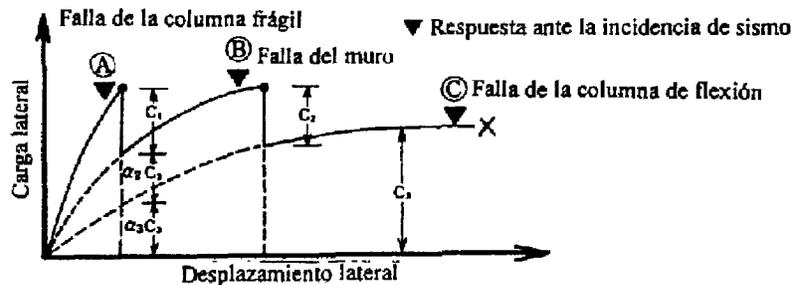


Figura 3.2.9 Índice E_o de edificio conformado por columnas frágiles, muros de cortante y columnas de flexión

Generalmente, para el valor del índice E_o de una edificación se considerará como el mayor de los valores de E_o calculados para cada una de las condiciones representadas por los puntos (A), (B) y (C) de la figura 3.2.9. Es decir, se considerará al mayor de los valores del índice E_o calculado considerando la falla de la columna frágil; o considerando como estándar cualquiera de los estados de la estructura en los puntos (B) y (C). En otro orden de ideas, aun con la existencia de columnas frágiles y muros de cortante, pero en pequeña cantidad, las características de comportamiento del edificio estarán dominadas por el comportamiento de las columnas de flexión, considerándose admisible la falla de columnas frágiles y muros de

cortante, y básicamente se puede pensar que la evaluación de las características de comportamiento del edificio se determinará cuando las columnas de flexión alcancen la deformación última admisible. También, contrariamente, si la cantidad de columnas de comportamiento frágil es grande y la resistencia es suficiente, la evaluación de las características de comportamiento ante sismo del edificio se hará considerando la condición definida en el punto de falla de las columnas frágiles. Con base en la filosofía antes mencionada, la presente norma propone el cálculo del valor del índice E_o para el punto (C) de la figura 3.2.9, empleando la ecuación 3.4 y despreciando la existencia de columnas frágiles; empleando la ecuación 3.5 para el punto (B) y despreciando también la existencia de columnas frágiles; y finalmente, empleando la ecuación 3.5 para el punto (A) y considerando la existencia de columnas frágiles.

Sin embargo, de igual manera a cuando se emplea el procedimiento de primer nivel, cuando se tenga el punto de condición por falla de la columna frágil, y se pierde capacidad de soporte de cargas verticales, presentándose riesgo de deformación y caída de losas, aunque el número de elementos de columnas frágiles sea pequeño, y aunque se mantenga una capacidad de resistir fuerzas laterales con los muros de cortante y columnas de flexión restantes, será necesario evaluar la características de comportamiento ante sismo del edificio en el punto de la condición de falla de las columnas frágiles. Por lo tanto, considerando las propuestas de la norma, necesariamente se deberán considerar las columnas frágiles para el cálculo del índice según la ecuación 3.5. A este tipo de elementos, al igual que para el procedimiento de primer nivel, se les denomina elementos secundarios; se ahondará la explicación sobre éstos en la sección 3.2.1.4. También, cuando se tienen muros excéntricos, la forma de su consideración se comentará en la sección 3.2.1.6.

(iii) Comparación de la presente norma con otras normas

Respecto a los procedimientos de evaluación de edificios donde se presentan mecanismos de falla diferentes y combinados, se pueden consultar y obtener algunas recomendaciones de las referencias 6, 7, 9, 10, 11 y 12. La comparación con la presente norma se hará con las propuestas de las referencias 6 y 9, considerando como ejemplo un edificio con dos tipos de mecanismos de falla de elementos y, por tanto, dos valores diferentes de F ; los resultados se muestran en la figura 3.2.10. En este caso se asume un valor de 2 para la primera clase del índice F de una columna de flexión, y el valor del índice E_o se tomará igual a 0.9.

Es decir, la figura 3.2.10 representa el conjunto de valores del índice C , para iguales valores del índice E_o del edificio. El objetivo principal de la figura es hacer una comparación resumida de diferentes métodos de evaluación, para lo que se calculan valores del índice E_o para cada procedimiento tratando que fuera igual al valor de la presente norma. También, es preciso observar que los valores en los puntos (A) y (B) de la figura, no necesariamente corresponden con el valor de la norma. Con base en la comparación presentada en la figura 3.2.10, la presente norma presenta un comportamiento similar a la propuesta de la referencia 6, cuando no existen elementos secundarios; y presenta un comportamiento similar a la propuesta de la referencia 9 cuando existen elementos secundarios.

3.2.1.3 Cuando se emplea el procedimiento de evaluación de tercer nivel

Cuando se emplea el procedimiento de tercer nivel, se deberá considerar la naturaleza de la fluencia por flexión y la falla por cortante en las vigas en el comportamiento ante carga lateral de las columnas sustentantes; así como la naturaleza de los efectos de rotación de la estructura de cimentación en los muros estructurales que se apoyan en la misma. Sin embargo, la filosofía de evaluación es prácticamente la misma que la mencionada para el procedimiento de segundo nivel. En estos casos, el cálculo del índice C se determinará en una etapa anterior al alcance de la capacidad última de flexión y cortante de columnas y muros estructurales; por lo que el valor del índice C obtenido, será menor que el valor del índice obtenido conforma el procedimiento de segundo nivel, considerando a la viga infinitamente resistente y además que no se presenta rotación en la estructura de cimentación. Igualmente, en este tipo de columnas y muros estructurales, se piensa que su capacidad a deformación se incrementa respecto de los elementos columnas y muros comunes en los que se alcanza la capacidad última por flexión o cortante. En estos casos, el cálculo del índice de capacidad de deformación, F , indicado en el subcapítulo 3.2.3, reportará un resultado de evaluación mayor que para los otros tipos de casos, y como se comentará posteriormente en la sección 3.2.1.7, se puede pensar que se presenta un mecanismo de colapso adecuado o deseado.

3.2.1.4 Clasificación de los elementos estructurales secundarios

(i) Lo que se menciona en este texto como elementos secundarios (o sistemas estructurales secundarios), se señalan como elementos estructurales que aunque presenten falla, el sistema estructural en su conjunto mantiene capacidad de soportar fuerza lateral; sin embargo, no existe un elemento en la vecindad que pueda soportar las cargas verticales que soportaban éstos.

Lo que se considera como elementos secundarios son básicamente elementos verticales; si se desea elaborar una clasificación general es una labor realmente difícil. Sin embargo, de daños en sismos pasados se han presentado algunas filosofías que pueden considerarse como referencias confiables; éstas se presentan enseguida.

(a) Para el caso de muros de cortante, aunque se presente la falla ante cargas laterales, se puede asumir que se mantiene la capacidad de soportar fuerzas verticales. Esta hipótesis es vagamente insegura, sin embargo, cuando se ha perdido la capacidad de soportar cargas verticales por una falla total por cortante en muros y columnas, el valor del índice E_o del edificio en su conjunto será muy bajo, por lo que se puede pensar que aun considerando este tipo de hipótesis, los daños reales serán menores.

(b) Cuando se tienen columnas de cortante, especialmente columnas con relación h_c/D menor o igual a 2.0, cuando se presenta la pérdida de capacidad de carga lateral, se presenta en la mayoría de los casos al mismo tiempo la pérdida de capacidad de carga vertical. Por lo que se considera necesario la evaluación y/o discriminación de los elementos estructurales, como elementos estructurales secundarios. En cuanto al procedimiento de primer nivel, para el caso de columnas cortas con relación h_c/D menor o igual a 2.0; o bien, en cuanto al procedimiento de segundo nivel, en el cual se consideren columnas cortas o columnas frágiles únicamente, (por las razones antes presentadas) se deberá realizar una clasificación de elementos estructurales secundarios. Tomando en cuenta la situación real de cualquier sistema estructural de este tipo, o todos los demás elementos verticales, por supuesto se puede presentar la necesidad de considerarlos como a los elementos antes mencionados. Ahora bien, la necesidad de establecer una distinción sobre la existencia de elementos estructurales