

CAPITULO A.4

METODO DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE

A.4.0 - NOMENCLATURA

- A_c = suma de las áreas efectivas de los muros estructurales en el primer nivel de la estructura, en la dirección en estudio, en m^2 . Véase A.4.2.
- A_e = área mínima de cortante de la sección de un muro estructural, medida en un plano horizontal, en el primer nivel de la estructura y en la dirección en estudio, en m^2 . Véase A.4.2.
- C_t = coeficiente utilizado para calcular el período de la estructura, definido en A.4.2.2
- C_{vs} = coeficiente definido en A.4.3.
- D_e = longitud medida horizontalmente, en metros, de un muro estructural en el primer nivel de la estructura y en la dirección en estudio. Véase A.4.2.
- F_i, F_x = fuerzas sísmicas horizontales en los niveles i o x respectivamente. Véase A.4.3.
- f_i = fuerza sísmica horizontal en el nivel i para ser utilizada en la ecuación A.4-1
- g = aceleración debida a la gravedad (9.8 m/s^2).
- h_i, h_x = altura en metros, medida desde la base, del nivel i o x . Véase A.4.3.2.
- h_n = altura en metros, medida desde la base, del piso más alto del edificio. Véase A.4.2.2.
- I = coeficiente de importancia dado en A.2.5.2.
- k = exponente relacionado con el período fundamental de la edificación dado en A.4.3.2.
- M = masa total de la edificación - M debe ser igual a la masa total de la estructura más la masa de aquellos elementos tales como muros divisorios y particiones, equipos permanentes, tanques y sus contenidos, etc. En depósitos o bodegas debe incluirse además un 25 por ciento de la masa correspondiente a los elementos que causan la carga viva del piso. Capítulos A.4 y A.5 (en kg).
- m_i, m_x = parte de M que está colocada en el nivel i o x respectivamente
- S_d = valor del espectro de aceleraciones de diseño para un período de vibración dado. Máxima aceleración horizontal de diseño, expresada como una fracción de la aceleración de la gravedad, para un sistema de un grado de libertad con un período de vibración T . Está definido en A.2.6.
- T = período fundamental del edificio como se determina en A.4.2.
- T_s = período de vibración fundamental aproximado. Véase A.4.2
- V_s = cortante sísmico en la base, para las fuerzas sísmicas. Véase A.4.3
- δ_i = desplazamiento horizontal del nivel i con respecto a la base de la estructura, debido a las fuerzas horizontales f_i , para ser utilizado en la ecuación A.4-1.

A.4.1 - GENERAL

A.4.1.1 - Los requisitos de este Capítulo controlan la obtención de las fuerzas sísmicas horizontales de la edificación y el análisis sísmico de la misma, de acuerdo con los requisitos dados en el Capítulo A.3 para la utilización del método de la fuerza horizontal equivalente.

A.4.2 - PERIODO FUNDAMENTAL DE LA EDIFICACION

A.4.2.1 - El valor del período fundamental de la edificación, T , debe obtenerse a partir de las propiedades de su sistema de resistencia sísmica, en la dirección bajo consideración, de acuerdo con los principios de la dinámica estructural, utilizando un modelo matemático linealmente elástico de la estructura. Este requisito puede suplirse por medio del uso de la siguiente ecuación:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i \delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (r_i \delta_i)}} \quad (\text{A.4-1})$$

Los valores de f_i representan unas fuerzas horizontales distribuidas aproximadamente de acuerdo con las ecuaciones A.4-6 y A.4-7, o utilizando cualquier otra distribución racional que se aproxime a la del modo fundamental de la estructura en la dirección en estudio. Las deflexiones horizontales, δ_i , deben calcularse utilizando las fuerzas horizontales f_i . El valor de T no puede exceder $1.2T_n$, donde T_n se calcula de acuerdo con la ecuación A.4-2.

A.4.2.2 - Alternativamente el valor de T puede ser igual al período fundamental aproximado, T_n , que se obtenga por medio de la ecuación A.4-2.

$$T_n = C_t h_n^{3/4} \quad (\text{A.4-2})$$

donde C_t toma los siguientes valores:

$C_t = 0.08$ para pórticos resistentes a momentos de concreto reforzado y para pórticos de acero estructural con diagonales excéntricas

$C_t = 0.09$ para pórticos resistentes a momentos de acero estructural.

$C_t = 0.05$ para los otros tipos de sistema de resistencia sísmica.

Alternativamente, el valor de C_t para estructuras que tengan muros estructurales de concreto reforzado o mampostería estructural, puede calcularse por medio de la ecuación A.4-3:

$$C_t = \frac{0.075}{\sqrt{A_c}} \quad (\text{A.4-3})$$

y el valor de A_c puede determinarse por medio de la ecuación A.4-4:

$$A_c = \sum \left[A_e \left[0.2 + \left(\frac{D_e}{h_n} \right)^2 \right] \right] \quad (\text{A.4-4})$$

El valor de D_e/h_n utilizado en la ecuación A.4-4 no debe exceder 0.9

A.4.3 - FUERZAS SÍSMICAS HORIZONTALES EQUIVALENTES

A.4.3.1 - El cortante sísmico en la base, V_s , equivalente a la totalidad de los efectos inerciales horizontales producidos por los movimientos sísmicos de diseño, en la dirección en estudio, se obtiene por medio de la siguiente ecuación.

$$V_s = S_a g M \quad (\text{A.4-5})$$

El valor de S_a en la ecuación anterior corresponde al valor de la aceleración, como fracción de la de la gravedad, leída en el espectro definido en A.2.6 para el período T de la edificación.

A.4.3.2 - La fuerza sísmica horizontal, F_x , en cualquier nivel x , para la dirección en estudio, debe determinarse usando la siguiente ecuación:

$$F_x = C_{vx} V_s \quad (\text{A.4-6})$$

y

$$C_{vx} = \frac{m_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n (m_i h_i^k)} \quad (\text{A.4-7})$$

donde k es un exponente relacionado con el período fundamental, T , de la edificación de la siguiente manera:

- (a) para T menor o igual a 0.5 segundos, $k = 1.0$,
- (b) para T entre 0.5 y 2.5 segundos, $k = 0.75 + 0.5 T$, y
- (c) para T mayor que 2.5 segundos, $k = 2.0$.

A.4.4 - ANALISIS DE LA ESTRUCTURA

A.4.4.1 - El efecto de las fuerzas sísmicas, obtenidas de acuerdo con los requisitos de A 4.3, correspondientes a cada nivel, debe evaluarse por medio de un análisis realizado utilizando un modelo matemático linealmente elástico de la estructura, que represente adecuadamente las características del sistema estructural. El análisis, realizado de acuerdo con los principios de la mecánica estructural, debe tenerse en cuenta, como mínimo.

- (a) las condiciones de apoyo de la estructura, especialmente cuando se combinen elementos verticales de resistencia sísmica con diferencias apreciables en su rigidez,
- (b) el efecto de diafragma, rígido o flexible, de los entrepisos de la edificación, en la distribución del cortante sísmico del piso a los elementos verticales del sistema estructural de resistencia sísmica,
- (c) las variaciones en las fuerzas axiales de los elementos verticales del sistema de resistencia sísmica causadas por los momentos de vuelco que inducen las fuerzas sísmicas,
- (d) los efectos torsionales prescritos en A 3 6 7,
- (e) los efectos de la dirección de aplicación de la fuerza sísmica prescritos en A.3.6 3,
- (f) en estructuras de concreto reforzado y mampostería estructural a juicio del ingeniero diseñador, consideraciones acerca del grado de fisuración de los elementos, compatibles con las fuerzas sísmicas y el grado de capacidad de disipación de energía prescrito para el material estructural, y
- (g) deben consultarse lo requisitos de A 3 4 3

A.4.4.2 - Como resultados del análisis se deben obtener, como mínimo:

- (a) los desplazamientos horizontales de la estructura, incluyendo los efectos torsionales, que se emplean para evaluar si las derivas de la estructura cumplen los requisitos dados en el Capítulo A 6,
- (b) la distribución del cortante de piso, incluyendo los efectos torsionales, a todos los elementos verticales del sistema de resistencia sísmica,
- (c) los efectos de las fuerzas sísmicas en la cimentación de la edificación, y
- (d) las fuerzas internas (momentos flectores, fuerzas cortantes, fuerzas axiales y momentos de torsión) correspondientes a cada elemento que haga parte del sistema de resistencia sísmica

A.4.5 – USO DEL SISTEMA INTERNACIONAL DE MEDIDAS (SI) EN EL CALCULO DE LAS FUERZAS SISMICAS DE ACUERDO CON ESTE CAPITULO

En el Sistema Internacional de Medidas (SI) el kg (kilogramo) es una unidad de masa, por lo tanto la masa de la estructura se debe expresar en kg. Aplicando la 2ª Ley de Newton que dice que la fuerza inercial es igual a la masa del cuerpo multiplicada por su aceleración, si la masa esta sometida a una aceleración en m/s^2 , se obtiene una fuerza cuyas unidades son $(kg \cdot m / s^2)$. Por definición, en el sistema SI la unidad de fuerza es un newton (N) y corresponde a la fuerza inercial de una masa de 1 kg sometida a una aceleración de $1 m/s^2$ ($1 N = 1 kg \cdot 1 m/s^2$). Entonces, si la masa se expresa en kg y las aceleraciones en m/s^2 , se obtiene fuerzas inerciales en newtons

La ecuación A 4-5 es una aplicación de la 2ª Ley de Newton y se emplea para determinar las fuerzas inerciales horizontales que producen los movimientos del terreno causados por el sismo de diseño. El valor de la aceleración horizontal máxima que tiene el terreno donde se apoya la estructura, se lee del espectro de aceleraciones S_a , definido en el Capítulo A 2 para el período fundamental de vibración de la estructura T. El espectro S_a es adimensional, y corresponde a la aceleración horizontal que impone el sismo en la base de la estructura, expresada como una fracción de la gravedad, por lo tanto para obtener la aceleración en m/s^2 , debe multiplicarse por la aceleración de la gravedad, g ($g = 9.8 m/s^2$). Al utilizar la ecuación A 4-5, si la masa total de la edificación, M, se expresa en kg, entonces la totalidad de las fuerzas inerciales horizontales que actúan sobre la estructura cuando ésta se ve sometida al sismo de diseño, V_s , se obtiene en newtons así

$$V_s = S_a \cdot g (m/s^2) \cdot M (kg) = S_a \cdot g \cdot M (kg \cdot m/s^2) = S_a \cdot g \cdot M (N)$$

Pero en el diseño práctico de edificaciones, tanto el kg como el N, son unidades muy pequeñas, por esta razón es conveniente expresar la masa en Mg (Megagramos, $1 Mg = 1\,000\,kg = 10^6\,g$). En este caso la aplicación de la

ecuación A.4-5 conduce a una fuerza, V_s , en kN (kilonewtons):

$$V_s = S_a \cdot g \cdot M \text{ (Mg)} = S_a \cdot g \cdot M \text{ (Mg} \cdot \text{m/s}^2) = S_a \cdot g \cdot M \text{ (1000} \cdot \text{kg} \cdot \text{m/s}^2) = S_a \cdot g \cdot M \text{ (1000} \cdot \text{N)} = S_a \cdot g \cdot M \text{ (kN)}$$

A modo de referencia, en el antiguo sistema mks (m-kgf-s, metro-kilogramo fuerza-segundo) $1 \text{ kgf} = 9.8 \text{ N} \cong 10 \text{ N}$, y análogamente $1\,000 \text{ kgf} = 1 \text{ ton} = 9\,806.65 \text{ N} \cong 10\,000 \text{ N} = 10 \text{ kN}$. Entonces un kN es aproximadamente un décimo de tonelada.

■

CAPITULO A.5 METODO DEL ANALISIS DINAMICO

A.5.0 - NOMENCLATURA

E	=	fuerzas sísmicas reducidas de diseño ($E = F_s / R$)
F_s	=	fuerzas sísmicas, véase A.3.1.1.
g	=	aceleración debida a la gravedad (9.8 m/s^2)
M	=	masa total de la edificación - M debe ser igual a la masa total de la estructura más la masa de aquellos elementos tales como muros divisorios y particiones, equipos permanentes, tanques y sus contenidos, etc. En depósitos o bodegas debe incluirse además un 25 por ciento de la masa correspondiente a los elementos que causan la carga viva del piso. Capítulos A.4 y A.5 (en kg).
$\bar{M}_j$	=	masa actuante total de la edificación en la dirección j . Ecuación A.5-1.
$\bar{M}_m$	=	masa efectiva modal del modo m , determinada de acuerdo con la ecuación A.5-2.
m_i, m_x	=	parte de M que está colocada en el nivel i o x , respectivamente.
p	=	número total de modos utilizado en el análisis modal de la estructura.
R_0	=	coeficiente de capacidad de disipación de energía básico definido para cada sistema estructural y cada grado de capacidad de disipación de energía del material estructural. Capítulo A.3.
R	=	coeficiente de capacidad de disipación de energía para ser empleado en el diseño, corresponde al coeficiente de disipación de energía básico multiplicado por los coeficientes de reducción de capacidad de disipación de energía por irregularidades en altura y en planta ($R = \phi_s \phi_p R_0$).
S_{am}	=	valor del espectro de aceleraciones de diseño para el período de vibración T_m , correspondiente al modo de vibración m
T_s	=	período de vibración fundamental aproximado, en segundos, calculado de acuerdo con A.4.2.
T_m	=	período de vibración correspondiente al modo de vibración m , en s.
V_{mj}	=	cortante sísmico en la base correspondiente al modo m en la dirección horizontal j .
V_{ij}	=	cortante sísmico en la base total en la dirección horizontal j
ϕ_{ij}^m	=	amplitud de desplazamiento del nivel i , en la dirección j , cuando está vibrando en el modo m .

A.5.1 - GENERAL

A.5.1.1 - Los métodos de análisis dinámico deben cumplir los requisitos de este Capítulo y los demás del presente título del Reglamento.

A.5.1.2 - Los métodos de análisis dinámico pueden utilizarse en el diseño sísmico de todas las edificaciones cubiertas por este Reglamento y deben utilizarse en el diseño de las edificaciones indicadas en A 3 4.2.2.

A.5.1.3 - Los resultados obtenidos utilizando los métodos de análisis dinámico deben ajustarse a los valores mínimos prescritos en este Capítulo para cada uno de ellos. Los valores mínimos a los cuales deben ajustarse, están referidos a los valores que se obtienen utilizando el método de la fuerza horizontal equivalente presentado en el Capítulo A.4 (Véase A.5.4.5)

A.5.1.4 - Todas las metodologías de análisis dinámico que se utilicen deben estar basadas en principios establecidos de la mecánica estructural, que estén adecuadamente sustentados analítica o experimentalmente.

A.5.1.5 - El ingeniero diseñador debe asegurarse que los procedimientos de análisis dinámico, manuales o electrónicos, que utilice, cumplen los principios de la mecánica estructural y en especial los requisitos del presente Capítulo. El Reglamento no exige un procedimiento determinado y deja en manos del diseñador su selección y por ende la responsabilidad de que se cumplan los principios enunciados aquí. Es responsabilidad del diseñador garantizar que los procedimientos electrónicos, si son utilizados, describan adecuadamente la respuesta dinámica de la estructura tal como la prescriben los requisitos del presente Capítulo.

A.5.2 - MODELO MATEMATICO

A.5.2.1 - MODELO MATEMATICO A EMPLEAR - El modelo matemático de la estructura debe describir la distribución espacial de la masa y la rigidez, de tal manera que sea adecuado para calcular las características relevantes de la respuesta dinámica de la misma. Como mínimo deben utilizarse los siguientes procedimientos:

A.5.2.1.1 - Modelo tridimensional con diafragma rígido - En este tipo de modelo los entrepisos se consideran diafragmas infinitamente rígidos en su propio plano. La masa de cada diafragma se considera concentrada en su centro de masa. Los efectos torsionales accidentales pueden ser incluidos haciendo ajustes apropiados en la localización de los centros de masa de los diafragmas. Los efectos direccionales pueden ser tomados en cuenta a través de las componentes apropiadas de los desplazamientos de los grados de libertad horizontales ortogonales del diafragma. Este procedimiento debe utilizarse cuando se presentan irregularidades en planta del tipo 1P, 4P o 5P, tal como las define A.3.3.4 (tabla A.3-6), y en aquellos casos en los cuales, a juicio del ingeniero diseñador, este es el procedimiento más adecuado.

A.5.2.1.2 - Modelo tridimensional con diafragma flexible - En este tipo de modelo se considera que las masas aferentes a cada nudo de la estructura pueden desplazarse y girar en cualquier dirección horizontal o vertical. La rigidez de los elementos estructurales del sistema de resistencia sísmica se describe tridimensionalmente. El diafragma se representa por medio de elementos que describan adecuadamente su flexibilidad. Este procedimiento debe utilizarse cuando no existe un diafragma propiamente dicho, cuando el diafragma es flexible, o cuando se presentan irregularidades en planta del tipo 2P o 3P, tal como las define A.3.3.4 (tabla A.3-6), y en aquellos casos en los cuales, a juicio del ingeniero diseñador, éste es el procedimiento más adecuado.

A.5.2.1.3 - Modelos limitados a un plano vertical - En este tipo de modelo la respuesta de la estructura se limita a movimientos horizontales en una sola dirección. Este modelo se permite en todos los casos que no están cubiertos por A.5.2.1.1. y A.5.2.1.2. Los efectos torsionales de los pisos deben evaluarse independientemente y adicionarse a los valores obtenidos del análisis en un plano. De igual manera los efectos producidos por la dirección de incidencia de los movimientos sísmicos del terreno deben evaluarse por separado y adicionarse a los valores obtenidos del análisis dinámico.

A.5.2.1.4 - Otros modelos - Si a juicio del ingeniero diseñador las características de rigidez o de masa de la estructura lo requieren, se permite el uso de modelos de análisis inelástico dinámico o de métodos alternos, tal como lo indica A.3.4.1.

A.5.2.2 - MASA DE LA EDIFICACION - Las masas de la edificación que se utilicen en el análisis dinámico deben ser representativas de las masas que existirán en la edificación cuando ésta se vea sometida a los movimientos sísmicos de diseño. Para efectos de los requisitos de este Reglamento, la masa total de la edificación se puede tomar como M . La distribución de la masa de la edificación debe representar la distribución real de las distintas masas de la edificación.

A.5.2.3 - RIGIDEZ EN LOS METODOS DINAMICOS ELASTICOS - La rigidez que se utilice en los elementos estructurales del sistema de resistencia sísmica cuando se empleen métodos dinámicos elásticos, debe seleccionarse cuidadosamente y debe ser representativa de la rigidez cuando éstos se vean sometidos a los movimientos sísmicos de diseño. En las estructuras de concreto y mampostería, la rigidez que se asigne debe ser consistente con el grado de fisuración que puedan tener los diferentes elementos al verse sometidos a las deformaciones que imponen los movimientos sísmicos de diseño. Cuando haya variaciones apreciables en la rigidez de los diferentes elementos verticales del sistema de resistencia sísmica que contribuyen a la resistencia de las mismas componentes del movimiento, la rigidez que se le asigne a cada uno de ellos debe ser consistente con los niveles de deformación.

A.5.2.4 - RIGIDEZ EN LOS METODOS DINAMICOS INELASTICOS - Los modelos matemáticos utilizados para describir la rigidez de los elementos estructurales del sistema de resistencia sísmica, cuando se empleen métodos dinámicos inelásticos, debe ser consistente con el grado de capacidad de disipación de energía del material, con los niveles esperados de deformación y con las secuencia de esfuerzos y deformaciones que se presente durante la respuesta. Los modelos de rigidez utilizados deben estar adecuadamente sustentados analítica o experimentalmente.

A.5.3 - REPRESENTACION DE LOS MOVIMIENTOS SISMICOS

A.5.3.1 - GENERALIDADES - De acuerdo con la representación de los movimientos sísmicos de diseño empleada en el análisis dinámico, los procedimientos se dividen en:

- (a) procedimientos espectrales, y
- (b) procedimientos de análisis cronológico.

A.5.3.2 - PROCEDIMIENTOS ESPECTRALES - En los procedimientos espectrales debe utilizarse el espectro de diseño definido en A.2.6.

A.5.3.3 - PROCEDIMIENTOS CRONOLOGICOS - En los procedimientos cronológicos deben utilizarse familias de acelerogramas, tal como las define A.2.7.

A.5.4 - ANALISIS DINAMICO ELASTICO ESPECTRAL

A.5.4.1 - METODOLOGIA DEL ANALISIS - Deben tenerse en cuenta los siguientes requisitos, cuando se utilice el método de análisis dinámico elástico espectral:

- (a) **Obtención de los modos de vibración** - Los modos de vibración deben obtenerse utilizando metodologías establecidas de dinámica estructural. Deben utilizarse todos los modos de vibración de la estructura que contribuyan de una manera significativa a la respuesta dinámica de la misma, cumpliendo los requisitos de A.5.4.2.
- (b) **Respuesta espectral modal** - La respuesta máxima de cada modo se obtiene utilizando las ordenadas del espectro de diseño definido en A.5.3.2, para el período de vibración propio del modo.
- (c) **Respuesta total** - Las respuestas máximas modales, incluyendo las de deflexiones, derivas, fuerzas en los pisos, cortantes de piso, cortante en la base y fuerzas en los elementos, se combinan de una manera estadística para obtener la respuesta total de la estructura a los movimientos sísmicos de diseño. Deben cumplirse los requisitos de A.5.4.4 en la combinación estadística de las respuestas modales máximas.
- (d) **Ajuste de los resultados** - Si los resultados de la respuesta total son menores que los valores mínimos prescritos en A.5.4.5, los resultados totales del análisis dinámico deben ser ajustados como se indica allí. El ajuste debe cubrir todos los resultados del análisis dinámico, incluyendo las deflexiones, derivas, fuerzas en los pisos, cortantes de piso, cortante en la base y fuerzas en los elementos.
- (e) **Evaluación de las derivas** - Se debe verificar que las derivas totales obtenidas, debidamente ajustadas de acuerdo con los requisitos de A.5.4.5, no excedan los límites establecidos en el Capítulo A.6.
- (f) **Fuerzas de diseño en los elementos** - Las fuerzas sísmicas internas totales de los elementos, F_i , debidamente ajustadas de acuerdo con los requisitos de A.5.4.5, se dividen por el valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía, R , del sistema de resistencia sísmica, modificado de acuerdo con la irregularidad según los requisitos de A.3.3.3, para obtener las fuerzas sísmicas reducidas de diseño, E , y se combinan con las otras cargas prescritas por este Reglamento, de acuerdo con el Título B.
- (g) **Diseño de los elementos estructurales** - Los elementos estructurales se diseñan y detallan siguiendo los requisitos propios del grado de capacidad de disipación de energía correspondiente del material, de acuerdo con los requisitos del Capítulo A.3.

A.5.4.2 - NUMERO DE MODOS DE VIBRACION - Deben incluirse en el análisis dinámico todos los modos de vibración que contribuyan de una manera significativa a la respuesta dinámica de la estructura. Se considera que se ha cumplido este requisito cuando se demuestra que, con el número de modos empleados, p , se ha incluido en el cálculo de la respuesta, de cada una de las direcciones horizontales principales, j , por lo menos el 90 por ciento de la masa participante de la estructura. La masa participante, $\bar{M}_j$, en cada una de las direcciones principales, j , para el número de modos empleados, p , se determina por medio de las siguientes ecuaciones.

$$\bar{M}_j = \sum_{m=1}^p \bar{M}_{mj} \geq 0.90 M \quad (\text{A.5-1})$$

$$\overline{M}_{mj} = \frac{\left(\sum_{i=1}^n m_i \phi_{ij}^m \right)^2}{\sum_{i=1}^n m_i (\phi_{ij}^m)^2} \quad (\text{A.5-2})$$

A.5.4.3 - CALCULO DEL CORTANTE MODAL EN LA BASE - La parte del cortante en la base contribuida por el modo m en la dirección horizontal j , V_{mj} , debe determinarse de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$V_{mj} = S_{am} g \overline{M}_{mj} \quad (\text{A.5-3})$$

donde $\overline{M}_{mj}$ está dado por la ecuación A.5-2, y S_{am} es el valor leído del espectro elástico de aceleraciones, S_a , para el período de vibración T_m correspondiente al modo de vibración m . El cortante modal total en la base, V_{ij} , en la dirección j se obtiene combinando los cortantes contribuidos por cada modo, V_{mj} , en la misma dirección de acuerdo con el procedimiento de A.5.4.4.

A.5.4.4 - COMBINACION DE LOS MODOS - Las respuestas máximas obtenidas para cada modo, m , de las deflexiones, derivas, fuerzas en los pisos, cortantes de piso, cortante en la base y fuerzas en los elementos, deben combinarse utilizando métodos apropiados y debidamente sustentados, tales como el de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados u otros. Debe tenerse especial cuidado cuando se calculen las combinaciones de las derivas, calculando la respuesta máxima de la deriva causada por cada modo independientemente y combinándolas posteriormente. No es permitido obtener las derivas totales a partir de deflexiones horizontales que ya han sido combinadas. Cuando se utilicen modelos matemáticos de análisis tridimensional deben tenerse en cuenta los efectos de interacción modal.

A.5.4.5 - AJUSTE DE LOS RESULTADOS - El valor del cortante dinámico total en la base, V_{ij} , obtenido después de realizar la combinación modal, para cualquiera de las direcciones principales, j , no puede ser menor que los siguientes valores

- (a) para edificios clasificados como irregulares de acuerdo con los requisitos del Capítulo A.3, no puede ser menor que el valor del cortante sísmico en la base, V_s , calculado de acuerdo con los requisitos del Capítulo A.4, y
- (b) para edificios clasificados como regulares de acuerdo con los requisitos del Capítulo A.3, no puede ser menor que el 80 por ciento del valor del cortante sísmico en la base, V_s , calculado de acuerdo con los requisitos del Capítulo A 4 utilizando el período de vibración aproximado T_s dado en A 4 2 2

El ajuste debe realizarse proporcionalmente a todos los parámetros de la respuesta dinámica, tales como deflexiones, derivas, fuerzas en los pisos, cortantes de piso, cortante en la base y fuerzas en los elementos. Cuando el cortante sísmico en la base, V_{ij} , obtenido después de realizar la combinación modal, para cualquiera de las direcciones principales, excede los valores prescritos anteriormente, todos los parámetros de la respuesta dinámica total, tales como deflexiones, derivas, fuerzas en los pisos, cortantes de piso, cortante en la base y fuerzas en los elementos, pueden reducirse proporcionalmente, a juicio del diseñador

A.5.4.6 - EFECTOS DIRECCIONALES - Los efectos direccionales de los movimientos sísmicos de diseño deben tenerse en cuenta de acuerdo con los requisitos de A.3.6.3. Los efectos de la aceleración vertical de los movimientos sísmicos en los voladizos y elementos preesforzados debe tenerse en cuenta siguiendo los requisitos de A.3.6.13 o alternativamente por medio de un procedimiento de análisis dinámico, pero en ningún caso los resultados obtenidos por medio de este procedimiento alternativo puede conducir a resultados menores que los obtenidos por medio de A 3 6.13.

A.5.4.7 - TORSION - El análisis dinámico debe tener en cuenta los efectos torsionales de toda la estructura, incluyendo aquellos producidos por la torsión accidental. Cuando se utilicen modelos matemáticos tridimensionales de diafragma rígido, los efectos de la torsión accidental pueden tenerse en cuenta por medio de ajustes apropiados al modelo, tales como cambios en la localización de los centros de gravedad de las masas, o por medio de procedimientos estáticos equivalentes, como lo indicados en A 3 6 7.

A.5.4.8 - SISTEMAS DUALES - Cuando el sistema de resistencia sísmica corresponda a un sistema dual, tal como lo define A 3 2.1.4, el sistema debe ser capaz en conjunto, de resistir el cortante total en la base que se obtiene por medio del análisis dinámico. El análisis del pórtico espacial resistente a momentos, actuando independientemente

como lo prescribe A.3.2.1.4 (b), puede llevarse a cabo por medio de un análisis dinámico apropiado, o por medio de un análisis de fuerza horizontal equivalente de acuerdo con los requisitos del Capítulo A.4

A.5.5 - METODO DE ANALISIS DINAMICO CRONOLOGICO

A.5.5.1 - GENERALIDADES - La metodología de análisis dinámico cronológico puede ser utilizada cuando a juicio del ingeniero diseñador ella describe adecuadamente las propiedades dinámicas de la estructura y conduce a resultados representativos de los movimientos sísmicos de diseño. El modelo matemático empleado puede ser linealmente elástico o inelástico.

A.5.5.2 - RESPUESTA MAXIMA - Deben determinarse las respuestas máximas de las deflexiones, derivas, fuerzas en los pisos, cortantes de piso, cortante en la base y fuerzas en los elementos, para el conjunto de registros de la familia de acelerogramas requerida por A.2.7.1

A.5.5.3 - AJUSTE DE LOS RESULTADOS - El valor del cortante dinámico total en la base, V_{ij} , obtenido para cualquiera de las direcciones principales, j , no puede ser menor que los siguientes valores.

- (a) para edificios clasificados como irregulares de acuerdo con los requisitos del Capítulo A.3, no puede ser menor que el valor del cortante sísmico en la base, V_s , calculado de acuerdo con los requisitos del Capítulo A.4, y
- (b) para edificios clasificados como regulares de acuerdo con los requisitos del Capítulo A.3, no puede ser menor que el 80 por ciento del valor del cortante sísmico en la base, V_s , calculado de acuerdo con los requisitos del Capítulo A.4 utilizando el período de vibración aproximado T_s dado en A.4.2.2.

El ajuste debe realizarse proporcionalmente a todos los parámetros de la respuesta dinámica, tales como deflexiones, derivas, fuerzas en los pisos, cortantes de piso, cortante en la base y fuerzas en los elementos

A.5.5.4 - FUERZAS DE DISEÑO EN LOS ELEMENTOS - Para obtener las fuerzas de diseño de los elementos, se utilizan las fuerzas sísmicas internas máximas en los elementos, F_s , debidamente ajustadas de acuerdo con los requisitos de A.5.5.3, así

- (a) cuando se trate de un análisis dinámico elástico, se dividen por el valor del coeficiente de capacidad de disipación de energía, R , del sistema de resistencia sísmica, modificado de acuerdo con la irregularidad según los requisitos de A.3.3.3, para obtener las fuerzas sísmicas reducidas de diseño, E , y se combinan con las otras cargas prescritas por este Reglamento, de acuerdo con los requisitos del Título B, y
- (b) en los casos de análisis dinámico inelástico, las fuerzas al nivel en que ocurre la plastificación corresponde a las fuerzas sísmicas reducidas de diseño, E , y no deben ser divididas por el coeficiente de capacidad de disipación de energía. Debe verificarse que las combinaciones de carga prescritas por este Reglamento, de acuerdo con los requisitos del Título B, exceptuando aquellas que incluyen sismo, en ningún caso conducen a esfuerzos mayores que los de plastificación.

A.5.5.5 - FUERZAS DE DISEÑO EN LA CIMENTACION - Para obtener las fuerzas de diseño de la cimentación, se debe cumplir lo prescrito en A.3.7.2 cuando se trate de un análisis dinámico elástico. En el caso de un análisis dinámico inelástico no hay necesidad de dividir por R para encontrar las fuerzas sísmicas reducidas de diseño, E , de los elementos estructurales de la cimentación ni los esfuerzos sobre el suelo, los cuales solo deben multiplicarse por el coeficiente de carga igual a 0.7.



CAPITULO A.6

REQUISITOS DE LA DERIVA

A.6.0 - NOMENCLATURA

h_{pi}	= altura del piso i , medida desde la superficie del diafragma del piso i hasta la superficie del diafragma del piso inmediatamente inferior, $i-1$
j	= índice de una de las direcciones ortogonales principales en planta, puede ser x o y
P_i	= suma de la carga vertical total, incluyendo muerta y viva, que existe en el piso i , y todos los pisos localizados por encima. Para el cálculo de los efectos P-Delta, no hay necesidad que los coeficientes de carga de sean mayores que la unidad.
Q_i	= índice de estabilidad, del piso i , utilizado en la evaluación de los efectos P-Delta Véase A.6.2.5
r_j	= proyección, sobre la dirección perpendicular en planta a la dirección bajo estudio, de la distancia entre el centro de masa del piso y el punto de interés
T	= período fundamental del edificio como se determina en A.4.2
T_a	= período de vibración fundamental aproximado. Véase A.4.2
V_i	= fuerza cortante del piso i , en la dirección bajo estudio, sin dividir por R . Se determina por medio de la ecuación A.3-2. Corresponde a la suma de las fuerzas horizontales sísmicas que se aplican al nivel i , y todos los niveles localizados por encima de él.
Δ_{cm}	= deriva del piso i , en la dirección bajo estudio, medida en el centro de masa del piso, como la diferencia entre el desplazamiento horizontal del piso i menos el del piso $i-1$.
Δ_{max}^i	= deriva máxima para cualquier punto del piso i
$\delta_{cm,j}$	= desplazamiento horizontal, del centro de masa del piso, en la dirección j .
$\delta_{pd,j}$	= desplazamiento horizontal adicional, del centro de masa del piso, causado por efectos P-Delta, en la dirección j .
δ_{tu}	= desplazamiento horizontal adicional causado por efectos de torsión, de cualquier grado de libertad de la estructura, en la dirección j .
$\delta_{tot,j}$	= desplazamiento total horizontal, de cualquier grado de libertad de la estructura, en la dirección j .
θ_i	= rotación alrededor de un eje vertical que pasa por el centro de masa del piso i , causada por los efectos torsionales, en radianes

A.6.1 - GENERAL

A.6.1.1 - ALCANCE - En el presente Capítulo se dan los procedimientos para calcular la deriva así como sus límites permisibles

A.6.1.2 - DEFINICION DE DERIVA - Se entiende por deriva el desplazamiento horizontal relativo entre dos puntos colocados en la misma línea vertical, en dos pisos o niveles consecutivos. de la edificación.

A.6.1.3 - NECESIDAD DE CONTROLAR LA DERIVA - La deriva está asociada con los siguientes efectos durante un temblor:

- (a) Deformación inelástica de los elementos estructurales y no estructurales.
- (b) Estabilidad global de la estructura
- (c) Daño a los elementos estructurales que no hacen parte del sistema de resistencia sísmica y a los elementos no estructurales tales como muros divisorios, particiones, enchapes, acabados, instalaciones eléctricas, mecánicas, etc
- (d) Alarma y pánico entre las personas que ocupen la edificación

Por las razones anteriores es fundamental llevar a cabo durante el diseño un estricto cumplimiento de los requisitos de deriva dados en el presente Capítulo, con el fin de garantizar el cumplimiento del propósito del Reglamento y un adecuado comportamiento de la estructura y su contenido.

A.6.2 - CALCULO DEL DESPLAZAMIENTO HORIZONTAL

A.6.2.1 - DESPLAZAMIENTOS TOTALES HORIZONTALES - Los desplazamientos horizontales, en las dos direcciones principales ortogonales en planta, que tienen todos los grados de libertad de la estructura al verse afectada por los movimientos sísmicos de diseño definidos en A.2.2, se determinan por medio del análisis estructural realizado utilizando el método de análisis definido en A.3.4 y con las rigideces indicadas en A.3.4.3. Los desplazamientos totales horizontales, $\delta_{tot,j}$, en cualquiera de las direcciones principales en planta, j , y para cualquier grado de libertad de la estructura, se obtienen de la siguiente suma de valores absolutos

$$\delta_{tot,j} = |\delta_{cm,j}| + |\delta_{t,j}| + |\delta_{pd,j}| \quad (A.6-1)$$

donde $\delta_{cm,j}$ corresponde al desplazamiento horizontal del centro de masa en la dirección bajo estudio, j ; $\delta_{t,j}$ el desplazamiento adicional causado por los efectos torsionales en la dirección bajo estudio, j , y $\delta_{pd,j}$ al desplazamiento adicional causado por el efecto P-Delta en la dirección bajo estudio, j . Cuando se utilicen los procedimientos de interacción suelo-estructura, o cuando A.3.4.2 así lo requiera, deben incluirse dentro de los desplazamientos totales, los desplazamientos adicionales obtenidos de acuerdo con el procedimiento del Capítulo A.7.

A.6.2.1.1 - Cuando se utilice el método de la fuerza horizontal equivalente, las fuerzas horizontales que se empleen para determinar los desplazamientos horizontales y torsionales en el centro de masa pueden calcularse utilizando el período, T , que se obtiene por medio de la ecuación A.4-1 de A.4.2.1, aplicando el límite de $1.2T_u$ indicado allí.

A.6.2.1.2 - Cuando se emplee el método de la fuerza horizontal equivalente, y el valor de T , o de $1.2T_u$, sea mayor que T_u calculado utilizando la ecuación A.2-4, no hay necesidad de emplear el límite dado por la ecuación A.2-5.

A.6.2.2 - DESPLAZAMIENTOS HORIZONTALES EN EL CENTRO DE MASA DEL PISO - Corresponden a los desplazamientos horizontales, en las dos direcciones principales en planta, que tiene el centro de masa del piso. Se incluye dentro de ellas la rotación alrededor de un eje vertical que pasa por el centro de masa, causada por los efectos torsionales.

A.6.2.3 - EFECTOS TORSIONALES - Corresponden a los desplazamientos horizontales adicionales, en las dos direcciones principales ortogonales en planta, causados por la rotación de toda la estructura con respecto a un eje vertical y debida a los efectos torsionales definidos en A.3.6.7. Cuando los diafragmas no son flexibles el incremento en desplazamiento horizontal causado por los efectos torsionales en cualquiera de las dos direcciones principales en planta, se obtiene de

$$\delta_{t,j} = r_j \theta_i \quad (A.6-2)$$

donde $\delta_{t,j}$ es el incremento en desplazamiento horizontal causado por los efectos torsionales en un punto dentro del nivel i , en una de las direcciones principales en planta, r_j es la proyección sobre la dirección perpendicular en planta a la dirección bajo estudio, j , de la distancia entre el centro de masa del piso y el punto de interés, y θ_i es la rotación alrededor de una eje vertical que pasa por el centro de masa del nivel i , causada por los efectos torsionales.

A.6.2.4 - EFECTOS P-DELTA - Corresponden a los efectos adicionales, en las dos direcciones principales en planta, causados por los efectos de segundo orden (efectos P-Delta) de la estructura. Los efectos P-Delta producen un aumento en las deflexiones horizontales y en las fuerzas internas de la estructura. Estos efectos deben tenerse en cuenta cuando el índice de estabilidad, Q_u , es mayor de 0.10. El índice de estabilidad, para el piso i y en la dirección bajo estudio, se calcula por medio de la siguiente ecuación

$$Q_i = \frac{P_i \Delta_{cm}}{V_i h_{pi}} \quad (A.6-3)$$

El índice de estabilidad de cualquier piso Q_u , no debe exceder el valor de 0.30. Cuando el valor de Q_u es mayor que 0.30, la estructura es potencialmente inestable y debe rigidizarse.

La deflexión adicional causada por el efecto P-Delta en la dirección bajo estudio y para el piso i , se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$\delta_{pd} = \delta_{cm} \left(\frac{Q_i}{1 - Q_i} \right) \quad (A.6-4)$$

A.6.2.4.1 - Alternativamente, los efectos P-Delta pueden evaluarse siguiendo los requisitos de C.10 11 en estructuras de concreto reforzado.

A.6.2.4.2 - Cuando el índice de estabilidad es mayor de 0 10, los efectos P-Delta en las fuerzas internas de la estructura causadas por las cargas laterales deben aumentarse, multiplicándolas en cada piso por el factor $1/(1-Q_i)$

A.6.3 - EVALUACION DE LA DERIVA MAXIMA

A.6.3.1 - DERIVA MAXIMA - La deriva máxima en cualquier punto del piso i , se obtiene como la diferencia entre lo desplazamientos horizontales totales máximos del punto en el piso i y los desplazamientos horizontales totales máximos de un punto localizado en el mismo eje vertical en el piso $i-1$, por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta'_{max} = \sqrt{\sum_{j=1}^2 (\delta'_{tot,j} - \delta_{tot,j}^{i-1})^2} \quad (A.6-5)$$

A.6.3.1.1 - El cumplimiento del cálculo de la deriva para cualquier punto del piso se puede realizar verificandola solamente en todos los ejes verticales de columna y en los puntos localizados en los bordes de los muros estructurales

A.6.4 - LIMITES DE LA DERIVA

A.6.4.2 - La deriva máxima evaluada en cualquier punto de la estructura, determinada de acuerdo con el procedimiento de A 6 3 1, no puede exceder los límites establecidos en la tabla A 6-1, en la cual la deriva máxima se expresa como un porcentaje de la altura de piso h_{pi} .

Tabla A.6-1
DERIVAS MAXIMAS COMO PORCENTAJE DE h_{pi}

Estructuras de:	Deriva máxima
concreto reforzado, metálicas y de madera	1.0% (0.010 h_{pi})
de mampostería	0.5% (0.005 h_{pi})

A.6.4.2.1 - Cuando se utilicen secciones fisuradas, tanto en concreto reforzado, como en mampostería, las derivas pueden multiplicarse por 0.7 antes de hacer la comparación con los límites dados en la tabla A.6-1.

A.6.5 - SEPARACION ENTRE ESTRUCTURAS ADYACENTES

A.6.5.1 - DENTRO DE LA MISMA CONSTRUCCION - Todas las partes de la estructura deben diseñarse y construirse para que actúen como una unidad integral para efectos de resistir las fuerzas sísmicas, a menos que se separen una distancia suficiente para evitar la colisión nociva entre las partes. Para determinar la distancia mínima de separación debe sumarse el valor absoluto de los desplazamientos horizontales totales obtenidos en A.6 2 1 para cada una de las porciones de la edificación en la dirección perpendicular a la junta que las separe, a menos que se tomen medidas para que no se presente daño a la estructura al utilizar una distancia menor.

A.6.5.2 - ENTRE EDIFICACIONES VECINAS - Es responsabilidad de la reglamentación urbana de la ciudad el fijar la separación entre estructuras colindantes que no formen parte de la misma unidad constructiva. En ausencia de una reglamentación de la ciudad al respecto, pueden utilizarse las siguientes guías:

- (a) Cuando ya exista una edificación vecina en la cual se dejó una separación con respecto al lindero, la nueva construcción adyacente debe separarse en cada piso de la existente una distancia igual al desplazamiento total del piso obtenido como se indica en A.6.2.1
- (b) Cuando ya exista una edificación vecina que no dejó una separación con respecto al lindero y no se conocen sus desplazamientos máximos, la nueva construcción adyacente debe separarse de la existente en cada piso una distancia igual al desplazamiento total del piso obtenido como se indica en A.6.2.1, más una distancia igual al uno por ciento (1%) de la altura del piso medida desde el nivel del terreno.
- (c) Cuando no se haya construido aún el terreno vecino, y la reglamentación permita construcción sin ningún aislamiento, en aquellos pisos en los cuales no se requiere aislamiento, la edificación debe separarse del lindero una distancia igual al desplazamiento total del piso obtenido como se indica en A.6.2.1.

