

APENDICE A-1

RECOMENDACIONES SISMICAS PARA ALGUNAS ESTRUCTURAS QUE SE SALEN DEL ALCANCE DEL REGLAMENTO

A-1.0 - NOMENCLATURA

- g** = aceleración debida a la gravedad ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$).
- I** = coeficiente de importancia dado en A.2.5.2.
- M** = masa total de la edificación; M debe ser igual a la masa total de la estructura más su contenido. En estructuras tales como tanques, silos y otras estructuras de almacenamiento debe incluir la masa correspondiente al contenido operacional normal de la estructura.
- R₀** = 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. Véase el 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 ($R = \phi_a \phi_p R_0$). Véase el Capítulo A.3.
- T** = período fundamental de la estructura.
- W** = peso total de la edificación; $W = M g$.

A-1.1 - GENERAL

A-1.1.1 - ALCANCE - En el presente Apéndice se dan recomendaciones que permiten determinar las fuerzas sísmicas de diseño de algunas estructuras especiales no cubiertas por el alcance de las Normas Sismo Resistentes Colombianas y su Reglamento. El presente Apéndice contiene recomendaciones de diseño que no tienen carácter obligatorio, y se incluye únicamente por razones ilustrativas.

A-1.1.2 - REQUISITOS APLICABLES - En general se recomienda seguir los requisitos del Reglamento con las excepciones anotadas en el presente Apéndice. Debe tenerse especial cuidado con las fuerzas de viento sobre estas estructuras especiales, pues en muchos casos son mayores que las fuerzas sísmicas.

A-1.2 - PERIODO FUNDAMENTAL DE LA ESTRUCTURA

A-1.2.1 - El valor del período fundamental de la estructura, 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 ecuación A.4-1.

A-1.3 - CALCULO DE LAS FUERZAS SISMICAS DE DISEÑO

A-1.3.1 - MOVIMIENTOS SISMICOS DE DISEÑO - Debe utilizarse la definición de los movimientos sísmicos de diseño dada en el Capítulo A.2 del Reglamento.

A-1.3.2 - MASA TOTAL, M - La masa total, M, debe incluir la masa correspondiente a todas las cargas muertas y las masas correspondientes al contenido operacional normal de la estructura, especialmente en tanques, silos y otras estructuras de almacenamiento.

A-1.3.3 - COEFICIENTE DE IMPORTANCIA, I - Debe tomarse un coeficiente de importancia, I, igual a la unidad, a menos que la estructura sea parte o pueda afectar edificaciones de los grupos de usos II, III o IV. En el caso de estructuras que sean parte de sistemas de líneas vitales, la definición del coeficiente de importancia a emplear se debe basar en consideraciones que incluyan el nivel de redundancia del sistema y el potencial de que una eventual

falla de la estructura pueda afectar la operación o estabilidad de edificaciones indispensables.

A-1.3.4 - DISTRIBUCION EN LA ALTURA DE LAS FUERZAS SISMICAS - La distribución en la altura de las fuerzas sísmicas horizontales puede realizarse por cualquiera de los procedimientos presentados en los Capítulos A.4 o A.5 del Reglamento.

A-1.3.5 - COEFICIENTE BASICO DE DISIPACION DE ENERGIA, R_0 - Se recomienda utilizar los valores del coeficiente de capacidad de disipación de energía, R_0 , dados en la tabla A-1-1.

A-1.4 - REQUISITOS DE DERIVA

A-1.4.1 - Los requisitos para la deriva presentados en el Capítulo A.6, no son aplicables directamente a estructuras especiales diferentes de las cubiertas por el Reglamento en su alcance. Los límites de la deriva deben ser establecidos por el diseñador tomando en cuenta el peligro que represente para la vida la falla de elementos estructurales y no estructurales, como consecuencia de los desplazamientos que sufre la estructura al verse afectada por los movimientos sísmicos de diseño

**Tabla A-1-1
Coeficiente de capacidad de disipación de energía, R_0 ,
para algunas estructuras especiales**

| Tipo de estructura | Valor de R_0 |
|---|----------------------------------|
| Tanques, contenedores de líquidos y gases a presión, apoyados sobre columnas arriostradas, con diagonales, o no | 2.0 |
| Silos y chimeneas de concreto reforzado vaciado en sitio, cuyas paredes son continuas hasta la fundación | 3.5 |
| Estructuras en forma de torre cuya masa está distribuida en la altura, tales como chimeneas, silos y tanques, cuyos apoyos consisten en faldones. | 3.0 |
| Torres en celosía, autoportantes o con templetes, chimeneas y torres con templetes. | 3.0 |
| Estructuras de tipo péndulo invertido | 2.0 |
| Tolvas sobre columnas, con o sin contravientos. | 3.0 |
| Torres de enfriamiento | 3.5 |
| Torres o anaqueles de almacenamiento | 3.0 |
| Avisos y vallas publicitarias | 3.5 |
| Monumentos y estructuras de parques de diversión | 2.0 |
| Otras estructuras autoportantes, no incluidas anteriormente | 3.0 |

APENDICE A-2

RECOMENDACIONES PARA EL CALCULO DE LOS EFECTOS DE INTERACCION DINAMICA SUELO-ESTRUCTURA

A-2.0 - NOMENCLATURA

- A_s = coeficiente que representa la aceleración pico efectiva, para diseño, dado en A.2.2.
- A_o = área de la cimentación.
- D_s = profundidad del estrato blando. Véase A-2 2.1.2.
- G_o = $\frac{\gamma v_{se}^2}{g}$ = módulo de cortante promedio para los suelos localizados bajo la cimentación para deformaciones unitarias pequeñas.
- g = aceleración de la gravedad (9.8 m/s²)
- h_s = altura medida desde la base del nivel en estudio.
- \bar{h} = altura efectiva de la edificación, la cual debe tomarse igual a 0.7 veces la altura total, h_s . En edificios en los cuales toda la masa M de la edificación está concentrada en un solo piso, debe tomarse igual a la altura del piso, medida desde la base.
- I_o = momento de inercia de la cimentación con respecto a un eje horizontal, perpendicular a la dirección en estudio.
- \bar{k} = rigidez de la estructura considerándola como empotrada en la base. Se calcula por medio de la ecuación A-2-4.
- K_y = rigidez lateral de la cimentación de la edificación, la cual se define como la fuerza estática horizontal aplicada en la cimentación, que produce una deflexión horizontal unitaria. Tanto la fuerza estática como la deflexión horizontal se toman en la dirección en estudio.
- K_θ = rigidez rotacional, o de balanceo, de la cimentación de la edificación, definida como el momento estático necesario para producir una rotación unitaria, en promedio, de la cimentación con respecto a un eje horizontal perpendicular a la dirección en estudio.
- L_o = longitud total de la cimentación en la dirección en estudio
- M_o = momento de vuelco en la base de la edificación calculado utilizando las fuerzas horizontales de diseño sin incluir la reducción por efectos de interacción suelo-estructura
- M_{1o} = momento de vuelco en la base de la edificación calculado utilizando las fuerzas horizontales correspondientes al primer modo sin incluir la reducción por efectos de interacción suelo-estructura.
- \bar{M} = masa participante de la edificación, el cual puede tomarse igual a 0.7 M , excepto en aquellos casos en los cuales toda la masa M de la edificación está concentrado en un solo piso, caso en el cual debe tomarse igual a M .
- \bar{M}_{1j} = masa participante de la edificación, para el modo fundamental de la edificación en la dirección j , calculado utilizando la ecuación A.5-2.
- r = longitud característica de la cimentación. Se determina por medio de las ecuaciones A-2-7 o A-2-8.
- r_s = longitud característica de la cimentación. Definida por medio de la ecuación A-2-7.
- r_m = longitud característica de la cimentación. Definida por medio de la ecuación A-2-8.
- S_s = valor del espectro de aceleraciones de diseño, determinado de acuerdo con los requisitos del Capítulo A.2, correspondiente al periodo fundamental de la estructura, T o T_s , considerada empotrada en su base, calculado de acuerdo con lo prescrito en A.4.2.
- S_{s1} = valor del espectro de aceleraciones de diseño, determinado de acuerdo con los requisitos del Capítulo A.2, correspondiente al periodo del modo fundamental de la estructura, T_{11} , considerada empotrada en su base.
- \bar{S}_s = valor del espectro de aceleraciones de diseño, determinado de acuerdo con los requisitos del Capítulo A.2, correspondiente al periodo fundamental de la estructura, \bar{T} , cuando éste se calcula considerando los efectos de la interacción suelo-estructura, tal como se define en A-2.2.1.1.
- \bar{S}_{s1} = valor del espectro de aceleraciones de diseño, determinado de acuerdo con los requisitos del Capítulo A.2, correspondiente al periodo fundamental de la estructura, \bar{T}_1 , cuando éste se calcula considerando los efectos de la interacción suelo-estructura.

NSR-98 – Apéndice A-2 – Recomendaciones para el cálculo de los efectos de interacción dinámica suelo-estructura

- T = valor del período fundamental del edificio, calculado de acuerdo con lo prescrito en A.4.2.
- T_1 = valor del período fundamental del edificio, correspondiente al primer modo de vibración.
- \bar{T} = valor del período fundamental del edificio tomando en cuenta la interacción suelo-estructura. Se determina de acuerdo con los requisitos de A-2.2.1.1.
- \bar{T}_1 = valor del período fundamental del edificio, correspondiente al primer modo de vibración, tomando en cuenta la interacción suelo-estructura
- V_s = cortante sísmico de diseño en la base de la estructura, calculado por el método de la fuerza horizontal equivalente del Capítulo A 4.
- V'_s = cortante sísmico en la base de la estructura, calculado por el método de la fuerza horizontal equivalente del Capítulo A 4, utilizando un período de vibración igual a $1.2T_s$.
- V_{1j} = cortante sísmico de diseño en la base de la estructura en la dirección j , contribuido por el modo fundamental en esa dirección, calculado de acuerdo con la ecuación A.5-3 y sin ser afectado por efectos de interacción suelo-estructura.
- \bar{V}_s = cortante sísmico de diseño en la base de la estructura, calculado tomando en cuenta la interacción suelo-estructura
- \bar{V}_{1j} = cortante sísmico de diseño en la base de la estructura en la dirección j , contribuido por el modo fundamental en esa dirección, y afectado por la interacción suelo-estructura
- ΔV_s = reducción en el cortante sísmico de diseño en la base de la estructura, debido a los efectos de la interacción suelo-estructura Ecuación A-2-2
- ΔV_{1j} = reducción en el cortante sísmico de diseño en la base de la estructura en la dirección j , contribuido por el modo fundamental en esa dirección, debida a los efectos de la interacción suelo-estructura
- v_{so} = velocidad promedio de la onda de cortante, de los suelos localizados debajo de la cimentación, para niveles bajos de deformación unitaria, menores de 0.00001 (0.001%)
- α = parámetro que describe la densidad relativa de la estructura y el suelo bajo ella. Definida en la ecuación A-2-6.
- $\bar{\beta}$ = coeficiente de amortiguamiento crítico del sistema estructural, considerando la interacción suelo-estructura, calculado de acuerdo con lo prescrito en A-2 2 1.2.
- β_o = coeficiente de amortiguamiento crítico de la cimentación. Se determina por medio de la figura A-2-1.
- δ_x = deflexión horizontal en el nivel x de la estructura, calculada siguiendo el método de la fuerza horizontal equivalente y utilizando las fuerzas sísmicas de diseño sin ser modificadas por los efectos de la interacción suelo-estructura
- δ_{1x} = deflexión horizontal en el nivel x de la estructura, calculada para el primer modo de vibración sin incluir los efectos de la interacción suelo-estructura.
- $\bar{\delta}_x$ = deflexión horizontal en el nivel x de la estructura, modificada por los efectos de la interacción suelo-estructura. Ecuación A-2-11.
- $\bar{\delta}_{1x}$ = deflexión horizontal en el nivel x de la estructura, para el primer modo de vibración, modificada por los efectos de la interacción suelo-estructura.
- γ = masa unitaria promedio del suelo.

A-2.1 - GENERAL

A-2.1.1 - Los requisitos presentados en este Apéndice pueden utilizarse para tener en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura en la determinación de las fuerzas sísmicas de diseño y las deformaciones que éstas imponen a la estructura. Su uso se permite dentro de las limitaciones que da el Capítulo A.7. El uso de estos requisitos disminuyen los valores de diseño del cortante sísmico en la base, las fuerzas horizontales y los momentos de vuelco, pero aumenta las deflexiones horizontales de la estructura, y por ende las derivas. Los requisitos para ser utilizados con el método de la fuerza horizontal equivalente se presentan en A-2.2 y para el método del análisis dinámico modal elástico en A-2.3

A-2.2 - METODO DE LA FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE

Los requisitos que se presentan a continuación, complementan en lo concerniente a interacción suelo-estructura los dados en el Capítulo A.7.

A-2.2.1 - CORTANTE EN LA BASE - Para tener en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura, el cortante sísmico de diseño en la base, V_s , determinado por medio de la ecuación A 4-5, puede modificarse a:

$$\bar{V}_s = V_s - \Delta V_s \quad (\text{A-2-1})$$

y el valor de la reducción en el cortante sísmico en la base, para diseño, debe calcularse por medio de

$$\Delta V_s = \left[S_a - \bar{S}_a \left(\frac{0.05}{\beta} \right)^{0.4} \right] g \bar{M} \leq (V_s - V_s') \quad (\text{A-2-2})$$

El valor del cortante sísmico en la base modificado, \bar{V}_s , no puede ser menor que V_s'

A-2.2.1.1 - Periodo efectivo de la edificación - El periodo efectivo, \bar{T} , debe determinarse por medio de la siguiente ecuación:

$$\bar{T} = T \sqrt{1 + \frac{\bar{k}}{K_v} \left(1 + \frac{K_v \bar{h}^2}{K_0} \right)} \quad (\text{A-2-3})$$

y

$$\bar{k} = 4\pi^2 \left(\frac{\bar{M}}{T^2} \right) \quad (\text{A-2-4})$$

Las rigideces de la cimentación, K_v y K_0 , deben determinarse por medio de principios establecidos de mecánica de suelos, utilizando propiedades del suelo que sean representativas de su comportamiento a niveles de deformación unitaria, conmensurables con los que producen los movimientos sísmicos de diseño. En aquellos casos en los cuales el estudio geotécnico no lo indique, el módulo promedio de cortante, G , para los suelos localizados debajo de la cimentación, en condiciones de deformaciones unitarias apreciables, y la velocidad de la onda de cortante, v_s , asociada con estas deformaciones unitarias, pueden determinarse utilizando la tabla A-2-1

Tabla A-2-1
Valores de G/G_0 y v_s/v_{s0}

| | Valor de A_s | | | |
|-----------------------|----------------|-------------|-------------|-------------|
| | ≤ 0.10 | ≤ 0.15 | ≤ 0.20 | ≥ 0.30 |
| Valor de G/G_0 | 0.81 | 0.64 | 0.49 | 0.42 |
| Valor de v_s/v_{s0} | 0.90 | 0.80 | 0.70 | 0.65 |

Alternativamente, para edificaciones cuya cimentación sea una losa de fundación superficial o aproximadamente superficial, que se construye de una manera tal que se pueda considerar que el contacto entre los muros de contención y el suelo no restringe el libre movimiento de la estructura, el periodo de vibración efectivo, tomando en cuenta los efectos de la interacción suelo-estructura, se pueden determinar por medio de la siguiente ecuación

$$\bar{T} = T \sqrt{1 + \frac{25\alpha r_d \bar{h}}{v_s^2 T^2} \left(1 + \frac{1.12 r_d \bar{h}^2}{r_m^3} \right)} \quad (\text{A-2-5})$$

en donde

$$\alpha = \frac{\bar{M}}{\gamma A_o h} \quad (\text{A-2-6})$$

$$r_a = \sqrt{\frac{A_o}{\pi}} \quad (\text{A-2-7})$$

y

$$r_m = \sqrt[3]{\frac{4 I_o}{\pi}} \quad (\text{A-2-8})$$

A-2.2.1.2 - Amortiguamiento efectivo - El coeficiente de amortiguamiento efectivo del sistema estructura-cimentación, debe calcularse por medio de:

$$\bar{\beta} = \beta_o + \frac{0.05}{\left(\frac{T}{T}\right)^3} \quad (\text{A-2-9})$$

Los valores de β_o se obtienen de la figura A-2-1. El parámetro r en la figura A-2-1 es una longitud característica de la cimentación, la cual se puede determinar así:

Para $\frac{h}{L_o} \leq 0.5$, r es igual a r_a , de la ecuación A-2-7 y para $\frac{h}{L_o} \geq 1.0$, r es igual a r_m , de la ecuación A-2-8

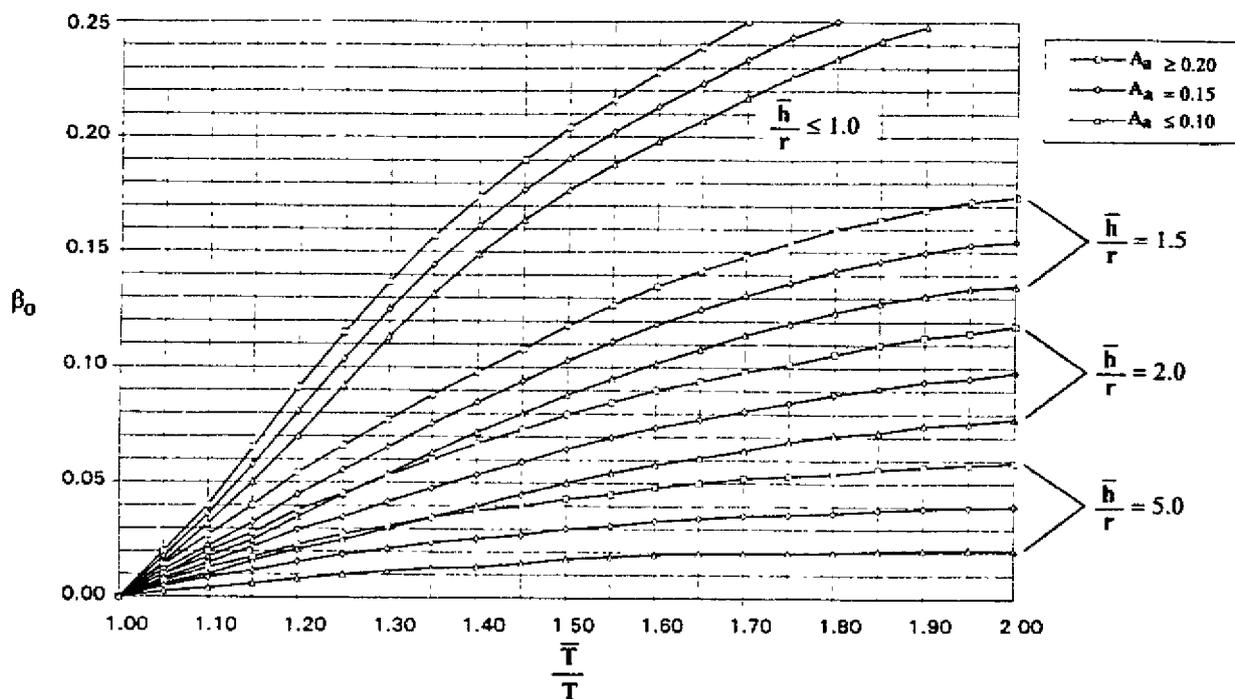
Para valores intermedios se puede interpolar. L_o es la longitud de la cimentación en la dirección en estudio, y en la aplicación de las ecuaciones A-2-7 y A-2-8, A_o e I_o se determinan para el área de la cimentación que efectivamente está en contacto con el suelo, pues le transmite el peso de la edificación.

Para edificios cimentados sobre pilotes que trabajan en punta, y para todos los otros casos en los cuales el suelo de fundación consiste en un estrato de suelos blandos relativamente uniforme, colocado sobre un depósito de suelos más duros, o roca, presentándose un cambio abrupto de rigidez, el coeficiente de amortiguamiento efectivo, β_o , que se utiliza en la ecuación A-2-9 puede ser substituido por el valor dado en la siguiente ecuación:

$$\beta'_o = \beta_o \left(\frac{4 D_s}{v_s T} \right)^2 \quad (\text{A-2-10})$$

la cual es aplicable sólo en aquellos casos en los cuales la expresión entre paréntesis es menor que la unidad. En esta ecuación D_s es la profundidad total del estrato blando.

El valor de $\bar{\beta}$, calculado de acuerdo con la ecuación A-2-9, con o sin el ajuste representado en la ecuación A-2-10, en ningún caso puede ser menor de 0.05.



Coeficiente de amortiguamiento crítico de la cimentación, β_0 .
Figura A-2-1

A-2.2.2 - DISTRIBUCIÓN EN LA ALTURA DE LAS FUERZAS SÍSMICAS - La distribución en la altura del cortante en la base corregido por efectos de interacción suelo-estructura se debe tomar igual a la de la estructura sin interacción.

A-2.2.3 - OTROS EFECTOS - Los cortantes de piso, los momentos de vuelco y los efectos torsionales deben determinarse de la misma manera que para edificaciones en las cuales no se ha tomado en cuenta la interacción suelo-estructura, pero utilizando las fuerzas horizontales reducidas por efectos de interacción. Las deflexiones modificadas deben determinarse por medio de la siguiente ecuación:

$$\bar{\delta}_x = \frac{\bar{V}_x}{V_x} \left(\delta_x + \frac{M_0 h_x}{K_0} \right) \quad (\text{A-2-11})$$

A-2.3 - METODO DEL ANALISIS MODAL

Los siguientes requisitos complementan, en lo concerniente a interacción suelo-estructura, lo presentado en el Capítulo A 5

A-2.3.1 - CORTANTES MODALES EN LA BASE - Para tener en cuenta los efectos de interacción suelo-estructura, el cortante sísmico de diseño en la base, correspondiente al modo fundamental, V_{1j} , en la dirección j , determinado por medio de la ecuación A.5-3, puede modificarse a:

$$\bar{V}_{1j} = V_{1j} - \Delta V_{1j} \quad (\text{A-2-12})$$

y el valor de la reducción en el cortante sísmico en la base correspondiente al modo fundamental, debe calcularse utilizando la ecuación A-2-13:

$$\Delta V_{ij} = \left[S_{a1} - \bar{S}_{a1} \left(\frac{0.05}{\beta} \right)^{0.4} \right] g \bar{M}_{ij} \leq V_{ij} - V'_s \quad (\text{A-2-13})$$

El período \bar{T}_1 se calcula utilizando la ecuación A-2-3 o A-2-5, según corresponda, utilizando T_1 en vez de T , determinando \bar{k} por medio de la ecuación A-2-4, utilizando \bar{M}_{1j} en vez de \bar{M} , y calculando \bar{h} por medio de la siguiente ecuación:

$$\bar{h} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \phi_i^2 h_i}{\sum_{i=1}^n m_i \phi_i^2} \quad (\text{A-2-14})$$

Los valores mencionados de \bar{T}_1 , T_1 , \bar{M}_{1j} , y \bar{h} se utilizan para calcular α en la ecuación A-2-6 y el coeficiente β_0 de la figura A-2-1. No debe realizarse ninguna reducción en las contribuciones de los modos de vibración diferentes al fundamental por efectos de interacción suelo-estructura. El cortante en la base de diseño, en ningún caso puede ser menor que V'_s .

A-2.3.2 - OTROS EFECTOS MODALES - Los cortantes de piso, los momentos de vuelco y los efectos torsionales deben determinarse de la misma manera que para edificaciones en las cuales no se ha tomado en cuenta la interacción suelo-estructura, tal como lo prescribe el Capítulo A 5, pero utilizando el valor de \bar{V}_{1j} en vez de V_{1j} . Las deflexiones modificadas del primer modo deben determinarse por medio de la siguiente ecuación

$$\bar{\delta}_{1x} = \frac{\bar{V}_1}{V_1} \left(\delta_{1x} + \frac{M_{10} h_x}{K_\theta} \right) \quad (\text{A-2-15})$$

A-2.3.3 - VALORES DE DISEÑO - Se determinan utilizando los procedimientos indicados en el Capítulo A.5, pero utilizando los valores modificados de los efectos del primer modo en cada una de las direcciones principales, en planta, de la edificación

