

CAPÍTULO 14. MÉTODOS DE ANÁLISIS

Los métodos de análisis para determinar los efectos de las excitaciones sísmicas, son los siguientes:

a) Procedimientos con fuerzas estáticas equivalentes

- Método Estático.

- Procedimientos aproximados indicados en el Capítulo 16.

b) Métodos dinámicos

- Análisis Modal Espectral.

- Superposición Modal Paso a Paso.

- Integración Directa Paso a Paso.

La elección del procedimiento y el nivel mínimo del análisis a utilizar se realizarán teniendo en cuenta las limitaciones indicadas específicamente para cada uno de ellos.

14.1. MÉTODO ESTÁTICO

El Método Estático consiste en esquematizar la excitación sísmica mediante sistemas de fuerzas estáticas proporcionales a las cargas gravitatorias. Este procedimiento de análisis, en general, es aplicable a estructuras de configuraciones regulares de distribución de rigideces y masas, tanto en elevación como en planta.

14.1.1. Fuerzas sísmicas laterales

El sistema de cargas laterales equivalentes, paralelo a la dirección analizada, se establece determinando primero el valor de la fuerza resultante, a partir de la cual se obtienen las fuerzas componentes correspondientes a los distintos puntos en que se supongan concentradas las masas.

14.1.1.1. Resultante de las fuerzas laterales equivalentes o esfuerzo de corte en la base.

El esfuerzo de corte en la base de la construcción V_0 paralelo a la dirección analizada, se determinará mediante la siguiente expresión:

$$V_0 = C \cdot W$$

donde:

$$W = \sum_{i=1}^n W_i$$

siendo:

V_0 el esfuerzo de corte en la base de la construcción paralelo a la dirección analizada;

C el coeficiente sísmico de diseño;

W la carga gravitatoria total de la construcción sobre el nivel de base;

W_i la carga gravitatoria supuesta concentrada en el nivel i, determinada según el Capítulo 9.

14.1.1.2. Coeficiente sísmico de diseño.

El valor del coeficiente sísmico de diseño C se obtendrá considerando el período fundamental de la construcción y la influencia del tipo de suelo de fundación.

El período fundamental T_0 se determinará de acuerdo con lo establecido en el Capítulo 12 y el tipo de suelo de fundación se

establecerá según lo especificado en el Capítulo 6.

El coeficiente sísmico de diseño se determinará con los espectros de diseño, mediante la siguiente expresión:

$$C = \frac{S_a \cdot \gamma_d}{R}$$

siendo:

C el coeficiente sísmico de diseño;

S_a la pseudoaceleración elástica horizontal, establecida según el artículo 7.2.;

γ_d el factor de riesgo, según el artículo 5.2.;

R el factor de reducción por disipación de energía, según el artículo 8.1.

14.1.1.3. Distribución en altura de las fuerzas sísmicas laterales. La fuerza sísmica lateral F_k asociada a la carga gravitatoria W_k ubicada en el nivel k, se determinará mediante la siguiente fórmula:

$$F_k = \frac{W_k \cdot h_k}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot h_i} \cdot V_o$$

siendo:

F_k la fuerza sísmica lateral en el nivel k;

W_i, W_k las cargas gravitatorias supuestas concentradas en los niveles i ó k, respectivamente;

h_i, h_k las alturas de los niveles i ó k medidas a partir del nivel basal (nivel 0);

V_o el esfuerzo de corte en la base de la construcción.

Cuando el coeficiente sísmico de diseño se determine considerando la influencia del período fundamental y éste resulte mayor que $2 T_2$, la distribución en altura se realizará mediante las siguientes expresiones:

- para niveles intermedios:

$$F_k = \alpha \frac{W_k \cdot h_n}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot h_i} \cdot V_o$$

- para el último nivel:

$$F_n = \left[\alpha \frac{W_n \cdot h_n}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot h_i} + (1 - \alpha) \right] \cdot V_o$$

siendo:

F_k la fuerza sísmica lateral en el nivel k;

F_n la fuerza sísmica lateral en el último nivel;

W_i, W_k las cargas gravitatorias supuestas concentradas en los niveles i ó k, respectivamente;

h_i, h_k las alturas de los niveles i ó k medidas a partir del nivel basal;

h_n la altura del último nivel medida a partir del nivel basal;

W_n la carga gravitatoria supuesta concentrada en el último nivel;

V_o el esfuerzo de corte en la base de la construcción;

α un coeficiente dado por:

$$\alpha = 1 - \frac{T_o \cdot 2T_2}{10 T_2} \quad \text{con } \alpha \leq 1$$

donde:

T_o el período fundamental de vibración;

T_2 el período de vibración correspondiente al fin de plafón del espectro de pseudoaceleraciones elásticas.

14.1.1.4. Esfuerzo de corte en el nivel k.

El esfuerzo de corte en el nivel genérico k, se determinará mediante la siguiente expresión:

$$V_k = \left[\frac{V_o}{n} \right] F_i$$

siendo:

V_k el esfuerzo de corte en el nivel k;

F_i la fuerza horizontal aplicada en el nivel i.

14.1.1.5. Momento de vuelco

En la superficie de contacto suelo fundación, el momento de vuelco M_f se reducirá determinándolo mediante la siguiente expresión:

$$M_f = 0,9 \sum_{i=1}^n F_i \cdot h_i$$

siendo:

M_f el momento de vuelco en el nivel de fundación;

F_i la fuerza horizontal aplicada en el nivel i;

h_i^* la altura del nivel i de la construcción medida desde el nivel de fundación.

En los demás niveles del edificio no se admitirán reducciones de los momentos de vuelco.

14.1.1.6. Discretización de cargas gravitatorias en edificios.

Para la aplicación de las prescripciones anteriores en edificios, se admitirá que la discretización de cargas gravitatorias operantes se realice agrupándolas en los niveles de pisos, losas y techos.

Los pesos de los apéndices y salientes del último nivel, a los fines del análisis global de la construcción, se supondrán ubicados en el último nivel siempre que su peso no supere el 25% de la carga gravitatoria correspondiente a dicho nivel.

14.1.1.7. Efectos torsionales.

14.1.1.7.1. Definiciones

Para determinar los efectos torsionales y elegir el modelo a utilizar en el análisis, es necesario considerar la configuración de las distintas plantas de la estructura. Con tal objetivo se introducen las siguientes definiciones:

- Centro de Masas (C.M.): baricentro de las cargas gravitatorias operantes.
- Centroide de sistemas sismorresistentes verticales (C. S.): baricentro de los momentos de inercia individuales de la sección transversal de los componentes verticales de los sistemas sismorresistentes (columnas, tabiques) con respecto a su correspondiente eje principal normal a la dirección analizada.
- Centro de rigidez (C.R.): punto de un nivel o planta en el que aplicando una fuerza horizontal cualquiera como acción única, sólo produce una traslación del nivel.
- Excentricidad geométrica: distancia entre C.M. y C.S. medida perpendicularmente a la dirección analizada.
- Excentricidad estructural: distancia entre C.M. y C.S. medida perpendicularmente a la dirección analizada.

14.1.1.7.2. Procedimientos para considerar la torsión.

Los efectos torsionales podrán determinarse mediante procedimientos estáticos aproximados, en la siguiente forma:

Caso a): Estructuras con dos ejes de simetría en planta.

Se considerarán como tales todas las estructuras que presenten las siguientes características.

En ninguna planta la excentricidad geométrica supera el 5% de la mayor dimensión en planta medida perpendicularmente a la dirección analizada.

Los centroides de sistemas sismorresistentes correspondientes a los distintos niveles, se encuentran aproximadamente alineados en dirección vertical.

Los centros de masas de los distintos niveles, se encuentran aproximadamente alineados en dirección vertical.

- Cuando se cumplen estas condiciones, el momento torsor en el nivel k se determinará mediante las siguientes fórmulas:

$$M_{tk} = (1,5 e_1 + 0,10 l) V_k$$

$$M_{tk} = (e_1 - 0,10 l) V_k$$

siendo:

M_{tk} el momento torsor en el nivel k;

V_k el esfuerzo de corte en el nivel k;

e_1 la distancia entre el C.S. del nivel k y la línea de acción del esfuerzo de corte medida perpendicularmente a la dirección considerada;

l la máxima dimensión en planta medida perpendicularmente a la dirección de V_k .

Se tomarán los valores más desfavorables para las sollicitaciones de los planos verticales sismorresistentes.

- Si el análisis estático se efectúa en forma espacial, las cuplas por piso se determinarán mediante las siguientes expresiones:

$$m_{tk} = (1,5 e_2 + 0,10 l) F_k$$

$$m_{tk} = (e_2 - 0,10 l) F_k$$

siendo:

m_{tk} el momento de la cupla por piso;

e_2 la distancia entre el centro de masas del nivel k y el C.S. del mismo nivel;

F_k la fuerza sísmica horizontal en el nivel k;

l la máxima dimensión en planta medida perpendicularmente a la dirección de V_k .

Se deberán considerar dos estados de cargas independientes según las ecuaciones dadas girando todas las cuplas en el mismo

sentido.

Caso b): Estructuras asimétricas constituidas por planos sismorresistentes verticales de comportamiento similar.

Se considerarán como tales, aquellas estructuras formadas por sistemas aporticados puros o sistemas de tabiques sismorresistentes o muros sismorresistentes, sin que haya combinación de los mismos y en las que además, se cumplan las siguientes condiciones:

Los centros de masas de los distintos niveles se encuentran aproximadamente alineados en dirección vertical.

Los centros de rigidez de los distintos niveles se encuentran aproximadamente alineados en dirección vertical.

La excentricidad estructural en ningún nivel supera el 25% de la mayor dimensión en planta medida perpendicularmente a la dirección considerada.

- El momento torsor en el nivel k, se determinará mediante las expresiones:

$$M_{tk} = (1,5 e_3 + 0,07 l) V_k$$

$$M_{tk} = (e_3 - 0,07 l) V_k$$

siendo:

M_{tk} el momento torsor en el nivel k;

V_k el esfuerzo de corte en el nivel k;

e_3 la distancia entre el centro de rigidez del nivel k y la línea de acción del esfuerzo de corte, medida perpendicularmente a la dirección considerada;

l la máxima dimensión en planta medida perpendicularmente a la dirección de V_k .

Se tomarán los valores más desfavorables para las sollicitaciones en los planos verticales sismorresistentes.

- Si el análisis estático se realiza en forma espacial las cuplas por piso equivalentes a las expresiones anteriores, se determinarán mediante las siguientes fórmulas:

$$m_{tk} = (1,5 e_4 + 0,07 l) F_k$$

$$m_{tk} = (e_4 - 0,07 l) F_k \leq 0$$

siendo:

m_{tk} el momento de la cupla por piso;

e_4 la distancia entre el centro de masas y el centro de rigidez del nivel k;

F_k la fuerza sísmica horizontal en el nivel k;

l la máxima dimensión en planta medida perpendicularmente a la dirección de V_k .

Se deberán considerar dos estados de carga independientes según las ecuaciones dadas girando todas las cuplas en el mismo sentido. Cuando la cupla dada por la segunda ecuación resulte mayor que cero, se considerará un valor nulo en ese nivel.

Caso c): Estructuras asimétricas constituidas por planos sismorresistentes verticales de comportamiento diferente.

Se considerarán como tales aquellas estructuras que presenten las siguientes características:

En ninguna planta la excentricidad geométrica es menor que el 5% ni mayor que el 25% de la mayor dimensión de la planta medida perpendicularmente a la dirección analizada.

Los C.S. de todos los niveles se encuentran aproximadamente alineados en dirección vertical.

Los C.M. de todos los niveles se encuentran aproximadamente alineados en dirección vertical.

En este caso deberá procederse a un análisis espacial estático acoplado de traslaciones y torsiones. En dicho análisis deberá considerarse, la influencia de las fuerzas estáticas equivalentes, correspondientes a los componentes de la construcción determinadas según el artículo 15.1.

Las torsiones accidentales se tendrán en cuenta aplicando en cada nivel una cupla torsora de valor:

$$m_{tk} = \pm 0,12 \cdot l \cdot F_k$$

siendo:

m_{tk} el momento de la cupla por piso;

l la máxima dimensión de la estructura en planta medida en dirección perpendicular a la analizada;

F_k la fuerza sísmica horizontal en el nivel k .

Las cuplas así definidas se supondrán actuando todas con el mismo sentido de giro, pero se examinarán dos estados de carga independientes con sentidos de giro.

Caso d): Estructuras no encuadradas dentro de los casos anteriores.

Deberá realizarse un análisis dinámico considerando el acoplamiento de traslación y torsión.

14.1.2. Fuerzas sísmicas verticales

Generalmente no es necesario considerar la componente vertical de la excitación sísmica, excepto en los siguientes componentes estructurales o estructuras:

Caso a) Voladizos, balcones y aleros.

Caso b) Cubiertas de edificios industriales de luces considerables. Miembros horizontales de estructuras de Hormigón Pretensado.

Caso c) Estructuras especiales, estructuras con salientes, etc.

Las estructuras o componentes estructurales se supondrán sometidas a fuerzas verticales proporcionales a los pesos, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$F_v = \pm C_v \cdot \gamma_d \cdot W$$

siendo:

F_v la fuerza sísmica vertical asociada a la carga gravitatoria W ;

C_v el coeficiente sísmico vertical, indicado en la Tabla 11;

γ_d un factor de riesgo, según el artículo 5.2.;

W la carga gravitatoria, operante en la estructura o componente estructural considerado.

En el caso a) la fuerza vertical resultante hacia arriba (calculada superponiendo el valor dado por la expresión anterior con la carga gravitatoria) no deberá ser menor que la determinada mediante la siguiente fórmula

$$F_{vn} = -0,25 \cdot C_v \cdot W$$

siendo:

F_{vn} la fuerza vertical neta, no superpuesta a la carga gravitatoria;

C_v el coeficiente sísmico vertical indicado en la Tabla 11;

W la carga gravitatoria operante en la estructura o componente estructural (ver el Capítulo 9).

Los valores del coeficiente sísmico vertical C_v se indican en la Tabla 11 en función de la zona sísmica para los casos a) y b).

Tabla 11. Valores del coeficiente sísmico vertical C_v en función de la zona sísmica, para los casos a) y b).

Zona sísmica	C_v	
	Caso a)	Caso b)
4	1,20	0,65
3	0,86	0,47
2	0,52	0,28
1	0,24	0,13

Para estructuras correspondientes al caso c) los valores del coeficiente sísmico vertical se determinarán mediante la utilización de los espectros de respuestas.

14.1.3. Estructuras tipo péndulo invertido

Son aquéllas en que por lo menos la mitad de la carga gravitatoria operante se encuentra en el tercio superior de su altura total, y tengan un solo elemento de soporte en la dirección que se analiza.

En este tipo de estructuras, además de las solicitaciones provocadas por las fuerzas sísmicas definidas en el artículo 14.1.1. se deberá considerar el efecto de las aceleraciones verticales provocadas por la rotación de la masa superior alrededor del eje horizontal normal de la dirección que se analiza y ubicado en la unión del soporte vertical con dicha masa.

Este efecto se puede tener en cuenta aproximadamente, aplicando una cupla de eje horizontal en el extremo superior del soporte, determinada por la siguiente expresión:

$$M_c = 1.5 \cdot F_s \cdot \rho^2 \cdot \frac{\omega}{\delta_s}$$

siendo:

M_c el momento de la cupla de eje horizontal aplicada en el extremo superior del soporte;

F_s la fuerza sísmica horizontal operante sobre la masa superior;

ρ el radio de giro de la masa superior con relación al eje horizontal que pasa por la unión de la masa y el soporte y es perpendicular a la dirección analizada;

ω el giro del extremo superior del soporte provocado por la fuerza F_s actuando estáticamente;

δ_s el desplazamiento del extremo superior del soporte provocado por la fuerza F_s actuando estáticamente.

No se considerarán valores del M_c inferiores a la mitad del momento de vuelco en la base determinado bajo la acción del sistema de cargas sísmicas horizontales solamente.

14.1.4. Control de deformaciones y efectos P-Delta

Se realizará de acuerdo con lo indicado en el Capítulo 13.

14.1.5. Componentes de la construcción

El análisis de estabilidad, resistencia, anclajes y conexiones de los componentes de la construcción se efectuará de acuerdo con lo indicado en el Capítulo 15.

14.1.6. Límites de aplicación del Método Estático

El método estático será aplicable siempre que se cumplan las siguientes condiciones:

a) La altura total de la construcción medida desde el nivel basal no supera los valores indicados en la Tabla 12.

Tabla 12. Límite de altura total de la construcción para la aplicación del Método Estático.

Zona sísmica	Construcción según destino y funciones		
	Grupo A ₀	Grupo A	Grupo B
4 y 3	12 m	30 m	40 m
2 y 1	16 m	40 m	55 m

b) Las estructuras del Grupo A₀ cuyas fallas puedan tener consecuencias catastróficas sobre la población (depósitos de gases y líquidos tóxicos, depósitos de materias radiactivas, grandes depósitos de líquidos inflamables) no podrán ser analizadas por el Método Estático.

c) El período fundamental de vibración T₀ debe ser menor que el triple del valor de T₂ correspondiente al perfil de suelo y zona sísmica considerada:

$$T_0 < 3 T_2$$

siendo:

T₀ el período fundamental de vibración;

T₂ el período de vibración correspondiente al fin del plafón, según el artículo 7.2.

d) La estructura debe encuadrarse dentro de los casos a), b) y c) de los procedimientos para considerar la torsión (ver el artículo 14.1.1.7.2.)

e) En elevación la estructura no presenta cambios bruscos de rigideces ni de masas.

14.2. ANÁLISIS MODAL ESPECTRAL

El Análisis Modal Espectral es un procedimiento de análisis dinámico aproximado en el que la respuesta de la estructura se obtiene mediante una combinación adecuada de las contribuciones modales, las cuales están caracterizadas por la máxima respuesta de cada modo afectadas por un factor denominado coeficiente de participación modal, el cual indica la extensión en que cada modo contribuye a la respuesta total de la estructura.

La aplicación del método se efectuará considerando los siguientes lineamientos:

14.2.1. La excitación sísmica se supondrá actuando translacionalmente en los apoyos del modelo vibratorio, independientemente en las direcciones indicadas en el Capítulo 11.

14.2.2. Para la determinación de los modos naturales de vibración, se admitirá que los materiales se comportan en forma lineal elástica. A tal fin, las características mecánicas de los materiales, rigideces y secciones de la estructura se adoptarán de acuerdo con lo establecido en el artículo 12.1.

Las ordenadas espectrales de diseño se determinan en base a la aplicación de las indicaciones del Capítulo 7 y de la consideración del factor de riesgo γ_d (según el artículo 5.2.), expresadas en la siguiente forma:

$$\text{Ordenada espectral} = S_a \cdot \gamma_d$$

14.2.3. Reducción por disipación de energía (ductilidad)

14.2.3.1. Para la determinación de esfuerzos se podrá considerar la capacidad de disipación de energía por deformaciones anelásticas de la estructura, empleando las ordenadas espectrales anteriormente indicadas reducidas por el factor R según lo indicado en el artículo 8.1. En tal caso las ordenadas espectrales se obtienen según la siguiente expresión:

$$\text{Ordenada espectral} = \frac{S_a \cdot \gamma_d}{R}$$

Las deformaciones totales calculadas empleando este criterio de reducción deberán ser amplificadas multiplicándolas por la ductilidad global μ (según el Capítulo 8).

14.2.3.2. La aplicación del análisis Modal Espectral considerando el desarrollo de deformaciones anelásticas como se indica en el punto anterior, implica admitir un desarrollo simultáneo de rótulas plásticas que disipen energía con una distribución espacial similar a las correspondientes distribuciones de energía cinética y/o de deformación. En consecuencia, este procedimiento no será aplicable cuando existan posibilidades de concentración de deformaciones anelásticas en sólo algunas zonas de la estructura.

14.2.4. Modelo vibratorio de análisis

Deberá incluir un número de grados de libertad dinámica acorde con las características de la estructura para representar convenientemente los modos naturales más significativos de la respuesta dinámica. Las masas asociadas a los grados de libertad se determinarán según lo establecido en el Capítulo 9.

Para estructuras de edificios las masas se podrán discretizar en los niveles de losas de entrepiso y techo, y cuando se considere la interacción suelo-estructura, a nivel de platea y manto de fundación.

Los grados de libertad dinámicos asociados con rotaciones alrededor de ejes horizontales deberán ser especialmente tenidos en cuenta en las estructuras tipo péndulo invertido y otros casos que como éste requieran la consideración del acoplamiento dinámico entre desplazamientos verticales y horizontales.

14.2.5. Cuando sea posible considerar un sólo grado de libertad (traslación en la dirección de análisis) asociado a cada masa, y no se tenga en cuenta la interacción suelo-estructura, el procedimiento de análisis podrá ajustarse a los siguientes lineamientos:

- Los períodos asociados a cada modo y las formas modales correspondientes se determinarán mediante métodos reconocidos de la mecánica estructural considerando perfectamente empotrada la base del edificio a nivel de fundación.

- La parte del esfuerzo de corte en la base correspondiente al modo emésimo se determinará mediante la siguiente fórmula:

$$V_m = \frac{\gamma_d \cdot S_{am} \cdot \bar{W}_m}{R}$$

siendo:

V_m la parte del esfuerzo de corte en la base correspondiente al modo emésimo;

γ_d el factor de riesgo según el artículo 5.2.;

S_{am} la pseudoaceleración elástica horizontal correspondiente al modo emésimo, obtenida según el artículo 7.2. en función del período T_m del modo emésimo.

R el factor de reducción por disipación de energía, según el artículo 8.1.;

\bar{W}_m la carga gravitatoria modal efectiva, determinada según la siguiente expresión:

$$\bar{W}_m = \frac{\left[\sum_{i=1}^n W_i \cdot \phi_{im} \right]^2}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \phi_{im}^2}$$

con:

W_i la carga gravitatoria supuesta concentrada en el nivel i;

ϕ_{im} el desplazamiento en el nivel i correspondiente a la forma modal asociada al modo emésimo.

- Los esfuerzos de corte modales V_m se distribuirán en altura de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$F_{km} = \frac{W_k \cdot \phi_{km}}{\sum_{i=1}^n W_i \cdot \phi_{im}} V_m$$

siendo:

F_{km} la fuerza sísmica en el nivel k asociada al modo emésimo;

W_k la carga gravitatoria supuesta concentrada en el nivel k;

ϕ_{km} el desplazamiento en el nivel k correspondiente a la forma modal asociada al modo emésimo.

- El esfuerzo de corte en el nivel k correspondiente al modo emésimo se determinará mediante la siguiente expresión:

$$V_{km} = \boxed{\times} F_{km}$$

siendo:

V_{km} el esfuerzo de corte en el nivel k correspondiente al modo emésimo.

- El momento de vuelco en la superficie de contacto suelo-fundación, asociado al modo emésimo, se determinará de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$M_{fm} = \sum_{i=1}^n F_{im} \cdot h_i^*$$

siendo:

M_{fm} El momento de vuelco en la superficie de contacto suelo-fundación, asociado al modo emésimo.

F_{im} la fuerza sísmica en el nivel i, asociada al modo emésimo;

h_i^* la altura del nivel i de la construcción medida desde el nivel de fundación.

14.2.6. Modos a considerar

Se incluirán, por lo menos, todos aquellos modos cuya contribución a los efectos totales superen el 5% de la contribución correspondiente del modo fundamental. Pero no podrán considerarse menos de 3 modos, excepto en el caso que el modelo presente sólo 2 grados de libertad.

14.2.7. Superposición modal

Para obtener el efecto total en una dirección de análisis, se tomará la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los efectos modales. Cuando existan modos cuyos períodos difieran entre sí en menos del 10%, sus efectos se sumarán en valores absolutos y se elevarán al cuadrado como grupo, según la siguiente expresión:

$$E_t = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + \dots + (|E_k| + |E_{k+1}| + \dots + |E_m|)^2 + \dots + E_n^2}$$

siendo:

E_t el efecto total (esfuerzo o desplazamiento);

$E_1; E_2; \dots; E_n$ las contribuciones modales de esfuerzos o desplazamientos correspondientes a los modos 1, 2, ..., n;

k; k+1;...; m, los modos cuyos períodos no difieren entre sí más del 10%.

14.2.8. Se controlará que el esfuerzo de corte en la base en cada una de las direcciones, determinado según el Análisis Modal Espectral no resulte inferior al 75% del esfuerzo de corte en la base determinado por el Método Estático utilizando el correspondiente período fundamental. Si esto no se cumple se incrementarán todos los efectos del análisis modal multiplicando por el cociente entre el 75% del corte basal estático y el corte basal obtenido.

14.2.9. La aplicación del Análisis Modal Espectral se realizará de acuerdo con las condiciones de simetría estructural de la siguiente manera:

14.2.9.1. Caso a) Estructuras con dos ejes de simetría en planta.

Deben cumplirse las condiciones indicadas en el Método Estático (ver el artículo 14.1.1.7.2.).

En este caso se determinarán dos grupos de modos de vibración traslacionales independientes entre sí para sendas direcciones de análisis.

Los efectos torsionales serán considerados en cada dirección según lo especificado en el Método Estático para este tipo de estructuras y se sumarán algebraicamente a la respuesta dinámica total en la dirección respectiva.

El modelo vibratorio de análisis tendrá como mínimo un grado de libertad traslacional en los niveles en que se encuentran las masas.

14.2.9.2. Caso b) Estructuras asimétricas constituidas por planos sismorresistentes verticales de comportamiento similar.

Deben cumplirse las condiciones indicadas en el Método Estático para este tipo de estructuras (ver el artículo 14.1.1.7.2.).

Los efectos traslacionales y torsionales se podrán determinar según las siguientes alternativas.

14.2.9.2.1. Se determinarán dos grupos de modos de vibración traslacionales para sendas direcciones de análisis sin acoplar a ellos la torsión dinámica.

La torsión se tendrá en cuenta en forma estática según lo indicado en el Método Estático (ver el artículo 14.1.1.7.2.) y se sumarán algebraicamente a la respuesta dinámica total en la dirección respectiva.

El modelo vibratorio de análisis incluirá, en cada nivel, por lo menos un grado de libertad traslacional en los niveles en que se encuentren las masas.

14.2.9.2.2. Según especificaciones del caso c).

14.2.9.3. Caso c). Estructuras asimétricas no incluidas en los casos a) y b).

Se determinarán los modos de vibración que incluyan efectos traslacionales y rotacionales alrededor de un eje vertical.

El modelo vibratorio de análisis tendrá como mínimo, en cada nivel, un grado de libertad traslacional en cada dirección horizontal de análisis y un grado de libertad rotacional alrededor de un eje vertical.

14.2.10. Si se tiene en cuenta la influencia de la deformabilidad del suelo, la ordenada espectral de diseño correspondiente al modo fundamental no deberá ser inferior a la que corresponde a 1,3 veces el período fundamental determinado en la hipótesis de base fija.

14.2.11. El control de la Distorsión Horizontal del Piso y de los Efectos P-Delta se realizará de acuerdo con lo indicado en los artículos 13.1. y 13.2.

14.3. SUPERPOSICIÓN MODAL PASO A PASO

El procedimiento de Superposición Modal Paso a Paso consiste en integrar a través del tiempo las ecuaciones desacopladas de movimiento de la estructura según los modos naturales de vibración, sumando directamente las contribuciones de cada modo instante a instante, adoptándose como resultado la envolvente de máximas solicitaciones y deformaciones, obtenidas en la duración del movimiento excitatriz. Para tal fin se admitirá que la estructura funciona en campo elástico lineal.

La excitación sísmica se define mediante la aplicación de movimientos reales o artificiales, en los apoyos de la construcción.

14.3.1. Acelerogramas a utilizar

Las características de cada acelerograma a emplear serán tales que se satisfagan las siguientes condiciones:

a) La aceleración máxima será por lo menos igual al producto siguiente:

$$\gamma_d \cdot a_s$$

siendo:

γ_d el coeficiente de riesgo, según el artículo 5.2.;

a_s la ordenada al origen del espectro de pseudoaceleraciones especificado en el artículo 7.2. que depende de la zona sísmica y del tipo de suelo.

b) El espectro elástico de respuesta para amortiguamiento del 5% obtenido del acelerograma considerado deberá tener igual área entre 0,05 segundo y el valor del período fundamental de la construcción analizada, que el correspondiente espectro elástico establecido en el artículo 7.1. amplificado por γ_d .

Las ordenadas espectrales obtenidas no podrán ser menores que el 70% de la ordenada espectral establecida en el artículo 7.2. amplificada por γ_d .

c) Cuando se trate de estructuras que puedan desarrollar disipación de energía mediante deformaciones anelásticas, la condición anterior se referirá al correspondiente espectro de respuesta elastoplástico.

14.3.2. La excitación sísmica se supondrá actuando translacionalmente en los apoyos del modelo vibratorio, independientemente según las direcciones indicadas en el artículo 11.5.

14.3.3. Para el modelo vibratorio de análisis se aplicarán las especificaciones del artículo 14.2.4.

14.3.4. Para las construcciones de los grupos A y B, se considerarán los resultados de la aplicación de por lo menos 3 acelerogramas independientes, mientras que para el grupo A_0 se tendrán en cuenta los resultados de por lo menos 4 acelerogramas independientes.

14.3.5. Para diseño y verificaciones se adoptarán los valores de solicitaciones y deformaciones que resulten de promediar los correspondientes de las envolventes obtenidas por la aplicación de cada acelerograma. Pero en dicho promedio no se incluirán valores que sean inferiores al 85% del máximo encontrado.

14.3.6. Reducción de solicitaciones por capacidad de disipación de energía en campo anelástico (Ductilidad)

Se podrá considerar, sobre las solicitaciones, la influencia de la capacidad de disipación de energía por deformaciones anelásticas.

Para ello se reducirán las solicitaciones obtenidas del análisis elástico, dividiéndolas por el factor de reducción R establecido en el

artículo 8.1. Sin embargo, deberán tenerse en cuenta las limitaciones correspondientes a las posibilidades de concentraciones de deformaciones anelásticas en sólo algunas partes de la estructura de acuerdo con lo especificado en el artículo 14.2.3.2.

14.3.7. Se verificará que el esfuerzo de corte en la base en cada una de las direcciones analizadas no resulte inferior al 70% del esfuerzo de corte en la base determinado por el Método Estático utilizando el correspondiente valor del período fundamental. Si resulta inferior se amplificarán los efectos obtenidos multiplicando por el cociente entre el 70% del corte basal estático y el corte basal obtenido.

14.4. INTEGRACIÓN DIRECTA PASO A PASO

Este procedimiento consiste en la integración directa paso a paso de las ecuaciones de movimiento acopladas de todos los grados de libertad dinámica.

La excitación sísmica se define mediante la aplicación de movimientos reales o artificiales, en los apoyos de la construcción.

14.4.1. Acelerogramas a utilizar

Se deberán cumplir las especificaciones del artículo 14.3.1.

Cuando el análisis se efectúe en campo no-lineal y la construcción se ubique en zonas epicentrales, se deberán incluir en los acelerogramas pulsos largos e intensos de aceleraciones.

14.4.2. Número de acelerogramas a aplicar.

Según lo especificado en el artículo 14.3.4.

14.4.3. Efectos resultantes

a) Cuando se realice el análisis admitiendo comportamiento elástico lineal, para diseño y verificaciones se adoptarán los valores de solicitaciones y deformaciones que resulten de promediar los correspondientes de las envolventes obtenidas por la aplicación de cada acelerograma. Pero en dicho promedio no se incluirán valores que sean inferiores al 80% del máximo.

b) Cuando el análisis se realice considerando el comportamiento no lineal, se deberá comprobar que las envolventes de efectos resultantes y ductilidades requeridas por la aplicación de cada acelerograma sean satisfechas por el diseño y dimensionamiento.

14.4.4. Reducción de solicitaciones por capacidad de disipación de energía en campo anelástico

Cuando el análisis dinámico se realice admitiendo comportamiento elástico lineal, si la estructura posee capacidad de disipación de energía, podrá tenerse en cuenta su influencia sobre la reducción de solicitaciones a través del factor R establecido en el artículo 8.1., pero con las limitaciones señaladas en el artículo 14.2.3.2.

CAPÍTULO 15. COMPONENTES DE LA CONSTRUCCIÓN

Todo componente (arquitectónico o mecánico) de la construcción que no forma parte de la estructura principal, deberá ser diseñado para resistir las fuerzas que la excitación sísmica induce sobre él, y además deberá vincularse directa o indirectamente a la estructura principal para transferir las fuerzas anteriormente señaladas

15.1. FUERZA ESTÉTICA EQUIVALENTE

Para la comprobación de la propia estabilidad y resistencia de un componente ubicado en el nivel k, como asimismo de sus anclajes y/o conexiones con la estructura principal, se deberá considerar una fuerza estática equivalente F_p aplicada en su centro de gravedad, determinada mediante la siguiente expresión:

$$F_p \cdot C_{pk} \cdot W_p$$

siendo:

F_p la fuerza estática equivalente;

W_p el peso del componente considerado;

C_{pk} el coeficiente sísmico correspondiente al componente ubicado en el nivel k de la construcción.

El coeficiente sísmico C_{pk} se determinará mediante la siguiente expresión:

$$C_{pk} = a_s \cdot \gamma_p \cdot \gamma_r$$

siendo:

C_{pk} el coeficiente sísmico correspondiente al componente ubicado en el nivel k de la construcción;

a_s la ordenada al origen del espectro de pseudoaceleraciones especificado en el artículo 7.2., que depende de la zona sísmica y del tipo de suelo y de fundación;

γ_p el coeficiente del tipo de componente indicado en la Tabla 13;

γ_r el coeficiente de ubicación del componente indicado en Tabla 13.

Tabla 13. Componentes de la construcción.

Caso	Componentes de la construcción	Dirección a considerar	γ_p	γ_r	
				ubicación	
				a) ⁽¹⁾	b) ⁽²⁾
1	Cornisas, parapetos, marquesinas, letreros, acondicionadores de aire, paneles de fachada, balcones, antepechos, ornamentos, accesorios y elementos no clasificados.	cualquiera	3	1,5	1,0
2	Muros, tabiques, cerramientos, paneles divisorios, vinculados en todo su contorno a la estructura.	normal a su plano	1,0	1,3	1,0
3	Escaleras que no forman parte de la estructura.	cualquiera	1,5	1,3	1,3
4	Tanques, torres, antenas, casillas de ascensores y apéndices cuyas estructuras sean de configuración y naturaleza diferente a la estructura principal y con período propio inferior a 0,4 ó mayor que 1,6 del período fundamental de la estructura.	cualquiera	1,5	1,3	1,0
5	Idem caso 4, pero con período fundamental comprendido entre 0,4 y 1,6 del período fundamental de la estructura.	cualquiera	3,0	1,3	1,0

(1) La ubicación a) indicada en la Tabla 13 corresponde a las siguientes posibilidades:

- Elementos que al fallar puedan precipitarse fuera de la construcción con riesgo para gran número de personas, otras estructuras o bienes.

- Elementos cuyo colapso o desprendimiento afecten a: circulaciones interiores o exteriores del edificio, accesos, vías de comunicación, sistemas de emergencia, etc.

(2) La ubicación b) corresponde a las posibilidades no comprendidas en a).

Nota: Cuando no se determine el período de los apéndices correspondientes al caso 4, se tomarán los valores de γ_p y γ_r correspondientes al caso 5.

15.1.1. En la Tabla 13 se consignan asimismo las direcciones en que se considerará la fuerza estática equivalente operante sobre el componente.

15.2. Las fuerzas friccionales derivadas de las acciones gravitatorias no se tomarán en consideración para el diseño y verificación de anclajes y conexiones.

15.3. Cuando se apliquen los métodos de análisis dinámico o cuando se trate de casos especiales, se podrán analizar los efectos de la excitación sísmica sobre los componentes de la construcción mediante la determinación de los correspondientes espectros de piso, pero los valores obtenidos no serán inferiores al 70 % de los correspondientes determinados según el artículo 15.1.