

EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



VOLÚMEN 4 Seguridad Estructural

TOMO II Diseño por Sismo

REVISIÓN 2022

NORMATIVIDAD E INVESTIGACIÓN



VOLUMEN 4. SEGURIDAD ESTRUCTURAL.
TOMO II. DISEÑO POR SISMO.

REVISIÓN 2022

ÍNDICE

1	DISEÑO POR SISMO	4
1.1	Espectros de diseño elásticos.....	4
1.1.1	Introducción	4
1.1.2	Peligro sísmico en México	5
1.1.3	Regionalización sísmica	10
1.1.4	Determinación de los parámetros dinámicos del suelo y clasificación de tipo de terreno	11
1.1.5	Espectros de diseño transparente (Grupo B).....	14
1.1.5.1	Parámetros espectrales para estructuras del sector educativo.....	16
1.1.5.2	Espectros de Diseño Regionales.....	16
1.1.5.3	Espectros de diseño específicos de sitio.....	17
1.2	Espectros para diseño de estructuras del sector educativo	18
1.2.1	Factores reductores.....	19
1.2.1.1	Factor de amortiguamiento, β	19
1.2.1.2	Factor de comportamiento sísmico, Q	19
1.2.1.2.1	Valores de Q y Q' a emplear para fines de diseño.....	20
1.2.1.2.2	Factor reductor por ductilidad Q'	20
1.2.1.3	Factor reductor por sobrerresistencia, R	23
1.2.1.4	Factor por redundancia, ρ	24
1.2.1.5	Factor de amplificación por comportamiento degradante, A_{cd}	24
1.2.1.6	Modificación de la respuesta estructural por efectos de interacción suelo-estructura.....	24
1.2.1.7	Espectro de diseño reducido para el estado límite de prevención de colapso	24
1.2.1.8	Espectro de diseño para el estado límite de servicio	25
1.2.2	Condiciones de regularidad	25
1.2.2.1	Estructuras regulares.....	25
1.2.2.2	Estructura irregular	25
1.2.2.3	Estructura fuertemente irregular	25
1.2.2.4	Corrección por irregularidad.....	25
1.2.3	Elección del tipo de análisis.....	26
1.2.4	Método simplificado.....	26
1.2.5	Método estático.....	29
1.2.5.1	Valuación de fuerzas sísmicas sin estimar T_e	29
1.2.5.2	Valuación de fuerzas sísmicas estimando T_e	31

1.2.5.3	Momentos torsionantes	32
1.2.5.4	Momentos de volteo	34
1.2.5.5	Efectos de segundo orden.....	34
1.2.5.6	Efectos combinados de los movimientos del terreno	35
1.2.5.7	Componente vertical.....	35
1.2.5.8	Comportamiento asimétrico.....	36
1.2.5.9	Revisión por cortante basal.....	37
1.2.6	Método dinámico	37
1.2.7	Revisión de estados límite	38
1.2.7.1	Desplazamientos horizontales por limitación de daños a elementos no estructurales (límite de servicio)	38
1.2.7.2	Desplazamientos horizontales para seguridad contra colapso	38
1.2.7.3	Rotura de vidrios	38
1.2.7.4	Separación con estructuras adyacentes.....	39

1 DISEÑO POR SISMO

México es un país propenso a sismos, por ende proporcionar las herramientas que se pueden utilizar para reducir efectos substancialmente, será el propósito de este tomo, estableciendo criterios para diseños estructurales que sean seguros y apropiados a cada región, permitiendo la edificación de la Infraestructura física Educativa con las características que deben tener al ser fundamentales como refugios en caso de desastres naturales.

1.1 Espectros de diseño elásticos

1.1.1 Introducción

La intensidad del movimiento sísmico es uno de los peligros más importantes al que están expuestas las construcciones en el país. Para tomar en cuenta el peligro sísmico, frecuentemente se recurre al uso de espectros de diseño que dependen, entre otros aspectos, de la cercanía del sitio a las fuentes generadoras de temblores y de las condiciones locales del terreno.

Para garantizar la seguridad de la INFE se suministran espectros de diseño sísmico regionales basados en los propuestos en el Capítulo de Diseño Sísmico del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (CDS-MDOC) vigente, que proporcionan espectros para terreno rocoso con variaciones continuas dentro del territorio mexicano.

Para la construcción de los espectros se deberán tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

1. Se deberá realizar una exploración básica o detallada del subsuelo como se señala en el inciso 1.1.4 de este Tomo y en el Tomo 1.
2. Se tendrán espectros de diseño por tipo de suelo y espectros de diseño con efectos de sitio.
3. Los espectros de diseño por tipo de suelo se construirán a partir de un parámetro relacionado con el peligro sísmico, que es la aceleración máxima en terreno rocoso, y se continuará con factores con los que se toman en cuenta las condiciones del terreno.
4. Los espectros de diseño con efectos de sitio se construirán a partir de espectros de peligro uniforme en roca y de propiedades dinámicas del suelo idealizado como un medio estratificado. Los efectos de sitio se tomarán en cuenta en forma explícita con criterios que permitan considerar las amplificaciones dinámicas del terreno en forma rigurosa.
5. Los espectros de diseño con efectos de sitio son envolventes de los espectros de respuesta, elástica e inelástica, para todo periodo estructural.

6. Los espectros de diseño deben ser transparentes, es decir, carecer de factores de reducción ajenos al peligro sísmico.
7. Las ordenadas espectrales corresponden al 5% del amortiguamiento crítico estructural.
8. A periodo estructural largo, los espectros de diseño de desplazamiento que se derivan de los espectros de aceleración deben tender a los desplazamientos máximos del terreno.
9. Se suministrarán espectros de diseño para los estados límite de servicio y de resistencia

1.1.2 Peligro sísmico en México

El movimiento sísmico del terreno se caracteriza con el espectro de peligro uniforme en roca. Este corresponde al periodo de retorno óptimo propuesto en el CDS-MDOC vigente. Para construir los espectros transparentes, se suministra en la Tabla 1, el valor de la aceleración máxima en roca a_0^r ($T_e = 0$) en cm/s^2 , para las principales poblaciones del país (con origen aproximadamente en el centro de la población). Si se requiere obtener el valor de a_0^r para otras localidades, se deberá hacer uso del programa PRODISIS y/o PRODISIS disponibles en la siguiente dirección electrónica:

<https://www2.ineel.mx/prodisis/es/prodisis.php#mod>.

Estos valores corresponden al nivel de importancia del Grupo B, por lo tanto, para obtener el espectro de diseño transparente para las estructuras del Grupo A, se deberá construir primero el espectro para las estructuras del grupo B y después multiplicarse por el factor de importancia estructural de 1.5.

Tabla 1. Aceleración máxima en roca a_0^r

No.	POBLACIÓN	Longitud	Latitud	a_0^r
1	Acapulco, Gro.	-99.88	16.86	527.64
2	Aguascalientes, Ags.	-102.29	21.88	49.97
3	Álvaro Obregón, D. F.	-99.21	19.38	104.62
4	Azcapotzalco, D. F.	-99.19	19.49	101.04
5	Benito Juárez, D. F.	-99.16	19.38	104.56
6	Buenavista de Cuellar, Gro.	-99.41	18.46	136.59
7	Campeche, Camp.	-90.52	19.84	30.81
8	Cancún (Benito Juárez), Q. R.	-86.86	21.16	29.43
9	Celaya, Gto.	-100.81	20.53	84.17
10	Chalco, Méx.	-98.90	19.26	108.3
11	Chetumal (Othón P. Blanco), Q. R.	-88.30	18.50	48.26
12	Chicoloapan, Méx.	-98.89	19.40	103.68
13	Chihuahua, Chih.	-106.07	28.63	53.87

No.	POBLACIÓN	Longitud	Latitud	a_0^r
14	Chilpancingo, Gro.	-99.50	17.55	268.38
15	Chimalhuacán, Méx.	-98.96	19.43	102.76
16	Ciudad Acuña, Coah.	-100.95	29.32	44.92
17	Ciudad Apodaca, N. L.	-100.19	25.78	45.00
18	Ciudad del Carmen, Camp.	-91.86	18.61	60.93
19	Ciudad General Escobedo, N. L.	-100.35	25.80	44.98
20	Ciudad López Mateos, Méx.	-99.26	19.56	99.26
21	Ciudad Madero, Tamps.	-97.84	22.25	44.56
22	Ciudad Nezahualcóyotl, Méx.	-99.00	19.40	103.82
23	Ciudad Obregón, Son.	-109.93	27.48	100.61
24	Ciudad Santa Catarina, N. L.	-100.44	25.68	44.96
25	Ciudad Valles, S. L. P.	-99.00	22.00	46.75
26	Ciudad Victoria, Tamps.	-99.14	23.74	44.79
27	Coacalco, Méx.	-99.11	19.64	97.14
28	Coatzacoalcos, Ver.	-94.46	18.14	102.31
29	Colima, Col.	-103.73	19.25	314.94
30	Córdoba, Ver.	-96.93	18.88	111.88
31	Coyoacán, D. F.	-99.16	19.35	105.57
32	Cuajimalpa, D. F.	-99.29	19.36	105.35
33	Cuauhtémoc, D. F.	-99.15	19.44	102.63
34	Cuautitlán Izcalli, Méx.	-99.21	19.65	96.98
35	Cuautla, Mor.	-98.95	18.81	124.65
36	Cuernavaca, Mor.	-99.22	18.92	120.68
37	Culiacán, Sin.	-107.39	24.80	70.61
38	Delicias, Chih.	-105.47	28.19	51.15
39	Durango, Dgo.	-104.66	24.00	46.41
40	Ecatepec, Méx.	-99.04	19.60	98.09
41	Ensenada, B. C.	-116.61	31.86	178.36
42	Fresnillo, Zac.	-102.87	23.18	45.74
43	Gómez Palacio, Dgo.	-103.49	25.57	45.73
44	Guadalajara, Jal.	-103.35	20.66	101.88
45	Guadalupe, N. L.	-100.21	25.67	45.00
46	Guanajuato, Gto.	-101.26	21.02	66.70
47	Guaymas, Son.	-110.90	27.92	155.19
48	Gustavo A. Madero, D. F.	-99.12	19.48	101.27

No.	POBLACIÓN	Longitud	Latitud	a_0^r
49	Hermosillo, Son.	-110.96	29.08	82.38
50	Hidalgo del Parral, Chih.	-105.67	26.93	49.13
51	Iguala, Gro.	-99.54	18.35	144.01
52	Irapuato, Gto.	-101.35	20.67	82.28
53	Ixtapaluca, Méx.	-98.89	19.31	106.65
54	Iztacalco, D. F.	-99.10	19.40	103.87
55	Iztapalapa, D. F.	-99.09	19.36	105.22
56	Jiutepec, Mor.	-99.18	18.88	122.08
57	Juárez, Chih.	-106.42	31.68	57.64
58	La Paz, B. C. S.	-110.31	24.14	148.09
59	León, Gto.	-101.67	21.12	64.36
60	Los Mochis, Sin.	-108.99	25.79	129.64
61	Los Reyes (La Paz), Méx	-98.98	19.37	104.79
62	Magdalena Contreras, D. F.	-99.24	19.31	106.93
63	Manzanillo, Col.	-104.29	19.08	454.25
64	Matamoros, Tamps.	-97.50	25.87	44.74
65	Mazatlán, Sin.	-106.41	23.24	68.37
66	Mérida, Yuc.	-89.62	20.98	17.49
67	Metepec, Méx.	-99.60	19.26	108.77
68	Mexicali, B. C.	-115.44	32.63	379.82
69	Miguel Hidalgo, D. F.	-99.19	19.41	103.61
70	Milpa Alta, D. F.	-99.02	19.19	111.01
71	Minatitlán, Ver.	-94.55	17.99	107.30
72	Monclova, Coah.	-101.42	26.91	44.96
73	Monterrey, N. L.	-100.31	25.67	44.98
74	Morelia, Mich.	-101.19	19.70	97.93
75	Naucalpan, Méx.	-99.24	19.48	101.39
76	Navojoa, Son.	-109.44	27.07	87.95
77	Nicolás Romero, Méx.	-99.31	19.62	99.31
78	Nogales, Son.	-110.94	31.30	73.96
79	Nuevo Laredo, Tamps.	-99.54	27.48	44.92
80	Oaxaca, Oax.	-96.73	17.06	221.63
81	Ojo de Agua (Tecámac), Méx.	-99.03	19.68	96.11
82	Orizaba, Ver.	-97.10	18.85	114.74
83	Pachuca, Hgo.	-98.76	20.10	88.66

No.	POBLACIÓN	Longitud	Latitud	a_0^r
84	Piedras Negras, Coah.	-100.52	28.70	44.92
85	Playa del Carmen (Solidaridad), Q. R.	-87.07	20.63	32.00
86	Poza Rica, Ver.	-97.46	20.53	73.43
87	Puebla, Pue.	-98.20	19.04	114.46
88	Puerto Vallarta, Jal.	-105.22	20.65	353.65
89	Querétaro, Qro.	-100.39	20.59	81.77
90	Reynosa, Tamps.	-98.29	26.08	44.86
91	Salamanca, Gto.	-101.20	20.57	83.95
92	Saltillo, Coah.	-101.00	25.43	44.94
93	San Cristóbal de las Casas, Chis.	-92.64	16.74	152.46
94	San Juan del Río, Qro.	-99.98	20.38	85.64
95	San Luis Potosí, S. L. P.	-100.98	22.15	47.15
96	San Luis Río Colorado, Son.	-114.77	32.45	276.86
97	San Nicolás de los Garza, N. L.	-100.25	25.75	44.98
98	San Pedro Garza García, N. L.	-100.38	25.65	44.98
99	Tampico, Tamps.	-97.86	22.22	44.80
100	Tapachula, Chis.	-92.27	14.90	295.27
101	Tehuacán, Pue.	-97.40	18.46	129.92
102	Tepic, Nay.	-104.90	21.50	147.69
103	Tijuana, B. C.	-117.05	32.50	178.95
104	Tláhuac, D. F.	-99.00	19.27	108.12
105	Tlalnepantla, Méx.	-99.20	19.54	99.73
106	Tlalpan, D. F.	-99.17	19.29	107.54
107	Tlaquepaque, Jal.	-103.31	20.64	101.13
108	Tlaxcala, Tlax.	-98.24	19.32	104.45
109	Toluca, Méx.	-99.65	19.29	107.86
110	Tonalá, Jal.	-103.24	20.62	99.27
111	Torreón, Coah.	-103.42	25.53	45.61
112	Tultitlán, Méx.	-99.17	19.65	96.95
113	Tuxtla Gutiérrez, Chis.	-93.10	16.75	155.62
114	Uruapan, Mich.	-102.05	19.42	125.63
115	Venustiano Carranza, D. F.	-99.09	19.43	102.88
116	Veracruz, Ver.	-96.14	19.17	95.78
117	Villahermosa, Tab.	-92.95	18.00	94.64
118	Xalapa, Ver.	-96.91	19.54	93.55

No.	POBLACIÓN	Longitud	Latitud	a_0^r
119	Xochimilco, D. F.	-99.10	19.26	108.48
120	Zacatecas, Zac.	-102.57	22.76	46.16
121	Zamora, Mich.	-102.28	19.98	99.54
122	Zapopan, Jal.	-103.39	20.72	100.79

1.1.3 Regionalización sísmica

Las intensidades del peligro sísmico varían en el territorio mexicano en forma continua, tanto para periodos de retorno constante, como periodos de retorno óptimos. Sin embargo, para la construcción de espectros para construcciones de la INFE, es necesario contar con una regionalización sísmica que ayude a obtener los efectos de sitio. Para esto, se propone una regionalización en que se consideran cuatro zonas: dos de baja sismicidad y dos de alta sismicidad definidas en la Tabla 2. Para determinar la zona sísmica se proporciona un criterio simple basado en el valor de la aceleración máxima en roca a_0^r para periodo de retorno óptimo, este valor se obtiene de la Tabla 1. En la Figura 1 se ilustra esta zonificación.

Tabla 2 - Regionalización sísmica

a_0^r (cm/s ²)	Zona	Intensidad sísmica
$a_0^r \geq 200$	D	Muy Alta
$100 \leq a_0^r < 200$	C	Alta
$50 \leq a_0^r < 100$	B	Moderada
$a_0^r < 50$	A	Baja

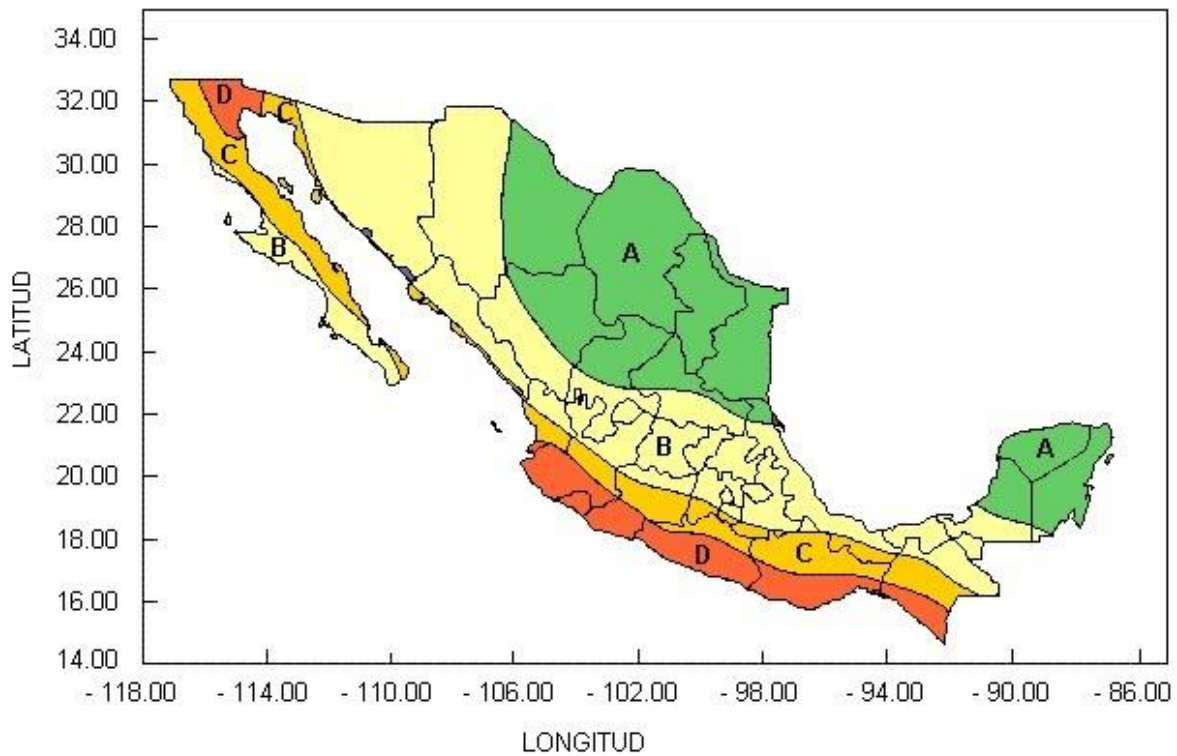


Figura 1 - Regionalización sísmica de la República Mexicana (CDS-MDOC)

1.1.4 Determinación de los parámetros dinámicos del suelo y clasificación de tipo de terreno

Para construcciones de la infraestructura física educativa se determinarán los parámetros dinámicos del depósito de suelo idealizado como un manto homogéneo (equivalente), es decir, el periodo dominante, la velocidad de propagación de ondas de corte y el espesor. La relación entre estos parámetros es la siguiente:

$$T_s = \frac{4H_s}{V_s} \quad (1)$$

En donde:

T_s es el periodo dominante del estrato equivalente del terreno (periodo del sitio)

H_s es el espesor total del estrato equivalente del terreno

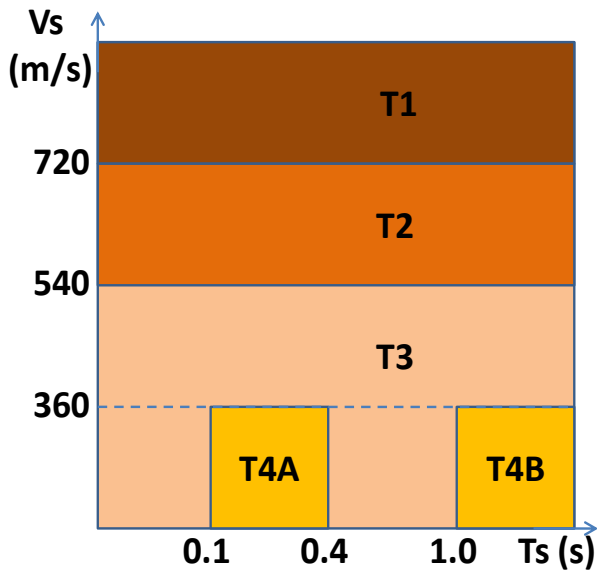
V_s es la velocidad efectiva de propagación de ondas de corte en el estrato

La clasificación del terreno se hace en función de la velocidad V_s , y el periodo dominante del terreno T_s , de acuerdo con los siguientes criterios:

TIPO I	Terreno firme o rocoso en que no se presentan amplificaciones dinámicas: Depósito de suelo con $V_s \geq 720$ m/s
TIPO II	Terreno formado por suelos en que se presentan amplificaciones dinámicas bajas: Depósito de suelo con 540 m/s $\leq V_s < 720$ m/s, o suelos granulares o arcillosos compactos con $V_s \geq 720$ m/s
TIPO III	Terreno formado por suelos en que se presentan amplificaciones dinámicas intermedias: Depósito de suelo con 360 m/s $\leq V_s < 540$ m/s o suelos con $V_s < 360$ m/s y $T_s < 0.1$ s ó 0.4 s $< T_s < 1.0$ s
TIPO IVa	Terreno formado por suelos en que se presentan grandes amplificaciones dinámicas: Depósito de suelo con $V_s < 360$ m/s y 0.1 s $< T_s < 0.4$ s
TIPO IVb	Terreno formado por suelos blandos de periodo largo. Depósito de suelo con $V_s < 360$ m/s y $T_s > 1.0$ s

Esta clasificación se ilustra a continuación:

Figura 2 - Carta de microzonificación sísmica



En esta carta de microzonificación sísmica, que ilustra la clasificación de tipo de terreno. Deberá entrarse con los tres pares que forman la triada contenida en la ecuación (1), Para ello, se deberán obtener los tres valores a partir de pruebas independientes. Estas pruebas, indicadas en la Tabla 3 se deben realizar de acuerdo con lo indicado Tomo 1.

Tabla 3 - Pruebas recomendadas para obtener los parámetros del depósito de suelo

Parámetro	Prueba
H_s	<ul style="list-style-type: none"> • Cota de profundidad a la que se encuentre un basamento rocoso o de suelo firme detectado en los estudios geotécnicos para el diseño de la cimentación. • Prueba de penetración estándar • Sondeo Eléctrico Vertical • Sondeo Electromagnético por Transitorios
T_s	<ul style="list-style-type: none"> • Prueba de vibración ambiental • Registros sísmicos de sitio
V_s	<ul style="list-style-type: none"> • Prueba de dispersión de ondas (MASW, SPAC) • Tendido de refracción sísmica • Cross-hole • Down-hole • Sonda suspendida • Cono sísmico • Dilatómetro sísmico

Con la obtención de estos tres parámetros en forma independiente, y la ecuación (1), se tienen tres combinaciones posibles que deben verificarse, como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4 - Pares de valores para la clasificación del terreno

Caso	Combinación de datos	Determinación del periodo	Determinación de la velocidad
1	H_s, V_s	$T_s = \frac{RH_s}{V_s}$	V_s
2	T_s, V_s	T_s	V_s
3	H_s, T_s	T_s	$V_s = \frac{4H_s}{T_s}$

Cada combinación de valores de T_s y V_s de la Tabla 4 se representa como un punto en la carta de microzonificación. La clasificación del terreno se hará considerando la condición más desfavorable, es decir:

1. El terreno se clasificará como Tipo IVb si al menos uno de los puntos cae en la zona de terreno IVb, y el resto en terrenos III, II y I
2. El terreno se clasificará como Tipo IVa si al menos uno de los puntos cae en la zona de terreno IVa, y el resto en terrenos III, II y I
3. El terreno se clasificará como Tipo III si al menos uno de los puntos cae en la zona de terreno III, y el resto en terrenos II y I
4. El suelo se clasificará como terreno II si al menos uno de los puntos cae en la zona de terreno II, y el resto en terreno I
5. El suelo se clasificará como terreno I si todos los puntos caen en la zona de terreno I

Finalmente, las pruebas recomendadas para obtener la velocidad equivalente del depósito de suelo, en realidad proporcionan perfiles estratigráficos de velocidad y espesor. Para determinar la velocidad equivalente del depósito de suelo, debe considerarse que el espesor total del depósito es:

$$H_s = \sum_{i=1}^N h_i \quad (2)$$

Y utilizar el criterio más desfavorable para determinar V_s de las siguientes ecuaciones:

- a) Velocidad promedio

$$V_s = \frac{\sum_{i=1}^N V_i h_i}{H_s} \quad (3)$$

- b) Lentitud promedio

$$V_s = \frac{H_s}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_i}} \quad (4)$$

- c) Aproximación del modo fundamental. Se hará uso de las ecuaciones (7 – 9), para el cálculo del periodo dominante del terreno:

$$T_s = \frac{4}{\sqrt{g}} \sqrt{\left(\sum_{n=1}^N \frac{h_n}{G_n}\right) \left(\sum_{n=1}^N \gamma_n h_n (w_n^2 + W_n W_{n-1} + W_{n-1}^2)\right)} \quad (5)$$

En donde:

- γ_n es el peso volumétrico del n-ésimo estrato
 G_n es el módulo de rigidez en cortante del n-ésimo estrato, igual a $\gamma_n v_s^2/g$
 h_n es el espesor del n-ésimo estrato
 N es el número de estratos

Con:

$$\begin{aligned} W_0 &= 0 && \text{en roca basal} \\ W_n &= 1 && \text{en estrato superficial} \end{aligned} \quad (6)$$

Y

$$W_n = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\gamma_i V_i^2}}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{\gamma_i V_i^2}} \quad \text{en los estratos intermedios} \quad (7)$$

V_i es la velocidad de propagación de ondas de corte del i-ésimo estrato

La velocidad efectiva del depósito se determinará con la ecuación (1). De los criterios consignados en los incisos a, b y c, se tomará la velocidad de ondas de corte V_s que conduzca a la condición más desfavorable, que va de terreno Tipo III a terreno Tipo I.

1.1.5 Espectros de diseño transparente (Grupo B)

Las ordenadas del espectro de aceleración (Figura 3) para diseño sísmico, $a = Sa/g$, expresadas como fracción de la gravedad, g , adquieren la siguiente forma paramétrica:

$$a = \frac{Sa(T_e)}{g} = \begin{cases} a_0 + (\beta c - a_0) \frac{T_e}{T_a} & \text{Si } T_e < T_a \\ \beta c & \text{Si } T_a \leq T_e < T_b \\ \beta c \left(\frac{T_b}{T_e}\right)^r & \text{Si } T_b \leq T_e < T_c \\ \beta c \left(\frac{T_b}{T_c}\right)^r \rho_c \left(\frac{T_c}{T_e}\right)^2 & \text{Si } T_e \geq T_c \end{cases} \quad (8)$$

- a es la aceleración espectral normalizada con la aceleración de la gravedad
- $Sa(T_e)$ es la pseudo aceleración en función del periodo estructural T_e
- a_0 es la aceleración máxima del terreno
- β factor de amortiguamiento
- c es la máxima ordenada espectral
- T_e es el periodo estructural
- T_a es el límite inferior de la meseta del espectro de diseño
- T_b es el límite superior de la meseta del espectro de diseño
- T_c es el periodo de inicio de la rama descendente en que los desplazamientos espectrales tienden correctamente al desplazamiento del terreno
- r parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales para $T_b \leq T_e < T_c$
- k es el parámetro que controla la caída de las ordenadas espectrales para $T_e \geq T_c$
- ρ_c es un factor empleado para definir la variación del espectro en la rama descendente calculado de la siguiente forma:

$$\rho_c = k + (1 - k) \left(\frac{T_c}{T_e}\right)^2 \quad (9)$$

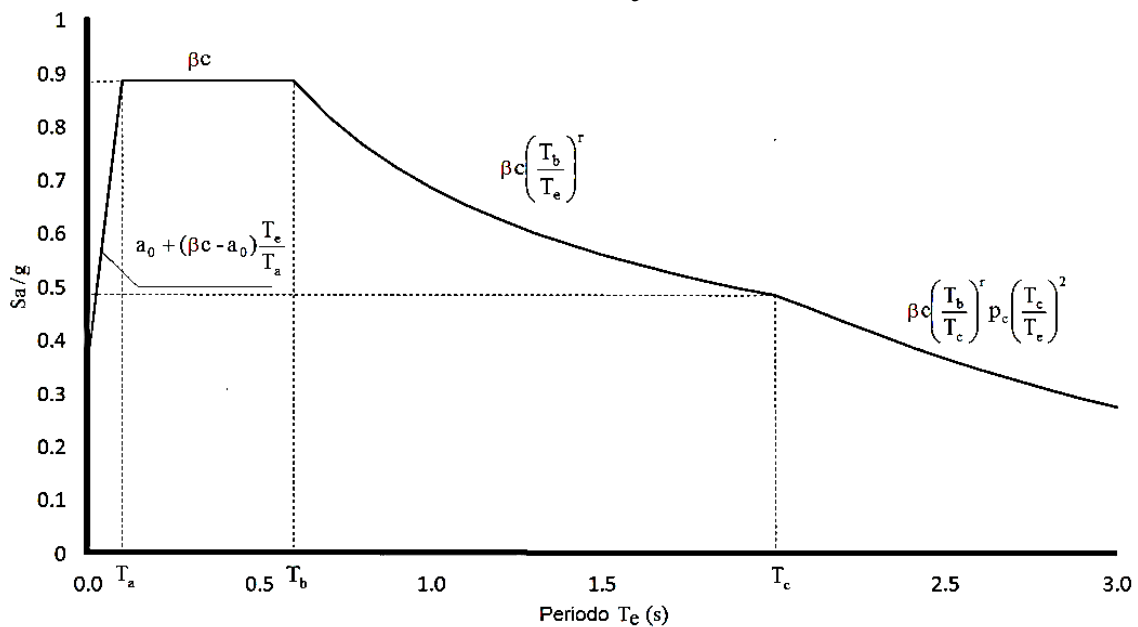


Figura 3 - Espectro de diseño sísmico

1.1.5.1 Parámetros espectrales para estructuras del sector educativo

Para obtener los parámetros del espectro de diseño para la INFE se empleará el criterio de los Espectros Regionales para los terrenos tipo I, II, III y IVa. Para el terreno IVb se empleará el criterio de los Espectros Específicos de Sitio.

1.1.5.2 Espectros de Diseño Regionales

En el criterio de Espectros Regionales, la aceleración máxima del terreno, a_0^r , y la máxima ordenada espectral, C , se determinan como:

$$a_0 = \frac{a_0^r F_{Sit}}{g} \quad (10)$$

$$C = a_0 F_{Res} \quad (11)$$

En donde:

F_{Sit} es el factor de sitio

F_{Res} es el factor de respuesta

Estos factores se calculan mediante las siguientes expresiones, dependiendo de la aceleración máxima en roca a_0^r y el tipo de suelo.

Tabla 5 - Factores de sitio y respuesta para diferentes tipos de terreno

Tipo de terreno	Factor de Sitio	Factor de Respuesta
Tipo I	$F_{Sit} = 1.0$	$F_{Res} = 2.5$
Tipo II	$F_{Sit} = 1.40 - 0.05 \frac{(a_0^r - 50)}{50}$	$F_{Res} = 2.75 - 0.05 \frac{(a_0^r - 50)}{50}$
Tipo III	$F_{Sit} = 1.90 - 0.15 \frac{(a_0^r - 50)}{50}$	$F_{Res} = 3.20 - 0.10 \frac{(a_0^r - 50)}{50}$
Tipo IVa	$F_{Sit} = 2.50 - 0.30 \frac{(a_0^r - 50)}{50}$	$F_{Res} = 4.0 - 0.20 \frac{(a_0^r - 50)}{50}$

Los valores de a_0^r y c deben cumplir con las siguientes restricciones especificadas en la Tabla 6.

Tabla 6 - Restricción de los valores y a_0^r c (en cm/s^2)

	Terreno I	Terreno II	Terreno III
a_0^r	$32 \leq a_0^r \leq 490$	$80 \leq a_0 \leq 690$	$94 \leq a_0 \leq 752$
c	$80 \leq c \leq 1\ 225$	$320 \leq c \leq 2\ 000$	$390 \leq c \leq 2\ 256$

El resto de los parámetros, dependientes del tipo de terreno, necesarios para definir el espectro de diseño se consignan en la Tabla 7.

Tabla 7 - Valores de los periodos característicos y exponentes que controlan las ramas descendentes de los espectros de diseño

Zona	Tipo de terreno	Ta(s)	Tb(s)	Tc(s)	k	r
A	I	0.1	0.5	2.0	1.5	1/2
	II	0.1	0.6	2.0	1.15	2/3
	III	0.15	0.825	2.0	0.8	1
	IV a	0.15	0.5	2.0	0.8	1
B	I	0.1	0.5	2.0	1.5	1/2
	II	0.1	0.6	2.0	1.20	2/3
	III	0.15	0.775	2.0	0.9	1
	IV a	0.15	0.5	2.0	0.9	1
C	I	0.1	0.5	2.0	1.5	1/2
	II	0.1	0.6	2.0	1.25	2/3
	III	0.15	0.738	2.0	1.0	0.9
	IV a	0.15	0.5	2.0	1.0	0.9
D	I	0.1	0.5	2.0	1.5	1/2
	II	0.1	0.6	2.0	1.30	2/3
	III	0.15	0.685	2.0	1.1	0.8
	IV a	0.15	0.5	2.0	1.1	0.8

1.1.5.3 Espectros de diseño específicos de sitio

El carácter conservador de los espectros regionales, como a los aquí descritos, tienen el propósito de proteger a las estructuras en todo tipo de terreno y en todas las zonas sísmicas. Sin embargo, se recomienda realizar estudios detallados del terreno para sustentar un diseño más racional mediante espectros específicos de sitio, como los que se consignan en el capítulo 3.1 del CDS-MDOC vigente. No obstante, para terrenos clasificados como tipo IVb, será obligatorio el empleo de espectros específicos de sitio.

La exploración del terreno debe ser detallada, de acuerdo con la especificación hecha en el capítulo 3.1 del CDS-MDOC vigente.

Las microzonificaciones sísmicas que se conozcan para otras localidades serán aplicables siempre y cuando sean congruentes con los criterios de clasificación de terrenos de cimentación establecidos en el presente Capítulo.

Con la exploración detallada se caracterizan las condiciones locales del terreno. El procedimiento consiste en cuantificar las amplificaciones del movimiento sísmico mediante el modelo unidimensional de suelos estratificados y considerar el movimiento en roca como excitación. Este procedimiento se describe con detalle en el CDS-MDOC vigente.

1.2 Espectros para diseño de estructuras del sector educativo

En esta Sección se presentan los criterios para evaluar las sollicitaciones sísmicas que obran en estructuras del sector educativo. Para el diseño se considerarán dos estados límites: a) el nivel de servicio, en que se revisarán las deformaciones para limitar los daños y, b) el nivel de prevención de colapso, en que se determinarán las resistencias y se revisarán las deformaciones para prevenir la falla estructural. Los choques contra estructuras adyacentes y rotura de vidrios se tomarán en cuenta en el nivel de prevención de colapso.

Tabla 8 - Valores de amortiguamiento en función del sistema estructural

Sistema Estructural	ζ_e (%)
Estructuras de concreto reforzado	5
Estructuras de concreto presforzado	4
Estructuras ligeras de acero de baja altura y con elementos principalmente unidos con soldadura	2
Estructuras ligeras de acero de baja altura y con elementos principalmente con tornillos	3
Marcos rígidos de acero con conexiones rígidas soldadas	3
Marcos rígidos de acero con conexiones rígidas atornilladas	5
Marcos de acero arriostrados por contravientos concéntricos, excéntricos o restringidos a pandeo, o bien, rigidizados por placas de acero	4
Marcos rígidos con columnas compuestas, o bien, marcos compuestos arriostrados por contravientos, placas o muros	5
Marcos de acero o compuestos con amortiguamiento suplementario	*
Muros de concreto o de madera contrachapada, o de madera de duela	5
Muros de placas de acero	4
Muros de carga mampostería confinada de bloques macizos de concreto	7
Muros de carga de mampostería confinada de bloques de huecos de concreto	6
Muros de carga de mampostería que no cumplan las especificaciones para mampostería confinada ni para mampostería reforzada interiormente	6

1.2.1 Factores reductores

Para estructuras del sector educativo se consideran las reducciones por ductilidad, sobrerresistencia y redundancia, los posibles cambios por emplear amortiguamientos distintos al 5 %, así como las modificaciones por interacción suelo–estructura. Se considerarán amplificaciones para estructuras con comportamiento histerético degradante ubicadas en suelos blandos. Para ello, se tomarán en cuenta lo siguiente.

1.2.1.1 Factor de amortiguamiento, β

Para un amortiguamiento estructural $\zeta_e = 5\%$, se tiene que $\beta = 1$, para cualquier periodo estructural T_e . Para tomar en cuenta otros niveles de amortiguamiento estructural proporcionados por el tipo de estructuración, el uso de dispositivos disipadores de energía, o bien, por los efectos de la interacción suelo–estructura, deberá obtenerse el valor del factor de amortiguamiento, β , de acuerdo al criterio establecido en la sección 3.2 del CDS-MDOC vigente.

$$\beta(T_e \zeta_e) = \begin{cases} \left(\frac{0.05}{\zeta_e}\right)^{0.45} & \text{Si } T_e < T_c \\ \left(\frac{0.05}{\zeta_e}\right)^{\frac{0.45 T_c}{T_e}} & \text{Si } T_e \geq T_c \end{cases} \quad (12)$$

En donde:

T_c es el periodo del inicio de la rama descendente en que los desplazamientos espectrales tienden correctamente al desplazamiento del terreno.

T_e es el periodo estructural en la dirección del análisis.

ζ_e es el amortiguamiento estructural. Cuando se utilicen sistemas de aislamiento y disipación de energía, este valor es la suma del amortiguamiento inherente de la estructura más el que proporcionan los sistemas.

1.2.1.2 Factor de comportamiento sísmico, Q

En la actualidad, la forma más adecuada de caracterizar las estructuras en función de su ductilidad consiste en el empleo del factor de comportamiento sísmico, Q , que en realidad no sólo está asociado a la ductilidad estructural, sino también a la estructuración, al deterioro o efecto que puede llegar a contrarrestar gran parte de la capacidad extra en resistencia que suministra la ductilidad y a reservas de capacidad ante carga sísmica que los métodos convencionales de diseño no consideran.

Para construcciones de la infraestructura física educativa se deberán usar los factores consignados en las Tabla 9, Tabla 10 y Tabla 11.

Cabe señalar que para fines de análisis (cálculo de fuerzas sísmicas), el factor de comportamiento sísmico, Q , deberá ser como máximo 3. No obstante, para fines de diseño (detallado) deberá utilizar el factor de comportamiento sísmico $Q = 4$.

1.2.1.2.1 Valores de Q y Q' a emplear para fines de diseño

En todos los casos se usará para toda la estructura, en la dirección de análisis, el valor mínimo de Q que corresponde a los diversos entrepisos y sistemas sismorresistentes de la estructura en la dirección de análisis. El factor Q puede diferir en las dos direcciones ortogonales en que se analiza la estructura, según sean sus propiedades en estas direcciones.

1.2.1.2.2 Factor reductor por ductilidad Q'

Para fines de diseño, en el estado límite de colapso, se tendrá en cuenta el comportamiento inelástico de la estructura, aunque sea de manera aproximada. Para ello, las ordenadas espectrales se dividirán por el factor de reducción por ductilidad, Q' a fin de obtener las fuerzas sísmicas reducidas. Para cualquier tipo de estructura, el factor reductor se calculará como sigue:

$$Q' = \begin{cases} 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta T_e}{k T_b}} & \text{Si } T_e \leq T_b \\ 1 + (Q - 1) \sqrt{\frac{\beta \rho_b}{k}} & \text{Si } T_e > T_b \end{cases} \quad (13)$$

En donde:

- Q es el factor de comportamiento sísmico (Sección 10.2.1.2)
- T_b es el límite superior de la meseta del espectro de diseño (Sección 10.1.5.2)
- T_e es el periodo estructural
- k es un parámetro que controla la caída del espectro (Sección 10.1.5.2)
- β es el factor de amortiguamiento (Sección 10.2.1.1)
- ρ_b es un factor empleado para definir la variación del espectro en la rama descendente, calculado de la siguiente forma:

$$\rho_b = k + (1 - k) \left(\frac{T_b}{T_e} \right)^2 \quad (14)$$

En caso de que se adopten dispositivos especiales capaces de disipar energía por amortiguamiento o comportamiento inelástico, podrán emplearse criterios de diseño sísmico que difieran de los especificados en esta sección, siempre que sean congruentes con ellos y se demuestre convincentemente tanto la eficacia de los dispositivos o soluciones estructurales como la validez de los valores del amortiguamiento y el factor reductor que se propongan.

Tabla 9 - Factores de comportamiento sísmico y distorsiones límite para estructuras de concreto

Estructuración	Condición	$Q_{m\acute{a}x}$	$\gamma_{m\acute{a}x}$	Requisitos
Marcos	Marcos de concreto especiales	2.0	0.020	-
	Marcos de concreto ordinarios	2.0	0.015	-
Marcos de elementos prefabricados	Con nudos monolíticos y conexiones dúctiles ubicadas fuera de las zonas críticas	2.0	0.020	-
	Con conexiones en zonas críticas o en los nudos	2.0	0.015	-
Sistema formado por muros de concreto	Muros de concreto especiales	2.0	0.015	-
	Muros de concreto ordinarios	2.0	0.010	-
Sistema dual formado por marcos y muros de concreto	Con muros de concreto especiales	2.0	0.015	-
	Con muros de concreto ordinarios	2.0	0.010	-
Sistema dual formado por marcos y muros acoplados de concreto	Con muros de concreto y trabes de acoplamiento especiales	2.0	0.015	-
	Con muros de concreto y trabes de acoplamiento ordinarios	2.0	0.010	-
Sistema dual formado por marcos de concreto y contravientos metálicos	Contravientos concéntricos especiales o contravientos restringidos contra pandeo	2.0	0.015	-
	Contravientos concéntricos ordinarios	2.0	0.010	-
Sistema formado por marcos y muros diafragma no desligados	Marcos especiales	2.0	0.015	-
	Marcos ordinarios	2.0	0.010	-
Sistemas con base en columnas de concreto en voladizo	Con columnas de marcos especiales	2.0	0.010	(1)
Sistema suspendido soportado por un núcleo de concreto formado por muros o marcos	Con marcos especiales	2.0	0.010	(2)
Marcos exteriores y columnas interiores interconectados por diafragmas horizontales rígidos	Marcos exteriores especiales y columnas interiores ordinarias	2.0	0.015	(3)

Notas:

- 1) Este sistema solo debe usarse en la zona sísmica A.

- 2) Este sistema solo debe usarse en las zonas sísmicas A y B.
- 3) Este sistema solo debe usarse en las zonas sísmicas A y B.

Tabla 10 - Factores de comportamiento sísmico y distorsiones límite para estructuras de acero y compuestas

Sistema estructural	Descripción	Q_{max}	$\gamma_{máx}$	Requisitos
Marcos rígidos	Marco rígido ordinario	2.0	0.015	14.10.1
	Marco rígido especial	3.0	0.020	14.10.2
	Marco rígido con armadura especial	3.0	0.020	14.10.3
	Sistema de columnas en voladizo ordinario	1.5	0.010	14.10.4
	Sistema de columnas en voladizo especial	2.0	0.015	14.10.4
Sistema dual formado por marcos de acero rigidizados por contravientos de acero o muros de placa de acero	Marco con contraventeo concéntrico ordinario	2.0	0.010	14.10.5
	Marco con contraventeo concéntrico especial	3.0	0.020	14.10.6
	Marco con contraventeo excéntrico	3.0	0.020	14.10.7
	Marco con contraventeo restringido a pandeo	3.0	0.020	14.10.8
	Marco con muros de cortante con placa especial	3.0	0.020	14.10.9
Marcos rígidos compuestos	Marco rígido compuesto ordinario	2.0	0.015	14.10.1
	Marco rígido compuesto especial	3.0	0.020	14.10.2
	Sistema de columnas compuestas en voladizo ordinario	1.5	0.010	14.10.4
	Sistema de columnas en voladizo especial	2.0	0.015	14.10.4
Sistema dual formado por marcos compuestos rigidizados por contravientos de acero o muros de concreto o	Marco compuesto con contraventeo ordinario	2.0	0.010	14.10.5
	Marco con contraventeo concéntrico especial	3.0	0.020	14.10.6
	Marco compuesto con contraventeo excéntrico	3.0	0.020	14.10.7
	Marco compuesto con muro	2.0	0.015	14.10.10

Sistema estructural	Descripción	Q_{max}	$\gamma_{máx}$	Requisitos
compuestos	de concreto ordinario			
	Marco compuesto con muro de concreto especial	3.0	0.020	14.10.10
	Marco con placa de acero embebida en concreto	3.0	0.020	14.10.11
	Marco con placas de acero rellenas de concreto	3.0	0.020	14.10.9
	Marco con muros compuestos acoplados	3.0	0.020	14.10.11

Tabla 11 - Factores de comportamiento sísmico y distorsiones límite para estructuras de mampostería

Estructuración	Q_{max}	$\gamma_{máx}$
Muros de carga de mampostería confinada de piezas macizas con refuerzo horizontal	2.0	0.010
Muros de carga de mampostería confinada de piezas macizas	2.0	0.005
Muros de carga de mampostería confinada de piezas huecas con refuerzo horizontal	2.0	0.008
Muros de carga de mampostería confinada de piezas huecas	1.5	0.008
Muros de carga de mampostería de piezas huecas reforzadas interiormente	1.5	0.006
Muros diafragma	(1)	(2)
Muros de carga de mampostería confinada en combinación con otro sistema estructural de concreto o acero	(1)	(2)
<p>i. Cuando los muros sean parte de marcos o de estructuras que no puedan resistir al menos 70 % de la carga lateral sin tomar en cuenta la resistencia de los muros, la ductilidad será de acuerdo con el tipo de mampostería utilizada en el muro diafragma. En caso contrario, podrá usarse el valor de Q asignado a los marcos o la estructura.</p> <p>ii. Se tomará de acuerdo con el tipo de mampostería utilizada.</p>		

1.2.1.3 Factor reductor por sobrerresistencia, R

En general, existen diversos factores que hacen que las estructuras tengan una sobrerresistencia. La opción más práctica para tomar en cuenta este aspecto consiste en aplicar un factor reductor del lado de las acciones sísmicas. En construcciones de la infraestructura física educativa la reducción por sobrerresistencia está dada por el factor R , el cual tomará un valor de 2.

1.2.1.4 Factor por redundancia, ρ

Para estructuras del sector educativo se considera un factor de redundancia $\rho=1$.

1.2.1.5 Factor de amplificación por comportamiento degradante, A_{cd}

Para estructuras ubicadas en Terrenos II o III y que sean susceptibles a desarrollar comportamientos histeréticos con degradaciones de rigidez y/o resistencia, las ordenadas del espectro de diseño se multiplicarán por el factor de amplificación por comportamiento degradante A_{cd} dado por:

$$A_{cd} = 0.8 + \frac{1}{2 + 5 \left(2 \frac{T_e}{T_s} - 1 \right)^5} \quad (15)$$

1.2.1.6 Modificación de la respuesta estructural por efectos de interacción suelo–estructura

En el diseño sísmico de estructuras ubicadas en terrenos de mediana y baja rigidez, se deben tener en cuenta los efectos de la interacción entre el suelo y la estructura (interacción suelo–estructura), aplicando las recomendaciones indicadas en esta sección. Estas recomendaciones se emplearán cuando en un modelo usado para el análisis sísmico de la respuesta de una estructura no se consideran los efectos de la flexibilidad de la cimentación. En general, el uso de estas recomendaciones reduce los valores de las fuerzas laterales, el cortante basal y los momentos de volteo, calculados para una estructura supuesta con base indeformable, e incrementa los desplazamientos laterales. Solo se justificará tomar en cuenta los efectos de la interacción suelo–estructura cuando se tenga que:

$$\frac{T_{e0}}{T_s} \frac{H_s}{H_{e0}} < 2.5 \quad (16)$$

1.2.1.7 Espectro de diseño reducido para el estado límite de prevención de colapso

Por definición los espectros de diseño se construyen para un valor nominal de amortiguamiento estructural del 5 %, no obstante, este valor puede variar en las siguientes situaciones: a) que después de examinar la estructuración del edificio, el analista demuestre o justifique el uso de un valor diferente, b) que los efectos de interacción sean significativos e induzcan cambios en el valor nominal de amortiguamiento de 5 % y, C) una combinación de ambas. Ello se incorpora a través de un factor de amortiguamiento, β , que se calcula como se indica en la Sección 1.2.1.1. El concepto de dependencia de las ordenadas del espectro con el amortiguamiento, así como sus reducciones debidas a la ductilidad, a la sobrerresistencia y a la redundancia se pueden representar mediante:

$$a' = \frac{a(\beta)}{Q'R\rho} \quad (17)$$

Para estructuras con comportamiento histerético degradante ubicadas en suelos blandos, las ordenadas espectrales reducidas a' se calcularán como:

$$a' = \frac{a(\beta)A_{cd}}{Q'R\rho} \quad (18)$$

Los valores de los parámetros de la forma espectral propuesta corresponden al nivel de prevención de colapso para estructuras del Grupo B. Para obtener los espectros de diseño para la INFE todas las ordenadas espectrales del Grupo B deberán multiplicarse por el factor de importancia estructural de 1.5.

1.2.1.8 Espectro de diseño para el estado límite de servicio

Para el estado límite de servicio deben emplearse las ordenadas espectrales elásticas divididas entre el factor de servicio $F_{ser} = 5.5$ (incluso cuando se considere comportamiento histeréticos degradante), sin reducciones por sobrerresistencia, redundancia o ductilidad. Los desplazamientos laterales que se calculen con las ordenadas del espectro para el estado límite de servicio serán desplazamientos reales.

1.2.2 Condiciones de regularidad

1.2.2.1 Estructuras regulares

Para que las estructuras del sector educativo puedan considerarse regulares deben satisfacer simultáneamente las condiciones establecidas en la sección 3.3.2.1 de estructuras tipo edificios del CDS-MDOC vigente.

1.2.2.2 Estructura irregular

Una estructura es irregular si no cumple con una o más de las condiciones de regularidad establecidas en la sección 3.3.2.2 de estructuras tipo edificios del CDS-MDOC vigente.

1.2.2.3 Estructura fuertemente irregular

Una estructura será considerada fuertemente irregular si se cumple alguna de las condiciones de regularidad establecidas en la sección 3.3.2.3 de estructuras tipo edificios del CDS-MDOC vigente.

1.2.2.4 Corrección por irregularidad

En el diseño sísmico de estructuras que no satisfagan las condiciones de regularidad especificadas, el factor reductor por ductilidad Q' , descrito en la sección 1.2.1.2, se multiplicará por el factor α indicado en la Tabla 14 a fin de obtener las fuerzas sísmicas reducidas por ductilidad. Sin embargo, en ningún caso Q' se tomará menor que la unidad.

Tabla 12 - Factor correctivo por irregularidad, α

Factor correctivo α	Tipo de irregularidad
0.9	Cuando no se cumpla una condición de regularidad enumeradas del 1 al 9 en la sección 3.3.2.1 de estructuras tipo edificios del CDS-MDOC vigente
0.8	Cuando no se cumplan dos o más condiciones de regularidad, o no se cumpla con la condición 10 u 11 de regularidad de la sección 3.3.2.1 de estructuras tipo edificios del CDS-MDOC vigente
0.7	Estructuras fuertemente irregulares

Los desplazamientos laterales calculados, tomando en cuenta la reducción por irregularidad, se multiplicarán por el producto Q_{Rp} .

1.2.3 Elección del tipo de análisis

Para el análisis sísmico de estructuras de la INFE se puede recurrir a tres tipos de análisis:

- a) Método simplificado
- b) Método estático
- c) Método dinámico

El método simplificado se describe en la Sección 1.2.4. Es el más simple de utilizar, sin embargo, sólo es aplicable a estructuras regulares con altura no mayor de 13 m, que cumplan simultáneamente con todos los requisitos indicados.

El método estático, descrito en la Sección 1.2.5, es aplicable a edificios regulares cuya altura sea menor o igual que 30 m y estructuras irregulares con altura no mayor de 20 m. En terreno firme, estos límites se incrementan a 40 m y 30 m, respectivamente. Para que una estructura se considere regular, debe cumplir las condiciones descritas en la Sección 1.2.2, en caso contrario, se considerará irregular. Las estructuras que no cumplan los requisitos anteriores, se deberán analizar empleando un método dinámico según se establece en la sección 3.3.6 del CDS-MDOC vigente. El análisis dinámico es aplicable en todos los casos.

1.2.4 Método simplificado

El método simplificado solamente será aplicable al análisis de estructuras que cumplan simultáneamente los tres requisitos siguientes:

En cada planta, al menos el 75 % de las cargas verticales estarán soportadas por muros ligados entre sí mediante losas monolíticas u otros sistemas de piso suficientemente resistentes y rígidos al corte. Dichos muros tendrán distribución sensiblemente simétrica con respecto a dos ejes ortogonales y deberán satisfacer las condiciones que establecen las correspondientes NTC para estructuras de mampostería, concreto, estructuras metálicas y madera. Para que la distribución de elementos resistentes pueda considerarse sensiblemente simétrica, la excentricidad torsional en dos direcciones ortogonales (Figura 4), calculada estáticamente, no deberá exceder el 10 % de la dimensión en planta del edificio ecuación (19), medida paralelamente a la excentricidad.

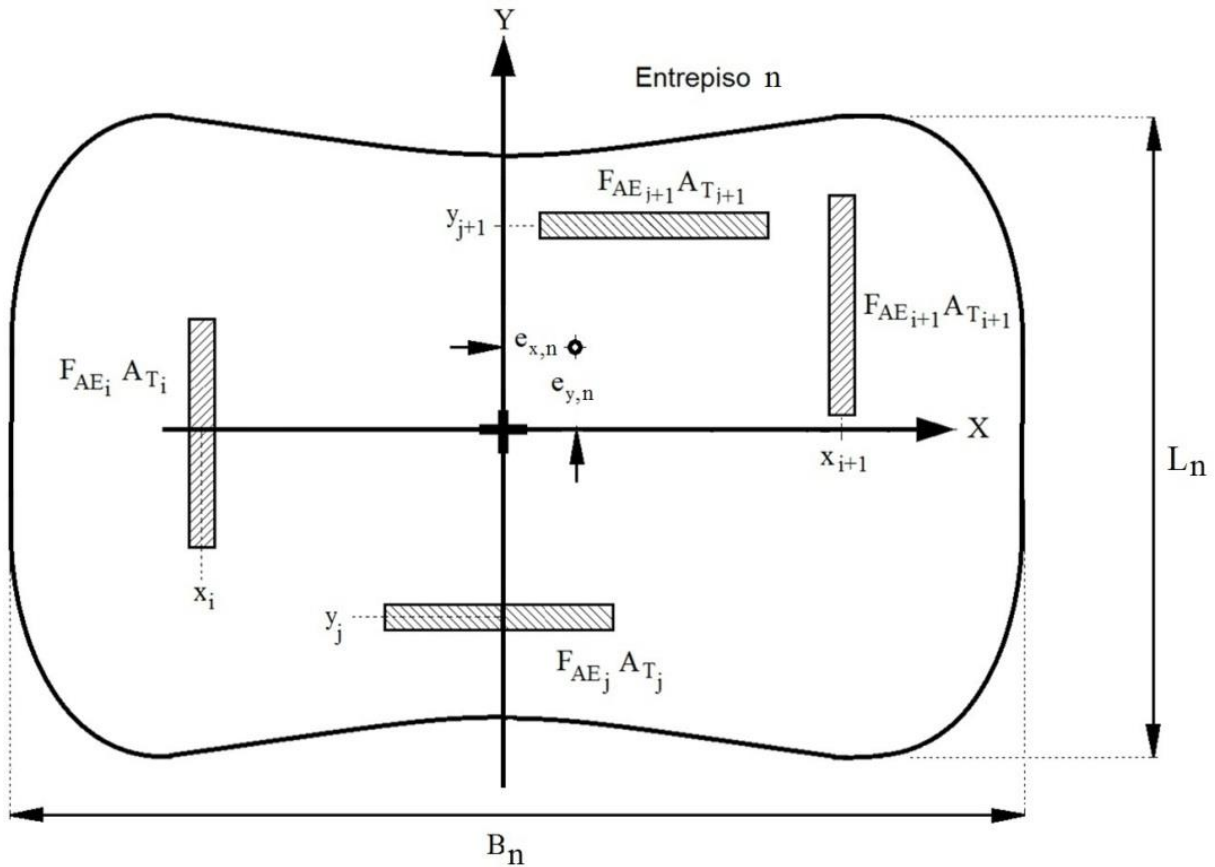


Figura 4 - Centro de cortante del entreciso n

En donde:

B_n es la dimensión menor del entreciso n

L_n es la dimensión mayor del entreciso n

A_{T_i} es el área bruta de la sección transversal del muro i

F_{AE_i} es el factor de área efectiva i

$e_{x,n}$ $e_{y,n}$ son las excentricidades torsionales en el entreciso n , provocadas por los muros en las direcciones x, y , calculadas de la siguiente manera:

$$e_{x,n} = \frac{(\sum_{i=1}^k x_i F_{AEi} A_{Ti})}{\sum_{i=1}^k F_{AEi} A_{Ti}} \leq 0.10 B_n, \quad e_{y,n} = \frac{(\sum_{j=1}^k x_j F_{AEj} A_{Tj})}{\sum_{j=1}^k F_{AEj} A_{Tj}} \leq 0.10 L_n \quad (19)$$

El área efectiva de los muros es el producto del área bruta de la sección transversal y el factor de área efectiva F_{AE} , que para el estado límite de servicio o comportamiento elástico ($Q = 1$) estará dado por las siguientes ecuaciones:

$$F_{AE} = \begin{cases} 1.5 + \frac{h'_n}{L} - 1.5 \left(\frac{h'_n}{L}\right)^2 & \text{si } \frac{h'_n}{L} \leq 1.0 \\ 2.2 - 1.5 + \frac{h'_n}{L} - 0.3 \left(\frac{h'_n}{L}\right)^2 & \text{si } 1.0 < \frac{h'_n}{L} \leq 2.5 \end{cases} \quad (20)$$

Y para el estado límite de prevención de colapso, F_{AE} estará dado por la siguiente ecuación:

$$F_{AE} = 0.6 + 0.6 \frac{h'_n}{L} - 0.3 \left(\frac{h'_n}{L}\right)^3 + 0.05 \left(\frac{h'_n}{L}\right)^3 \quad \text{si } \frac{h'_n}{L} \leq 2.5 \quad (21)$$

En donde:

h'_n es la altura del entrepiso n
 L es la longitud del muro

Los muros referidos en este párrafo podrán ser de mampostería, concreto reforzado, placa de acero, compuestos de estos dos últimos materiales o de madera. En este último caso estarán arriostrados con diagonales. Sin embargo, cabe señalar que, en la estructura de interés, todos los muros en todos los entrepisos deberán ser de un mismo material.

1. La relación entre longitud y ancho de la planta de la estructura no excederá de 2.0, a menos que, para fines de análisis sísmico, dicha planta se pueda suponer dividida en tramos independientes cuya relación entre longitud y ancho satisfaga esta restricción y la indicada en el inciso 1 y cada tramo resista la fuerza cortante que le corresponda calculada como se indica al final de esta sección.
2. La relación entre la altura y la dimensión mínima de la base de la estructura no excederá de 1.5 y la altura de la estructura no será mayor de 13 m.
3. El sistema de piso constituye un diafragma rígido y resistente. Por lo tanto, no podrá utilizar el método simplificado en estructuras cuyo sistema de piso esté compuesto por: a) madera contrachapada (triplay) sobre vigas o armaduras de madera, b) lámina de acero sobre vigas o armaduras de acero, c) losa plana aligerada con casetones o bloques de espuma de poliestireno de grandes dimensiones (mayores a 60 cm por lado) o, d) vigueta de concreto presforzado con bovedillas de espuma de poliestireno de grandes dimensiones.

Para aplicar este método se hará caso omiso de los desplazamientos horizontales, momentos torsionantes, momentos de volteo y flexibilidad del diafragma. Únicamente será necesario verificar que en cada piso la suma de las resistencias al corte de los muros de carga, proyectadas en la dirección en que se considera la aceleración, sea cuando menos igual a la fuerza cortante total que obre en el piso, calculada según se especifica en la Sección 1.2.5.1, empleando la aceleración máxima espectral, C , reducida por los factores de sobrerresistencia y ductilidad que se proporcionan en la Tabla 11, y considerando que $\rho = 1$. La aceleración máxima espectral se obtiene de acuerdo a la ecuación (11).

La verificación se realizará en dos direcciones ortogonales.

Tabla 13 - Factores reductores para el método simplificado

Tipo de muro	Q'	R
Muros de mampostería macizos confinados con dalas y columnas.	2.0	2.0
Muros de mampostería huecos confinados con dalas y columnas.	1.5	2.0
Muros de mampostería no confinados	1.0	2.0

1.2.5 Método estático

El método estático es aplicable a edificios regulares cuya altura sea menor o igual que 30 m y estructuras irregulares con altura no mayor de 20 m. En terreno firme, estos límites se incrementan a 40 m y 30 m, respectivamente.

El método de análisis estático consta esencialmente de los siguientes pasos:

- 1) Calcular fuerzas laterales aplicadas en los centros de masa de los pisos que produzcan efectos equivalentes a la acción sísmica.
- 2) Distribuir las fuerzas laterales del paso 1 y los momentos torsionantes asociados a estas fuerzas entre los sistemas resistentes a carga lateral que conforman la estructura, como son marcos, muros o combinaciones de éstos.
- 3) Analizar cada sistema resistente ante las cargas laterales que le correspondan

1.2.5.1 Valuación de fuerzas sísmicas sin estimar T_e

Para calcular las fuerzas cortantes a diferentes niveles de una estructura se supondrá un conjunto de fuerzas de inercia laterales actuando sobre cada uno de los niveles, en los que se suponen concentradas las masas, como se ilustra a continuación:

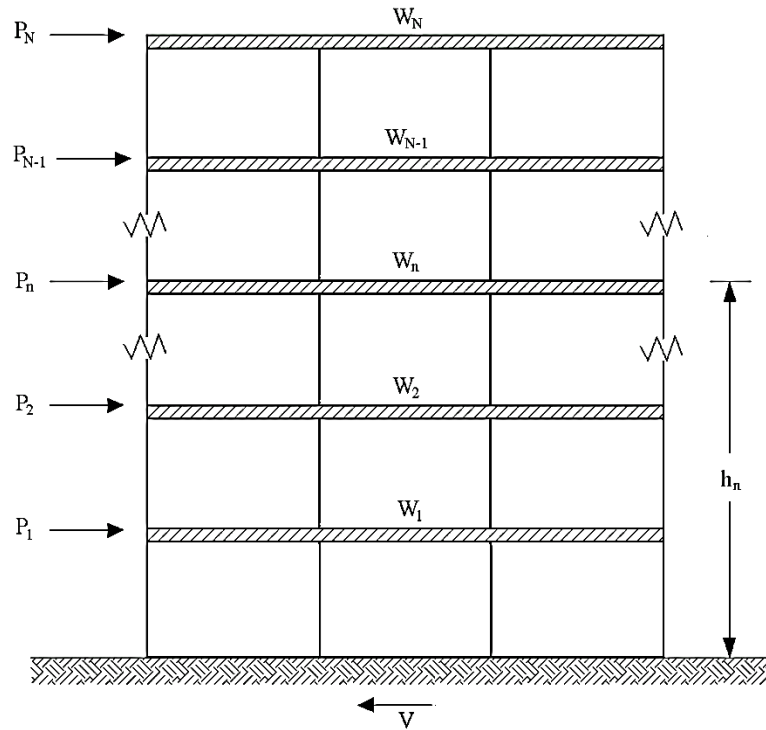


Figura 5 - Fuerzas sísmicas en un edificio

Las fuerzas de inercia se determinarán considerando que las aceleraciones de las masas de la estructura varían linealmente con la altura y que la fuerza cortante basal de la estructura es igual a la máxima ordenada espectral, reducido por ductilidad, redundancia y sobrerresistencia y multiplicado por el peso de la construcción, independientemente del periodo fundamental de la estructura. Para estructuras ubicadas en suelos blandos (Tipo II y III) y que sean susceptibles a desarrollar comportamientos histeréticos con degradaciones de rigidez y/o resistencia, se amplificarán por este concepto conforme se establece en la ecuación (15).

De acuerdo con lo anterior, cada una de las fuerzas de inercia se tomará igual al peso de la masa que corresponde multiplicado por un coeficiente proporcional a su altura sobre el desplante o nivel a partir del que las deformaciones laterales de la estructura pueden ser apreciables, es decir:

$$\rho_n = \alpha_n w_n h_n \quad (22)$$

En donde:

W_n es el peso de la masa del nivel n

h_n es la altura del nivel n sobre el desplante

El coeficiente se tomará de tal manera que la relación:

$$\frac{V}{W} = \frac{c\beta}{Q'R\rho} \quad (23)$$

En donde:

- V es la fuerza cortante basal
 W es el peso de la construcción, incluyendo cargas muertas y vivas
 Q' el factor reductor por ductilidad, calculado como se indica en la ecuación (13) de la Sección 1.2.1.2.2 para $T_e = T_a$
 T_a es el límite inferior de la meseta del espectro de diseño
 c es el la máxima ordenada espectral dado por la ecuación 11 de la Sección 1.1.5.2
 β es el factor de amortiguamiento definido en la sección 1.2.1.1 Si el amortiguamiento estructural es 5 % y no hay efectos de interacción $\beta= 1.0$

De esta forma se tiene que:

$$\alpha_f = \frac{\sum_{n=1}^{N_e} W_n}{\sum_{n=1}^{N_e} W_n h_n} \frac{c\beta}{Q'R\rho} \quad (24)$$

En donde:

- N_e es el número de masas concentradas, igual al número de niveles del edificio

Sustituyendo la ecuación (24) en la ecuación (22) se obtiene que la fuerza lateral que actúa en el centro de masa del nivel n es igual a:

$$P_n = W_n h_n \frac{\sum_{n=1}^{N_e} W_n}{\sum_{n=1}^{N_e} W_n h_n} \frac{c\beta}{Q'R\rho} \quad (25)$$

Para estructuras ubicadas en Tipo II y III (suelos blandos) y que sean susceptibles a desarrollar comportamientos histeréticos con degradaciones de rigidez y/o resistencia, la ecuación (23) se transforma en:

$$P_n = W_n h_n \frac{\sum_{n=1}^{N_e} W_n}{\sum_{n=1}^{N_e} W_n h_n} \frac{c\beta A_{cd}}{Q'R\rho} \quad (26)$$

1.2.5.2 Valuación de fuerzas sísmicas estimando T_e

Podrán adoptarse fuerzas cortantes menores que las calculadas según la Sección 1.2.5.1, siempre que se tome en cuenta el valor aproximado del periodo fundamental de vibración de la estructura. Éste podrá obtenerse a partir del cociente de Schwartz mediante la ecuación:

$$T_e = \frac{2\pi}{\sqrt{g}} \left(\frac{\sum_{n=1}^{N_e} W_n X_n^2}{\sum_{n=1}^{N_e} P_n X_n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

En donde:

- P_n es la fuerza lateral que actúa sobre la masa del nivel n de acuerdo con las ecuaciones (25) o (27),
 X_n es el desplazamiento del nivel n en la dirección de la fuerza,
 g es la aceleración de la gravedad.

Para el cálculo de fuerzas se procederá como en la Sección 1.2.5.1 con la relación V/W igual a $a(\beta)/Q'R\rho$. Esto implica que las fuerzas sísmicas sean:

$$P_n = W_n h_n \frac{\sum_{n=1}^{Ne} W_n}{\sum_{n=1}^{Ne} W_n h_n} \frac{a\beta}{Q'R\rho} \quad (28)$$

Mientras que para estructuras ubicadas en suelos blandos y que sean susceptibles a desarrollar comportamientos histeréticos con degradaciones de rigidez y/o resistencia:

$$P_n = W_n h_n \frac{\sum_{n=1}^{Ne} W_n}{\sum_{n=1}^{Ne} W_n h_n} \frac{a\beta A_{cd}}{Q'R\rho} \quad (29)$$

En donde:

- $a(\beta)$ es la aceleración espectral, normalizada con la gravedad, correspondiente a T_e y considerando los cambios debidos a amortiguamientos diferentes de 5 %.

1.2.5.3 Momentos torsionantes

El momento torsionante, M_{0n}^t , en el entrepiso n , se tomará igual a la fuerza cortante V_n en el entrepiso multiplicada por la excentricidad de diseño, e_n^+ o e_n^- , que resulte más desfavorable para cada sistema resistente de la estructura. Sin embargo, ningún elemento estructural tendrá una resistencia menor que la necesaria para resistir la fuerza cortante directa

$$M_{0n}^t = \begin{cases} V_n e_n^+; & e_n^+ = e_{dn} + 0.05b_n \\ V_n e_n^-; & e_n^- = 0.5e_n - 0.05b_n \end{cases} \quad (30)$$

En donde:

- e_n es la excentricidad torsional calculada en el entrepiso n , igual a la distancia entre el centro de torsión y la línea de acción de la fuerza cortante correspondientes a dicho entrepiso,
 b_n es la máxima dimensión en planta del entrepiso n medida perpendicularmente a la dirección del movimiento del terreno,

e_{dn} es la excentricidad torsional incrementada para tomar en cuenta los efectos dinámicos.

En el caso de revisión de estados límite de resistencia o revisión de deformaciones máximas empleando el nivel de colapso (Sección 1.2.7), e_{dn} será igual a:

$$e_{dn} = 1.5 e_n \quad (31)$$

Para la revisión de desplazamientos horizontales por limitación de daños a elementos no estructurales, considerando el nivel de servicio, e_{dn} tomará el siguiente valor:

$$e_{dn} = e_n + e_{an} \geq 1.5 e_n \quad (32)$$

En donde:

e_{an} será igual al menor de los dos siguientes valores:

$$e_{an} = 0.05(b_n + b'_n) \sqrt{\frac{20e_n}{b_n}} \leq 0.05 (b_n + b'_n) \quad (33)$$

$$e_{an} = \frac{1}{2e_n} \left[L_{sn}^2 - e_n^2 - F_{kn}^2 + \sqrt{(L_{sn}^2 - e_n^2 - F_{kn}^2)^2 + 4e_n^2 F_{kn}^2} \right] \quad (34)$$

$$L_{sn}^2 = \frac{b_n^2 + (b'_n)^2}{12} \quad (35)$$

En donde:

b'_n es la dimensión en planta de la estructura en el sentido del sismo,

F_{kn}^2 es la relación entre las rigideces de torsión y lateral de la planta.

La excentricidad adicional e_{an} puede despreciarse cuando $F_{kn}^2 > 5L + e_n^2$

El signo positivo o negativo de la excentricidad que aparece en la ecuación (30) no se refiere a que la línea de acción de la fuerza cortante se encuentre del lado positivo o negativo del centro de torsión. Indica que la excentricidad se incrementará $0.05 b_n$ o se reducirá $0.05 b_n$. Además, la excentricidad de diseño en cada entrepiso no podrá tomarse menor que la mitad de la máxima excentricidad torsional calculada para los entrepisos que se encuentran abajo del entrepiso de referencia, y el momento torsionante de ese entrepiso tampoco podrá ser menor que la mitad del máximo momento torsionante calculado para los entrepisos que están arriba.

En estructuras en que el factor de comportamiento sísmico, Q , sea igual a 3.0, la excentricidad torsional en ningún entrepiso deberá exceder de $0.2 bn$. Para estas estructuras se tomará en cuenta que el efecto de la torsión puede incrementarse cuando alguno de sus elementos resistentes que contribuyan significativamente a la rigidez total del entrepiso incurriere en el intervalo no lineal o falle. A fin de disminuir este efecto, las resistencias de los elementos que toman la fuerza cortante de entrepiso deben ser sensiblemente proporcionales a sus rigideces. Estos elementos deben ser de la misma índole. Por ejemplo, si en un lado la rigidez y resistencia son suministradas predominantemente por columnas, en el lado opuesto también deben ser suministradas predominantemente por columnas, o si de un lado por muros de concreto, en el opuesto también por muros de concreto.

1.2.5.4 Momentos de volteo

El momento de volteo en el nivel n , Mo_n^v , calculado como la integral del diagrama de cortantes de entrepiso, para cada sistema resistente de la estructura podrá reducirse de acuerdo con la ecuación:

$$Mo_n^v = \left(0.8 + \frac{0.2h_n}{H}\right) \sum_{m=n+1}^{Ne} V_m (h_m - h_{m-1}) \quad (36)$$

En donde:

H es la altura de la estructura

El momento de volteo reducido no podrá ser menor que el producto de la fuerza cortante en el nivel, multiplicada por su distancia al centro de gravedad de la parte de la estructura que se encuentra por encima del nivel.

1.2.5.5 Efectos de segundo orden

En el análisis deberán tomarse en cuenta, explícitamente, los efectos $P-\Delta$, esto es, los momentos y cortantes adicionales provocados por las cargas verticales actuantes sobre la estructura deformada, así como por la influencia de la carga axial en la rigidez de la construcción. Estos efectos no se podrán despreciar cuando, en cualquier entrepiso n , el desplazamiento relativo del entrepiso, X'_n , multiplicado por el factor Q_{Rp} , y dividido por la altura del entrepiso, h' , exceda de $0.08V_n/W'_n$, siendo V_n la fuerza cortante del entrepiso y el peso de la estructura incluyendo cargas muertas y vivas que obra encima del entrepiso n , afectado por el factor de carga correspondiente.

Una forma aproximada de estimar los efectos de segundo orden consiste en amplificar en cada entrepiso la deformación y los momentos en los extremos de las columnas calculados despreciando estos efectos, mediante el factor de amplificación:

$$\Delta_n = 1 + \left(\frac{\frac{X'_n}{h'_n}}{\frac{V_n}{W'_n} - \frac{1.2X'_n}{h'_n}} \right) \quad (37)$$

Los momentos en los extremos de las trabes tendrán que corregirse proporcionalmente con sus rigideces angulares para que se satisfaga el equilibrio de momentos en los nudos.

1.2.5.6 Efectos combinados de los movimientos del terreno

Las estructuras se analizarán ante la acción de tres componentes ortogonales del movimiento del terreno, dos horizontales y uno vertical.

Los efectos en la respuesta, tales como desplazamientos y elementos mecánicos, se combinarán empleando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los efectos en las tres direcciones ortogonales:

$$S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2 + S_z^2} \quad (38)$$

1.2.5.7 Componente vertical

El efecto de la componente vertical deberá tomarse en cuenta en los casos que se mencionan a continuación:

- i. En elementos estructurales horizontales, con claros iguales o superiores a 15 m.
- ii. En voladizos horizontales como marquesinas y balcones, de longitud igual o superior a 3 m.
- iii. En elementos pretensados horizontales.
- iv. En estructuras con aislamiento en la base.
- v. Así como cualquier otra estructura o elemento en que la variación de la acción sísmica vertical afecte en forma significativa su dimensionamiento.

La aceleración espectral vertical se deberá tomar como se indica en la ecuación (39). Su efecto deberá considerarse actuando en ambos sentidos.

$$a_v = \begin{cases} 1.4 F_d a' & T_v < 0.05 \\ 1.4 F_d \left(\frac{0.05}{T_v} \right)^{\frac{2}{3}} a' & T_v \geq 0.05 \end{cases} \quad (39)$$

En donde:

F_d el factor de distancia igual a $a_0^r / 200$, pero no mayor a 1

- a' es la ordenada espectral modificada en la dirección más desfavorable (ecuaciones. (17) o (18))
- T_v es el periodo fundamental estimado del elemento en la dirección vertical. Si no se conoce el periodo vertical deberá tomarse el valor de $T_v = 0.05$ s

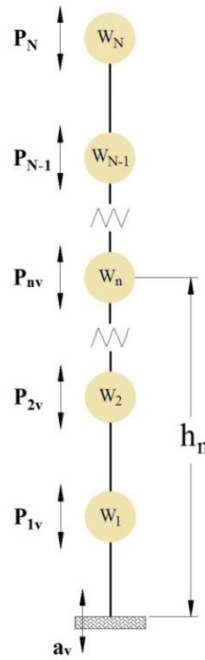


Figura 6 - Distribución de las fuerzas sísmicas verticales

Para el método estático, se deberá considerar una fuerza equivalente vertical actuando en ambos sentidos sobre cada uno de los niveles, en los que se suponen concentradas las masas, como se ilustra en la Figura 6. Esta fuerza dependerá de la ordenada vertical, a_v , y se obtendrá con la siguiente ecuación:

$$P_{nv} = W_n h_n \left(\frac{\sum_{n=1}^{Ne} W_n}{\sum_{n=1}^{Ne} W_n h_n} \right) a_v \tag{40}$$

En donde:

- P_{nv} es la fuerza estática equivalente vertical que actúa sobre la masa del nivel n
- a_v es la aceleración espectral vertical obtenida de la ecuación (40).

1.2.5.8 Comportamiento asimétrico

En el diseño de estructuras cuyas relaciones fuerza–deformación difieran en sentidos opuestos se dividirán los factores de resistencia correspondientes entre el factor A_{ca} , siendo para terrenos firmes o roca:

$$A_{ca} = 1 + d \left(1 + \frac{k_1 T_e^{k_2}}{k_3 + T_e^{k_2}} \right) \tag{41}$$

Para terreno blando:

$$A_{ca} = 1 + d \left(1 + \frac{k_1 \left(\frac{T_e}{T_s} \right)^{k_2}}{k_3 + \left(\frac{T_e}{T_s} - 1 \right)} \right) \quad (42)$$

En donde:

d es la diferencia entre los valores de la relación $a(\beta)/Q'R_p$ o $a(\beta)A_{cd}/Q'R_p$, según sea el caso, que causarían la falla o fluencia plástica de la construcción en uno y otro sentido, expresados como fracción de la aceleración de la gravedad

k_1, k_2, k_3 son parámetros que dependen del tipo de terreno y del comportamiento histerético supuesto para el sistema estructural y cuyos valores se proporcionan en la Tabla 13 y Tabla 14.

Tabla 14. Valores de los parámetros

Tipo de Terreno	Comportamiento	K_1	K_2	K_3
Blando (Tipo II y III)	Elastoplástico	1.7d – 2.9d	0.6	0.2
	Degradante	4.2d – 8.6d	1.5	0.6
Firme o roca (Tipo I)	Elastoplástico	0.25d – 0.1d	0.6	0.2
	Degradante	1.0d	1.5	0.6

1.2.5.9 Revisión por cortante basal

En casos donde hayan sido aplicado el método dinámico descrito en la sección 3.3.6 del CDS-MDOC vigente, se encuentra que, en la dirección que se considera, la relación V/W es menor que $0.7a(\beta)/Q'R_p$ o $0.7a(\beta)A_{cd}/Q'R_p$ para estructuras con comportamiento histerético degradante ubicadas en suelos Tipo II y III, según sea el caso, se incrementarán todas las fuerzas de diseño y los desplazamientos laterales correspondientes en una proporción tal que V/W iguale a este valor.

Esta condición implica que la fuerza cortante basal de diseño no puede ser menor que 70 % de la que suministraría un análisis estático tomando en cuenta el periodo fundamental de la estructura. Sin embargo, en ningún caso el cortante será menor que a_0W cuando $T_e \leq T_b$, donde a_0 es la aceleración máxima del terreno normalizada con la aceleración de la gravedad, Ecuación (10) de la Sección 1.1.5.2 y W es el peso total de la construcción.

1.2.6 Método dinámico

Este método se aplicará de acuerdo a lo descrito en la sección 3.3.6 de estructuras tipo edificios del CDS-MDOC vigente.

1.2.7 Revisión de estados límite

Se revisará que la rigidez lateral de la estructura sea suficiente para cumplir con las dos condiciones siguientes:

1.2.7.1 Desplazamientos horizontales por limitación de daños a elementos no estructurales (límite de servicio)

Las diferencias entre los desplazamientos laterales de pisos consecutivos debidos a las fuerzas cortantes horizontales, calculadas con alguno de los métodos de análisis sísmico para las ordenadas espectrales del estado límite de servicio que se describe en la sección 1.2.1.8, no excederán a 0.002 veces las diferencias de elevaciones correspondientes, salvo que no haya elementos incapaces de soportar deformaciones apreciables, como los muros de mampostería, o estos estén separados de la estructura principal de manera que no sufran daños por sus deformaciones. En este caso, el límite será de 0.004.

El cálculo de deformaciones laterales podrá omitirse cuando se aplique el método simplificado de análisis sísmico. En la revisión de este estado límite no se considerará la importancia de la estructura.

1.2.7.2 Desplazamientos horizontales para seguridad contra colapso

Las diferencias entre los desplazamientos laterales de pisos consecutivos producidos por las fuerzas cortantes sísmicas de entrepiso, calculadas para las ordenadas espectrales modificadas $a(\beta)/Q'R\rho$ o $a(\beta)A_{cc}/Q'R\rho$, según corresponda, multiplicadas por el factor γ y divididas por la diferencia de elevaciones correspondiente, no excederán las distorsiones de entrepiso indicadas en las ecuaciones (11) (12) y (13), según los sistemas estructurales correspondientes.

El cálculo de deformaciones laterales podrá omitirse cuando se aplique el método simplificado de análisis sísmico. En la revisión de este estado límite se tomará en cuenta la importancia de la estructura.

1.2.7.3 Rotura de vidrios

En fachadas, tanto interiores como exteriores, la colocación de los vidrios en los marcos, o la liga de éstos con la estructura, serán tales que las deformaciones de ésta no afecten a los vidrios. Para ello, se verificará que alrededor de cada tablero de vidrio o cada marco exista una holgura no menor que el desplazamiento relativo entre los extremos del tablero o marco, calculado a partir de la deformación por cortante de entrepiso y dividido entre $1+h_t/b_t$, donde b_t es la base del tablero o marco y h_t su altura. Para este cálculo se considerarán los desplazamientos mencionados en la sección 1.2.7.2.

1.2.7.4 Separación con estructuras adyacentes

Toda construcción deberá separarse de sus linderos con los predios vecinos una distancia no menor de 5 cm ni menor que el desplazamiento horizontal del nivel que se trate. El desplazamiento horizontal se obtendrá como el calculado en la sección 1.2.7.2, aumentado en 0.001 o 0.003 veces la altura del nivel sobre el desplante para terrenos tipos II y III, respectivamente. Si se emplea el método simplificado de análisis sísmico, la separación mencionada no será, en ningún nivel, menor de 5 cm ni menor de la altura del nivel sobre el desplante multiplicada por 0.002, 0.004 o 0.006, para terrenos tipos I, II y III, respectivamente.

La separación entre cuerpos de una misma estructura o entre estructuras adyacentes será cuando menos igual a la suma de las que, de acuerdo con las especificaciones precedentes, corresponden a cada una. Podrá dejarse una separación igual a la mitad de esta suma, si los dos cuerpos tienen la misma altura y tipo de estructuración y las losas coinciden a la misma altura, en todos los niveles. Al revisar el estado límite de falla de la cimentación, se tomará en cuenta la fuerza de inercia horizontal que obra en el volumen de suelo que se halla bajo los cimientos y que, sujeto a la aceleración máxima del terreno (es decir, a_0 veces la aceleración de la gravedad), potencialmente se desplazaría ante una falla en cortante.

En el tomo III estaremos hablando del diseño por viento, el efecto que provoca el viento en las construcciones es un elemento de riesgo en las estructuras que merece ser considerado en el diseño de los edificios escolares, razón por la cual se desarrolló el siguiente tomo.