

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



ANÁLISIS Y DISEÑO DE ESTRUCTURAS
CON AISLADORES SÍSMICOS EN EL PERÚ

ANEXOS

Tercer Cuerpo

Tesis para optar por el Título de Ingeniero Civil, que presentan los bachilleres:

Paul Alexander Korswagen Eguren

Julio César Arias Ricse

Pamela Grace Huaranga Huamaní

Asesor: Ing. Juan Antonio Montalbetti

Lima, septiembre de 2012

Índice

1. Tablas y gráficos adicionales al capítulo 4.6 (Análisis de modelos de estructuras aisladas, Resultados obtenidos y comentarios).
2. Figuras y fotografías
3. Normas técnicas
 - 3.1. UBC 1997, Capítulo 16
 - 3.2. FEMA, 274
 - 3.3. Norma Chilena NCh-2745 2003

Anexo

1

Tablas y gráficos adicionales al capítulo 4.6.

Análisis de modelos de estructuras aisladas,
Resultados obtenidos y comentarios.

Comentarios

En las siguientes diez hojas desdoblables se muestran las tablas resumen de cada edificio analizado. En algunos casos, cuando se presentan cinco tablas por edificio, las tablas adicionales corresponden al comportamiento con los aisladores calculados específicamente para cada edificio.

Los edificios con los aisladores más rígidos siguen la notación mostrada:

Aislador	Diámetro (m)	Capacidad de Carga Vertical (ton)	Rigidez vertical (ton/m ²)	Rigidez elástica mayor (ton/m ²)	Máxima fuerza lineal (ton)	Desplazamiento máximo (m)	Relación de pendientes	Rigidez lateral efectiva (ton/m ²)	Tracción Vertical Admisible (ton)	Porcentaje Admisible en Tracción
1	0.305	46	5,097	408	6.6	0.15	0.1	80.5	7.7	16.7%
2	0.405	92	10,194	510	11.2	0.2	0.1	101.4	13.5	14.7%
3	0.520	138	20,387	714	18.3	0.3	0.1	126.4	22.3	16.2%
4	0.650	275	71,356	1121	22.4	0.41	0.1	161.4	34.8	12.7%
5	0.750	367	91,743	1631	27.0	0.46	0.1	216.0	46.4	12.6%
6	0.850	499	122,324	1835	36.2	0.46	0.1	254.3	59.6	11.9%
7	0.950	683	183,486	2039	49.9	0.61	0.1	277.6	74.4	10.9%
8	1.050	866	214,067	2141	59.1	0.71	0.1	289.0	90.9	10.5%
9	1.360	2813	519,878	2548	90.7	0.86	0.1	349.8	152.5	5.4%

Mientras que para los aisladores calculados se tiene el resumen a continuación:

	Hospital		Rancho						San Luis			Pabellón 7				Loft			
Tipos de Aisladores		2			5				2		2				4				4
Altura (m)		0.30			0.16				0.2		0.30				0.16				0.2
Desplazamiento Máximo DTM (m)		0.356			0.24				0.25		0.397				0.24				0.253
Amortiguamiento ef. Ponderado		0.252			0.13				0.163		0.230				0.182				0.123
Rigidez total del SA ef. (ton/m²)		4717			9138				1130		1949				6382				6416
Diámetro (m)	0.850	0.950	0.405	0.405	0.520	0.570	0.650	0.355	0.405	0.650	0.800	0.405	0.570	0.650	0.455	0.650	0.800	0.900	
Cantidad por tipo	10	22	117	16	12	3	4	21	6	8	14	15	13	21	24	10	13	8	
Núcleo de Plomo (m)	0.250	0.250	0.060	0.080	0.090	0.100	0.100	0.060	0.060	0.150	0.150	0.070	0.120	0.120	0.088	0.124	0.136	0.158	
Rigidez Efectiva (ton/m²)	134.9	153.1	50.7	72.7	93.9	114.0	144.8	40.5	46.5	74.6	96.6	53.8	117.5	145.3	52.3	107.0	171.6	232.5	
Amortiguamiento ef.	0.256	0.25	0.12	0.19	0.18	0.18	0.17	0.17	0.14	0.264	0.211	0.16	0.21	0.18	0.109	0.111	0.134	0.165	
Qd (ton)	30.0	30.0	2.4	5.3	6.6	8.2	9.8	2.6	2.7	15.0	15.0	3.4	9.7	10.5	2.3	4.8	9.4	15.9	
Rigidez en fluencia kd (ton/m²)	57.4	73.0	40.7	50.4	66.0	79.3	103.4	24.5	34.7	40.6	62.6	39.6	77.3	101.7	43.1	88.0	134.3	169.7	
Capacidad de Carga (ton)	499	683	92	117	138	183	275	71	92	275	420	92	183	275	117	275	408	591	
Kv (ton/m²)	122,300	183,500	10,200	10,200	20,400	51,000	71,400	10,194	10,194	71,400	107,000	10,200	51,000	71,400	10,200	20,400	71,400	142,800	

Resumen del comportamiento

Edificio original			
Nombre	Instituto del Salud del Niño		
Número de Pisos	8 (3.7m)		
Sistema estructural	Dual		
Notas sobre el sistema estructural	Muy regular, placas en el perímetro y columnas interiores		
Rigidez lateral de entepiso KL (promedio o primero) ton/m (x/y)	660,070	4,785,690	
Peso del edificio (M+V) ton	10000		
Periodo de vibración 1 / Importancia	0.56	78.80%	X
Periodo de vibración 2	0.37	68.70%	Y
Periodo de vibración 3	0.25	0.01%	x
Importancia acumulada en los tres primeros modos (x/y)	79%	69%	
Notas sobre el comportamiento modal (efectos de torsión, etc)			

Edificio aislado			
Número de Aisladores	28		
Desplazamiento Máximo del sistema de aisladores (cm)	46		
Capacidad de carga total del SA (ton)	20000		
Rigidez lateral del SA (efectiva) KA	8650		
Relación KL/KA	76	553	
Tipo(s) de Aislador(es)	10 del 6, 22 del 7		
Notas sobre la adaptación con el SA	Los aisladores bajo los extremos de las únicas placas en Y están muy esforzados, por lo que se han colocado dos iguales en estos extremos.		
Periodo de vibración 1 / Importancia	2.68	98.30%	X
Periodo de vibración 2	2.66	98.40%	y
Periodo de vibración 3	2.57	0.40%	x
Importancia acumulada en los tres primeros modos	99.95%	99.97%	
Notas sobre el comportamiento modal	Hay algo de mezcla entre desplazamiento en x y y para los primeros modos, pero todo ocurre en la base.		

Edificio aislado calculado			
Número de Aisladores	28		
Desplazamiento Máximo calculado del sistema de aisladores (cm)	35.6		
Capacidad de carga total del SA (ton)	20000		
Rigidez lateral del SA (efectiva) KA	4,717.2		
Relación KL/KA	140	1,015	
Tipo(s) de Aislador(es)	Ver tabla resumen		
Notas sobre la adaptación con el SA	Los aisladores bajo los extremos de las únicas placas en Y están muy esforzados, por lo que se han colocado dos iguales en estos extremos.		
Periodo de vibración 1 / Importancia	3.5	95.60%	X
Periodo de vibración 2	3.48	97.20%	y
Periodo de vibración 3	3.39	2.50%	x
Importancia acumulada en los tres primeros modos	99.97%	99.99%	
Notas sobre el comportamiento modal	Hay algo de mezcla entre desplazamiento en x y y para los primeros modos, pero todo ocurre en la base.		

Criterio	Obs.	Comportamiento											
		Huaraz X		Huaraz Y		Pisco X		Pisco Y		Chile X		Chile Y	
		Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A
Desplazamiento máximo en la base (cm)		0	4.7	0	4.8	0	8.6	0	8.4	0	7.4	0	7.5
Desplazamiento máximo azotea (cm)		4.8	5.5	6.0	5.6	4.7	10.6	3.4	9.8	4.0	8.6	3.3	8.8
Fuerza comparativa [buscar un [o varios] elemento[s] que tome[n] gran parte del sismo en ambos casos)	Momento en placas laterales (y) o en placas centrales (x)	1800	270	80610	7600	1820	360	40400	9040	1670	300	49700	9700
Factor de Reducción de la fuerza comparada			6.7		10.6		5.1		4.5		5.6		5.1
Cortante Basal		5120	1000	10640	760	5050	1300	4800	1060	4800	1200	6950	970
Factor de Reducción del cortante basal			5.1		14.0		3.9		4.5		4.0		7.2
Máxima Fuerza Vertical en cualquier aislador	1.25mv +s		540		670		580		710		580		740
Mínima Fuerza Vertical (Tracción+)	1m+s		-37		67		-29		140		-40		170
Máxima Fuerza Cortante en cualquier aislador	s		53		53		63		63		60		60
Notas													

Criterio	Obs.	Comportamiento Calculado											
		Huaraz X		Huaraz Y		Pisco X		Pisco Y		Chile X		Chile Y	
		Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A
Desplazamiento máximo en la base (cm)		0	4.4	0	4.5	0	13.7	0	13.6	0	16.2	0	19.1
Desplazamiento máximo azotea (cm)		4.8	5.85	6.0	5.14	4.7	14.9	3.4	14.5	4.0	17.7	3.3	20.0
Fuerza comparativa [buscar un [o varios] elemento[s] que tome[n] gran parte del sismo en ambos casos)	Momento en placas laterales (y) o en placas centrales (x)	1800	210	80610	5085	1820	273	40400	6078	1670	310	49700	7475
Factor de Reducción de la fuerza comparada			8.6		15.9		6.7		6.6		5.4		6.6
Cortante Basal		5120	527	10640	410	5050	949	4800	822	4800	1036	6950	1051
Factor de Reducción del cortante basal			9.7		26.0		5.3		5.8		4.6		6.6
Máxima Fuerza Vertical en cualquier aislador	1.25mv +s		480		528		492		6		510		621
Mínima Fuerza Vertical (Tracción+)	1m+s		-53		-28		-57		30		-56		83
Máxima Fuerza Cortante en cualquier aislador	s		27		27		36		36		38		40
Notas													

Resumen del comportamiento

Edificio original			
Nombre	Pabellon 6 - PLACAS		
Número de Pisos	3 (2.7m)		
Sistema estructural	Placas		
Notas sobre el sistema estructural	Edificio con placas, muy rígido en ambas direcciones.		
Rigidez lateral de entrepiso KL (promedio o primero) ton/m (x/y)	1,287,000	1,560,000	
Peso del edificio (M+V) ton	930		
Periodo de vibración 1 / Importancia	0.082	74.71%	X
Periodo de vibración 2	0.076	65.88%	Y
Periodo de vibración 3	0.059	9.01%	Y
Importancia acumulada en los tres primeros modos (x/y)	83.09%	83.14%	
Notas sobre el comportamiento modal (efectos de torsión, etc)	En cada modo existen efectos de torsión debido al desfase del centro de masa y rigidez del edificio.		

Edificio aislado			
Número de Aisladores	9		
Desplazamiento Máximo del sistema de aisladores (cm)	41		
Capacidad de carga total del SA (ton)	2843		
Rigidez lateral del SA (efectiva) KA	1671		
Relación KL/KA	770	934	
Tipo(s) de Aislador(es)	5 del tipo 4 y 4 del tipo 5		
Notas sobre la adaptación con el SA	Se busco que el centro de masas del edificio coincida con el de la distribución de aisladores de tal forma que se atribuya a cada uno de estos aisladores una misma carga. Además, se tomó en		
Periodo de vibración 1 / Importancia	1.621	88.92%	X
Periodo de vibración 2	1.614	88.67%	Y
Periodo de vibración 3	1.372	1.11%	Y
Importancia acumulada en los tres primeros modos	99.98%	100.00%	
Notas sobre el comportamiento modal	Los primeros modos toman la mayor parte de la masa efectiva es por ello que son considerados como fundamentales para cada dirección. Además, estos son notoriamente independientes.		

Edificio aislado calculado			
Número de Aisladores	27		
Desplazamiento Máximo calculado del sistema de aisladores (cm)	18.4		
Capacidad de carga total del SA (ton)	2048.9		
Rigidez lateral del SA (efectiva) KA	1130.25		
Relación KL/KA	1,139	1,380	
Tipo(s) de Aislador(es)	Ver Tabla Resumen		
Notas sobre la adaptación con el SA	Se busco que el centro de masas del edificio coincida con el de la distribución de aisladores de tal forma que se atribuya a cada uno de estos aisladores una misma carga. Además, se tomó en		
Periodo de vibración 1 / Importancia	1.784	99.89%	Y
Periodo de vibración 2	1.115	0.10%	Y
Periodo de vibración 3	0.681	99.44%	X
Importancia acumulada en los tres primeros modos	99.51%	99.99%	
Notas sobre el comportamiento modal	Los primeros modos toman la mayor parte de la masa efectiva es por ello que son considerados como fundamentales para cada dirección. Además, estos son notoriamente independientes.		

Comportamiento

Criterio	Obs.	Huaraz X		Huaraz Y		Pisco X		Pisco Y		Chile X		Chile Y	
		Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A
Desplazamiento máximo en la base (cm)		0	0.52	0	0.57	0	3	0	3.11	0	2.44	0	2.46
Desplazamiento máximo azotea (cm)		0.04	0.67	0.03	0.63	0.11	3.45	0.09	3.32	0.1	2.85	0.09	2.65
Fuerza comparativa [buscar un [o varios] elemento[s] que tome[n] gran parte del sismo en ambos casos)	En placas lateral PX (X) y en placa lateral del eje 9 para (Y)	188.33	45.66	158.97	63.77	526.12	144.8	420.11	201.18	469.91	137.22	390.89	192.51
Factor de Reducción de la fuerza comparada			4.1		2.5		3.6		2.1		3.4		2.0
Cortante Basal		130	50	130	48	356	160	354	162	316	152	326	153
Factor de Reducción del cortante basal			2.6		2.7		2.2		2.2		2.1		2.1
Máxima Fuerza Vertical en cualquier aislador	1.25mv +s		-313		-319		-322		-342		-342		-340
Mínima Fuerza Vertical (Tracción+)	1m+s		-59		-55		-48		-31		-50		-33
Máxima Fuerza Cortante en cualquier aislador	s		8		9		29		29		27		28
Notas													

Comportamiento Calculado

Criterio	Obs.	Huaraz X		Huaraz Y		Pisco X		Pisco Y		Chile X		Chile Y	
		Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A
Desplazamiento máximo en la base (cm)		0	0.57	0	0.61	0	5.22	0	5.91	0	3.86	0	4.19
Desplazamiento máximo azotea (cm)		0.04	0.67	0.03	0.71	0.11	5.52	0.09	6.18	0.1	4.15	0.09	4.45
Fuerza comparativa [buscar un [o varios] elemento[s] que tome[n] gran parte del sismo en ambos casos)	Momento en placas laterales (y) o en placas centrales (x)	188.33	24.49	158.97	34.04	526.12	69.33	420.11	92.66	469.91	65.8	390.89	87.66
Factor de Reducción de la fuerza comparada			7.7		4.7		7.6		4.5		7.1		4.5
Cortante Basal		130	34	130	37	356	98	354	100	316	91	326	92
Factor de Reducción del cortante basal			3.8		3.5		3.6		3.6		3.5		3.6
Máxima Fuerza Vertical en cualquier aislador	1.25mv +s		-72		-70		-81		-74		-80		-72
Mínima Fuerza Vertical (Tracción+)	1m+s		-12		-13		-11		-4		-11		-5
Máxima Fuerza Cortante en cualquier aislador	s		2		2		4		5		4		4
Notas		Se sobrepasa la capacidad de carga de un aislador TIPO A, el cual tiene como capacidad máxima 71.4 ton											

Resumen del comportamiento

Edificio original			
Nombre	EL RANCHO		
Número de Pisos	6		
Sistema estructural	Dual tipo I		
Notas sobre el sistema estructural			
Rigidez lateral de entrepiso KL (promedio o primero) ton/m (x/y)	1,645,820	3,326,680	
Peso del edificio (M+V) ton	4500		
Periodo de vibración 1 / Importancia	0.4314	59.81%	X-X
Periodo de vibración 2	0.3436	68.33%	Y-Y
Periodo de vibración 3	0.2865	12.59%	Y-Y
Importancia acumulada en los tres primeros modos (x/y)	75.71%	73.85%	
Notas sobre el comportamiento modal (efectos de torsión, etc)			

Edificio aislado			
Número de Aisladores	28		
Desplazamiento Máximo del sistema de aisladores (cm)	86		
Capacidad de carga total del SA (ton)	12677		
Rigidez lateral del SA (efectiva) KA	3466.7		
Relación KL/KA	475	960	
Tipo(s) de Aislador(es)	23 del 1, 1 del 5 y 4 del 9		
Notas sobre la adaptación con el SA			
Periodo de vibración 1 / Importancia	2.1	99.73%	X-X
Periodo de vibración 2	1.94	96.66%	Y-Y
Periodo de vibración 3	1.6255	3.22%	Y-Y
Importancia acumulada en los tres primeros modos	99.91%	99.93%	
Notas sobre el comportamiento modal			

Edificio aislado calculado			
Número de Aisladores	152		
Desplazamiento Máximo del sistema de aisladores (cm)	41		
Capacidad de carga total del SA (ton)	15912		
Rigidez lateral del SA (efectiva) KA	9039.99		
Relación KL/KA	182	368	
Tipo(s) de Aislador(es)			
Notas sobre la adaptación con el SA			
Periodo de vibración 1 / Importancia	1.91	85.39%	X-X
Periodo de vibración 2	1.73	99.72%	Y-Y
Periodo de vibración 3	1.66	13.41%	X-X
Importancia acumulada en los tres primeros modos	98.85%	99.80%	
Notas sobre el comportamiento modal			

Criterio	Obs.	Comportamiento															
		Huaraz X		Huaraz Y		Pisco X		Pisco Y		Chile X		Chile Y		Espectro X		Espectro Y	
		Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A
Desplazamiento máximo en la base (cm)		0	2.88	0	3.87	0	1.39	0	1.54	0	5.29	0	5.51	0	10.04	0	9.16
Desplazamiento máximo azotea (cm)		3.64	4.64	2.98	6.61	1.15	2.58	1.27	4.17	2.76	7.51	2.24	8.91	2.4	11.35	1.96	12.1
Fuerza comparativa (buscar un [o varios] elemento[s] que tome[n] gran parte del sismo en ambos casos)	placa 17	2431	544	2400	650	1114	498	1079	522	1465	693	1664	732	1563	540	1574	649
Factor de Reducción de la fuerza comparada		4.5		3.7		2.2		2.1		2.1		2.3		2.9		2.4	
Cortante Basal		1626.8	194.8	2066.6	264.7	544.4	109.7	787.3	145.3	1275.2	293.9	1478.6	342.0	1021.4	323.8	1212.0	350.3
Factor de Reducción del cortante basal		8.3		7.8		5.0		5.4		4.3		4.3		3.2		3.5	
Máxima Fuerza Vertical en cualquier aislador		1691.0		1693.1		1671.9		1665.7		1702.9		1684.5		1676.9		1669.9	
Mínima Fuerza Vertical (Tracción+)		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	
Máxima Fuerza Cortante en cualquier aislador		63.3		82.8		34.8		41.2		92.3		94.1		36.9		38.8	
Notas																	

Criterio	Obs.	Comportamiento Calculado															
		Huaraz X		Huaraz Y		Pisco X		Pisco Y		Chile X		Chile Y		Espectro X		Espectro Y	
		Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A
Desplazamiento máximo en la base (cm)		0	2.18	0	3.45	0	1.05	0	1.55	0	6.85	0	7.02	0	10.04	0	9.16
Desplazamiento máximo azotea (cm)		5.49	5.81	3.74	5.06	2.9	3.28	2.1	3.99	4.5	11.58	3.2	11.25	2.4	11.35	1.96	12.1
Fuerza comparativa (buscar un [o varios] elemento[s] que tome[n] gran parte del sismo en ambos casos)	placa 1	1429	244	1405	222	819	187	848	171	1234	267	1030	203	1563	540	1574	649
Factor de Reducción de la fuerza comparada		5.9		6.3		4.4		5.0		4.6		5.1		2.9		2.4	
Cortante Basal		2342.9	194.0	4019.0	263.9	1541.6	117.7	1865.2	132.2	2247.9	649.8	2919.4	623.0	1021.4	323.8	1212.0	350.3
Factor de Reducción del cortante basal		8.3		7.8		5.0		5.4		4.3		4.3		3.2		3.5	
Máxima Fuerza Vertical en cualquier aislador		284.4		301.4		270.0		278.1		289.0		314.8		1676.9		1669.9	
Mínima Fuerza Vertical (Tracción+)		42.0		18.3		23.2		4.8		68.4		31.9		0.0		0.0	
Máxima Fuerza Cortante en cualquier aislador		11.2		11.5		6.3		9.4		14.1		15.0		36.9		38.8	
Notas																	

Resumen del comportamiento

Edificio original				Edificio aislado				Edificio aislado Calculado			
Nombre	Pabellón 7			Número de Aisladores	55			Número de Aisladores	53		
Número de Pisos	3			Desplazamiento Máximo del sistema de aisladores (cm)	10			Desplazamiento Máximo del sistema de aisladores (cm)	20		
Sistema estructural	Dual			Capacidad de carga total del SA (ton)	9300			Capacidad de carga total del SA (ton)	11539.25		
Notas sobre el sistema estructural	Muy regular, reforzado con algunas placas, principal			Rigidez lateral del SA (efectiva) KA	7180			Rigidez lateral del SA (efectiva) KA	9039.99		
Rigidez lateral de entrepiso KL (promedio o primero) ton/m (x/y)	159,900	3,508,000		Relación KL/KA	22	489		Relación KL/KA	96	204	
Peso del edificio (M+V) ton	5400			Tipo(s) de Aislador(es)	12 del 1, 1 del 2, 20 del 3, 16 del 4, 4 del 5			Tipo(s) de Aislador(es)			
Periodo de vibración 1 / Importancia	0.20	80.00%	X	Notas sobre la adaptación con el SA	Se usó variados tipos de aisladores con el fin de optimizar la capacidad de carga y la flexibilidad lateral respecto al centro de masas del edificio.			Notas sobre la adaptación con el SA			
Periodo de vibración 2	0.12	78.50%	Y	Periodo de vibración 1 / Importancia	1.85	99.70%	X	Periodo de vibración 1 / Importancia	2.71	99.14%	X-X
Periodo de vibración 3	0.1	0.10%	x	Periodo de vibración 2	1.84	99.70%	Y	Periodo de vibración 2	2.70	99.53%	Y-Y
Importancia acumulada en los tres primeros modos (x/y)	80%	78.60%		Periodo de vibración 3	1.74	0.20%	X	Periodo de vibración 3	2.64	0.71%	X-X
Notas sobre el comportamiento modal (efectos de torsión, etc)				Importancia acumulada en los tres primeros modos	99.98%	99.99%		Importancia acumulada en los tres primeros modos	99.99%	100.00%	
				Notas sobre el comportamiento modal	Los modos son extremadamente aislados. Se evita cualquier efecto de torsión.			Notas sobre el comportamiento modal	Los modos son extremadamente aislados. Se evita cualquier efecto de torsión.		

Criterio	Obs.	Comportamiento											
		Huaraz X		Huaraz Y		Pisco X		Pisco Y		Chile X		Chile Y	
		Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A
Desplazamiento máximo en la base (cm)		0	3.9	0	4.0	0	5.5	0	5.8	0	6.7	0	6.9
Desplazamiento máximo azotea (cm)		1.3	4.5	0.6	4.4	1.3	6.1	0.5	6.1	1.3	7.1	0.4	7.3
Fuerza comparativa [buscar un [o varios] elemento[s] que tome[n] gran parte del sismo en ambos casos)	Momento en placas.	1390	157	1311	295	1361	169	1120	302	1400	182	843	328
Factor de Reducción de la fuerza comparada		8.9		4.4		8.1		3.7		7.7		2.6	
Cortante Basal		2880.0	893	2780.0	767.0	2760.0	990.0	2410.0	870.0	2840.0	1060.0	1845.0	930.0
Factor de Reducción del cortante basal		3.2		3.6		2.8		2.8		2.7		2.0	
Máxima Fuerza Vertical en cualquier aislador	1.25mv +s	413.0		360.0		412.0		360.0		418.0		360.0	
Mínima Fuerza Vertical (Tracción+)	1m+s	-10.0		-8.0		-9.0		-8.0		-9.0		-8.0	
Máxima Fuerza Cortante en cualquier aislador	s	31.0		31.0		33.0		33.0		35.0		35.0	
Notas													

Criterio	Obs.	Comportamiento Calculado											
		Huaraz X		Huaraz Y		Pisco X		Pisco Y		Chile X		Chile Y	
		Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A
Desplazamiento máximo en la base (cm)		0	4.28	0	4.38	0	9.91	0	9.94	0	13.79	0	13.96
Desplazamiento máximo azotea (cm)		2.3	4.61	0.64	4.6	2.78	10.26	0.82	10.19	1.96	14.24	0.71	14.24
Fuerza comparativa [buscar un [o varios] elemento[s] que tome[n] gran parte del sismo en ambos casos)	Momento en placas.	2391	409	1943	137	2726	410	2415	178	1457	400	1940	238
Factor de Reducción de la fuerza comparada		5.8		14.1		6.7		13.5		3.6		8.2	
Cortante Basal		5420	552	4652	437	6510	632	5841	540	4145	759	5092	709
Factor de Reducción del cortante basal		9.8		10.6		10.3		10.8		5.5		7.2	
Máxima Fuerza Vertical en cualquier aislador	1.25mv +s	431.7		380.3		433.3		380.2		427.0		380.2	
Mínima Fuerza Vertical (Tracción+)	1m+s	0.0		0.0		0.0		0.0		0.0		0.0	
Máxima Fuerza Cortante en cualquier aislador	s	24.6		24.7		34.6		34.6		41.2		41.4	
Notas													

Resumen del comportamiento

Edificio original			
Nombre	Edificio - Loft		
Número de Pisos	8 (2.7m)		
Sistema estructural	Dual		
Notas sobre el sistema estructural	Edificio Rígido en ambas direcciones		
Rigidez lateral de entrepiso KL (promedio o primero) ton/m (x/y)	1,000,000	2,000,000	
Peso del edificio (M+V) ton	3650		
Periodo de vibración 1 / Importancia	0.707	65.28%	X
Periodo de vibración 2	0.436	22.57%	Y
Periodo de vibración 3	0.342	44.47%	x
Importancia acumulada en los tres primeros modos (x/y)	66.74%	67.47%	
Notas sobre el comportamiento modal (efectos de torsión, etc)	En cada modo existen efectos de torsión debido al desfase del centro de masa y rigidez del edificio.		

Edificio aislado			
Número de Aisladores	28		
Desplazamiento Máximo del sistema de aisladores (cm)	30		
Capacidad de carga total del SA (ton)	8232		
Rigidez lateral del SA (efectiva) KA	4515		
Relación KL/KA	221	443	
Tipo(s) de Aislador(es)	22 del 3, 6 del 8		
Notas sobre la adaptación con el SA	Se busco que el centro de masas del edificio coincida con el de la distribución de aisladores de tal forma que se atribuya a cada uno de estos aisladores una misma carga. Además, se tomó en		
Periodo de vibración 1 / Importancia	2.543	89.84%	X
Periodo de vibración 2	2.127	97.63%	y
Periodo de vibración 3	1.775	2.35%	x
Importancia acumulada en los tres primeros modos	93.32%	98.77%	
Notas sobre el comportamiento modal	Los primeros modos toman la mayor parte de la masa efectiva es por ello que son considerados como fundamentales para cada dirección. Además, estos son notoriamente independientes.		

Edificio aislado Calculado			
Número de Aisladores	55		
Desplazamiento Máximo del sistema de aisladores (cm)	25.3		
Capacidad de carga total del SA (ton)	15596		
Rigidez lateral del SA (efectiva) KA	5463		
Relación KL/KA	183	366	
Tipo(s) de Aislador(es)	Ver Tabla Resumen		
Notas sobre la adaptación con el SA	Se busco que el centro de masas del edificio coincida con el de la distribución de aisladores de tal forma que se atribuya a cada uno de estos aisladores una misma carga. Además, se tomó en		
Periodo de vibración 1 / Importancia	1.775	95.72%	X
Periodo de vibración 2	1.639	96.04%	Y
Periodo de vibración 3	1.513	3.35%	Y
Importancia acumulada en los tres primeros modos	98.24%	99.79%	
Notas sobre el comportamiento modal	Los primeros modos toman la mayor parte de la masa efectiva es por ello que son considerados como fundamentales para cada dirección. Además, estos son notoriamente independientes.		

Criterio	Obs.	Huaraz X		Huaraz Y		Pisco X		Pisco Y		Chile X		Chile Y		Espectro X		Espectro Y	
		Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A
Desplazamiento máximo en la base (cm)		0	2.35	0	2.98	0	3.75	0	3.52	0	1.98	0	1.59	0	2.91	0	3.11
Desplazamiento máximo azotea (cm)		4.06	11.51	1.01	6.6	4.46	16.99	2.02	9.74	3.68	6.1	1.58	5.6	1.95	6.2	0.73	4.22
Fuerza comparativa (buscar un [o varios] elemento[s] que tome[n] gran parte del sismo en ambos casos)	En placas lateral de eje inclinado para (X) y en placa lateral del eje G para (Y)	257.51	132.63	619.56	197.15	264.79	176.73	997.78	288.03	216.58	90.26	893.98	210.4	289.77	58.31	423.04	54.06
Factor de Reducción de la fuerza comparada			1.9		3.1		1.5		3.5		2.4		4.2		5.0		7.8
Cortante Basal		534.7	292.7	600.6	401.3	617.6	430.3	1047.1	523.1	439.7	261.3	908.1	231.8	253.8	97.1	337.6	116.3
Factor de Reducción del cortante basal			1.8		1.5		1.4		2.0		1.7		3.9		2.6		2.9
Máxima Fuerza Vertical en cualquier aislador	1.25mv +s		1436.9		1453.7		1484.4		1478.5		1435.8		1460.2		1421		1415.9
Mínima Fuerza Vertical (Tracción?)	1m+s		-2.98		-2.99		-2.97		-2.99		-2.98		-2.99		-2.98		-2.99
Máxima Fuerza Cortante en cualquier aislador	s		33.02		44.23		43.56		49.73		37.08		30.42		9.3		9.2
Notas		Se sobrepasa la capacidad de unos cuantos aisladores, los demás trabajan con una carga muy reducida. Es posible, si es que estos elementos sobrecargados se dañan durante el evento sísmico, cambiarlos con facilidad porque estos se encuentran en los bordes.															

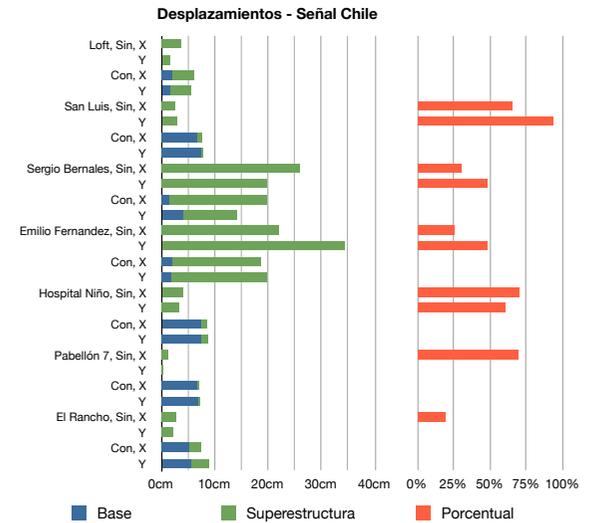
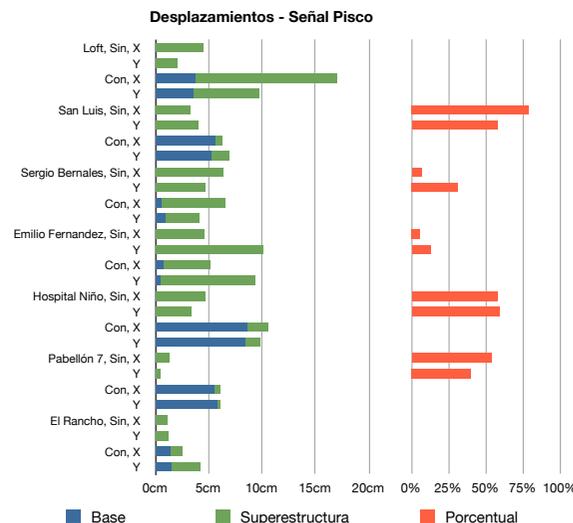
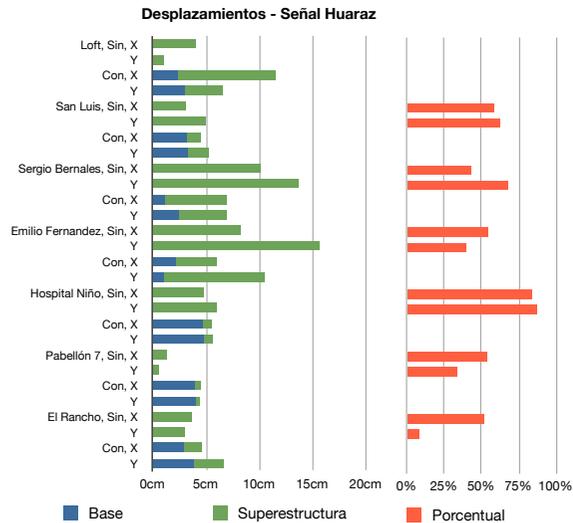
Criterio	Obs.	Huaraz X		Huaraz Y		Pisco X		Pisco Y		Chile X		Chile Y		Espectro X		Espectro Y	
		Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A	Sin A	Con A
Desplazamiento máximo en la base (cm)		0	3.35	0	3.13	0	5.37	0	4.02	0	1.48	0	2.85	0	2.91	0	3.11
Desplazamiento máximo azotea (cm)		4.06	6.65	1.46	4.36	4.46	9.61	3.68	5.77	3.68	5.93	3.19	4.39	1.95	6.2	0.73	4.22
Fuerza comparativa (buscar un [o varios] elemento[s] que tome[n] gran parte del sismo en ambos casos)	En placas lateral de eje inclinado para (X) y en placa lateral del eje G para (Y)	835.73	181.92	1015.28	517.38	866.39	206.19	1896.35	658.48	686.49	159.32	2473.39	511.39	289.77	58.31	423.04	54.06
Factor de Reducción de la fuerza comparada			4.6		2.0		4.2		2.9		4.3		4.8		5.0		7.8
Cortante Basal		534.7	443.3	759.7	437.8	617.6	556.1	1537.6	455.0	439.7	314.6	1651.9	446.6	253.8	97.1	337.6	116.3
Factor de Reducción del cortante basal			1.2		1.7		1.1		3.4		1.4		3.7		2.6		2.9
Máxima Fuerza Vertical en cualquier aislador	1.25mv +s		-478.0		-432.0		-512.0		-433.8		-450.5		-433.6		1421		1415.9
Mínima Fuerza Vertical (Tracción?)	1m+s		52.80		45.34		77.92		57.94		77.09		44.49		-2.98		-2.99
Máxima Fuerza Cortante en cualquier aislador	s		22.55		20.99		25.85		22.55		17.31		20.27		9.3		9.2
Notas		Se sobrepasa la capacidad de unos cuantos aisladores, los demás trabajan con una carga muy reducida. Es posible, si es que estos elementos sobrecargados se dañan durante el evento sísmico, cambiarlos con facilidad porque estos se encuentran en los bordes.															

Desplazamientos de las estructuras analizadas con los aisladores rígidos.

Huaraz					
Edificio	Sistema	Dirección	Base	Superestructura	Porcentual
Loft,	Sin,	X	0	4.06	-126%
		Y	0	1.01	-258%
		Y	2.35	9.16	
San Luis,	Sin,	X	0	3.1	58%
		Y	0	5	62%
		Y	3.2	1.3	
Sergio Bernales,	Sin,	X	0	10.09	43%
		Y	0	13.66	67%
		Y	1.13	5.79	
Emilio Fernandez,	Sin,	X	0	8.23	54%
		Y	0	15.65	40%
		Y	2.17	3.77	
Hospital Niño,	Sin,	X	0	4.8	83%
		Y	0	6	87%
		Y	4.7	0.8	
Pabellón 7,	Sin,	X	0	1.3	54%
		Y	0	0.6	33%
		Y	3.9	0.6	
El Rancho,	Sin,	X	0	3.64	52%
		Y	0	2.98	8%
		Y	2.88	1.76	
	Con,	Y	3.87	2.74	

Pisco					
Edificio	Sistema	Dirección	Base	Superestructura	Porcentual
Loft,	Sin,	X	0	4.46	-197%
		Y	0	2.02	-208%
		Y	3.75	13.24	
San Luis,	Sin,	X	0	3.3	79%
		Y	0	4	58%
		Y	5.6	0.7	
Sergio Bernales,	Sin,	X	0	6.36	7%
		Y	0	4.71	31%
		Y	0.57	5.92	
Emilio Fernandez,	Sin,	X	0	4.59	6%
		Y	0	10.12	13%
		Y	0.79	4.32	
Hospital Niño,	Sin,	X	0	4.7	57%
		Y	0	3.4	59%
		Y	8.6	2	
Pabellón 7,	Sin,	X	0	1.3	54%
		Y	0	0.5	40%
		Y	5.5	0.6	
El Rancho,	Sin,	X	0	1.15	-3%
		Y	0	1.27	-107%
		Y	1.39	1.19	
	Con,	Y	1.54	2.63	

Chile					
Edificio	Sistema	Dirección	Base	Superestructura	Porcentual
Loft,	Sin,	X	0	3.68	-12%
		Y	0	1.58	-154%
		Y	1.98	4.12	
San Luis,	Sin,	X	0	2.6	65%
		Y	0	2.9	93%
		Y	6.7	0.9	
Sergio Bernales,	Sin,	X	0	26.05	30%
		Y	0	19.76	48%
		Y	1.54	18.22	
Emilio Fernandez,	Sin,	X	0	22.11	25%
		Y	0	34.34	48%
		Y	2.02	16.57	
Hospital Niño,	Sin,	X	0	4	70%
		Y	0	3.3	61%
		Y	7.4	1.2	
Pabellón 7,	Sin,	X	0	1.3	69%
		Y	0	0.4	0%
		Y	6.7	0.4	
El Rancho,	Sin,	X	0	2.76	20%
		Y	0	2.24	-52%
		Y	5.29	2.22	
	Con,	Y	5.51	3.4	

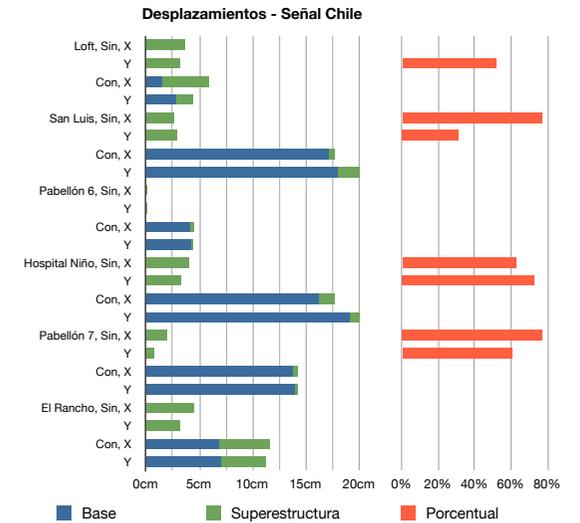
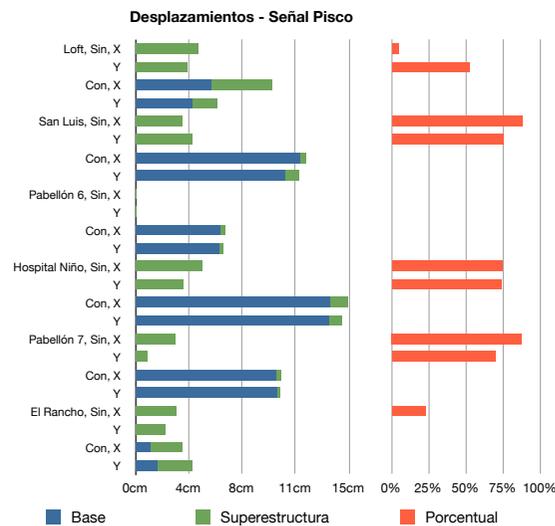
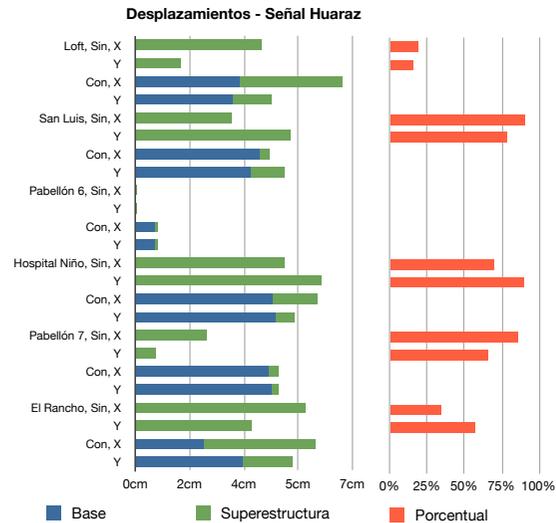


Desplazamientos de las estructuras analizadas con los aisladores calculados.

Huaraz					
Edificio	Sistema	Dirección	Base	Superestructura	Porcentual
Loft,	Sin,	X	0	4.06	19%
		Y	0	1.46	16%
	Con,	X	3.35	3.3	
San Luis,	Sin,	X	0	3.1	90%
		Y	0	5	78%
	Con,	X	4	0.3	
Pabellón 6,	Sin,	X	0	0.04	-200%
		Y	0	0.03	-233%
	Con,	X	0.6	0.12	
Hospital Niño,	Sin,	X	0	4.8	70%
		Y	0	6	89%
	Con,	X	4.4	1.45	
Pabellón 7,	Sin,	X	0	2.3	86%
		Y	0	0.64	66%
	Con,	X	4.28	0.33	
El Rancho,	Sin,	X	0	5.49	34%
		Y	0	3.74	57%
	Con,	X	2.18	3.63	
		Y	3.45	1.61	

Pisco					
Edificio	Sistema	Dirección	Base	Superestructura	Porcentual
Loft,	Sin,	X	0	4.46	5%
		Y	0	3.68	52%
	Con,	X	5.37	4.24	
San Luis,	Sin,	X	0	3.3	88%
		Y	0	4	75%
	Con,	X	11.6	0.4	
Pabellón 6,	Sin,	X	0	0.11	-173%
		Y	0	0.09	-189%
	Con,	X	5.99	0.3	
Hospital Niño,	Sin,	X	0	4.7	74%
		Y	0	3.4	74%
	Con,	X	13.7	1.2	
Pabellón 7,	Sin,	X	0	2.78	87%
		Y	0	0.82	70%
	Con,	X	9.91	0.35	
El Rancho,	Sin,	X	0	2.9	23%
		Y	0	2.1	-16%
	Con,	X	1.05	2.23	
		Y	1.55	2.44	

Chile					
Edificio	Sistema	Dirección	Base	Superestructura	Porcentual
Loft,	Sin,	X	0	3.68	-21%
		Y	0	3.19	52%
	Con,	X	1.48	4.45	
San Luis,	Sin,	X	0	2.6	77%
		Y	0	2.9	31%
	Con,	X	17.1	0.6	
Pabellón 6,	Sin,	X	0	0.1	-200%
		Y	0	0.09	-178%
	Con,	X	4.15	0.3	
Hospital Niño,	Sin,	X	0	4	63%
		Y	0	3.3	73%
	Con,	X	16.2	1.5	
Pabellón 7,	Sin,	X	0	1.96	77%
		Y	0	0.71	61%
	Con,	X	13.79	0.45	
El Rancho,	Sin,	X	0	4.5	-5%
		Y	0	3.2	-32%
	Con,	X	6.85	4.73	
		Y	7.02	4.23	



Anexo

2

Figuras y Fotografías

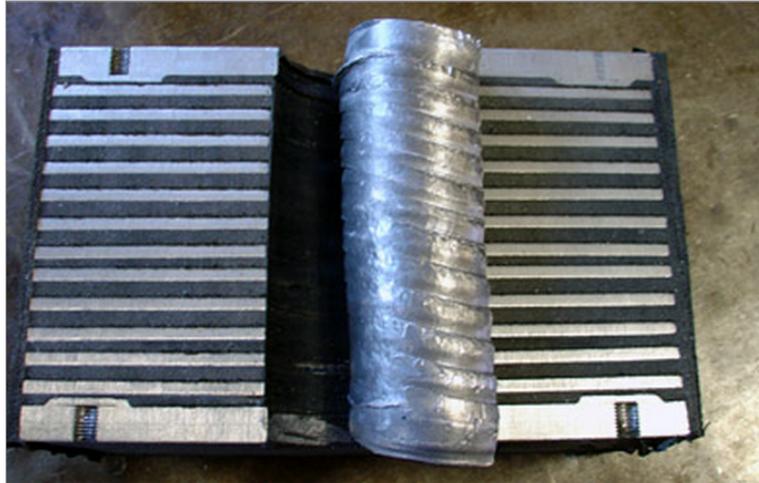
Se ha recopilado una serie de fotografías que ilustran los dispositivos de aislación (aisladores) y como estos se emplean.



Fotografía 1. Aislador instalado en el edificio “San Agustín” en Santiago, Chile.



Fotografía 2. Aislador sometido a ensayos en la Universidad Católica de Chile.



Fotografía 3. Corte de un aislador elastomérico con núcleo de plomo.



Fotografía 4. Instalación de un aislador de sección cuadrada.



Fotografía 5. Aisladores sobre subestructura de sótano.

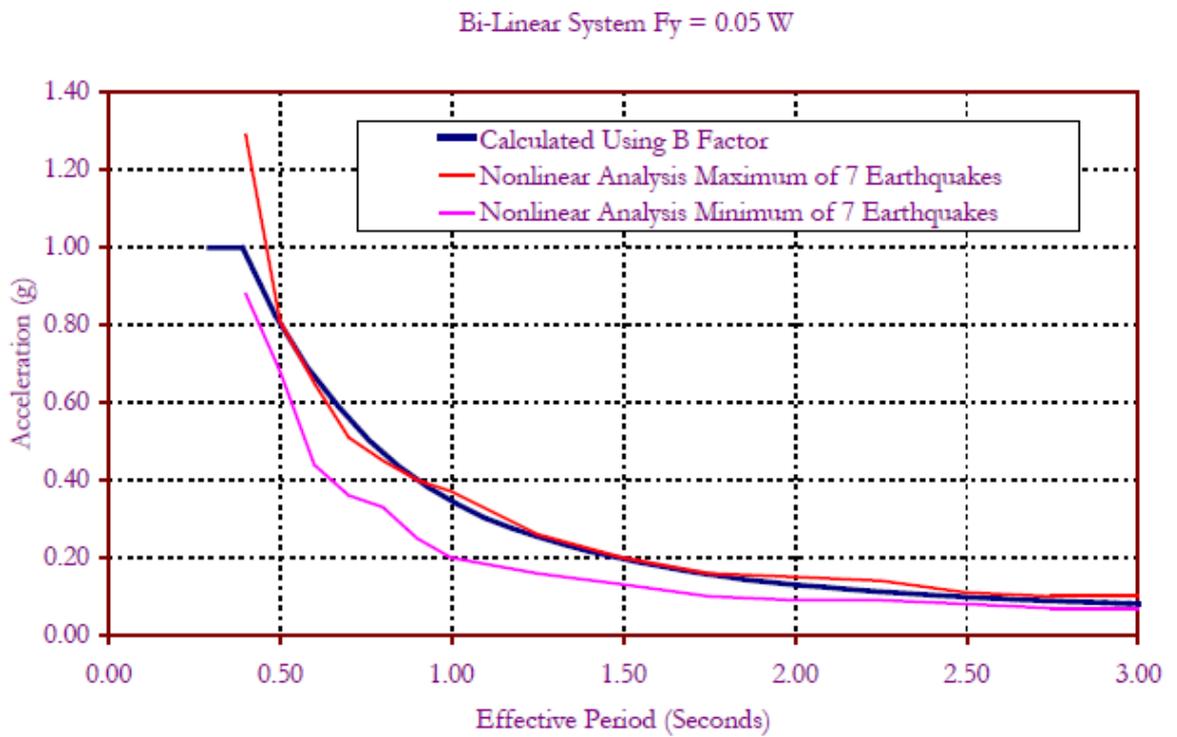


Figura 1. Espectro elaborado por SKINNER, KELLY y ROBINSON.

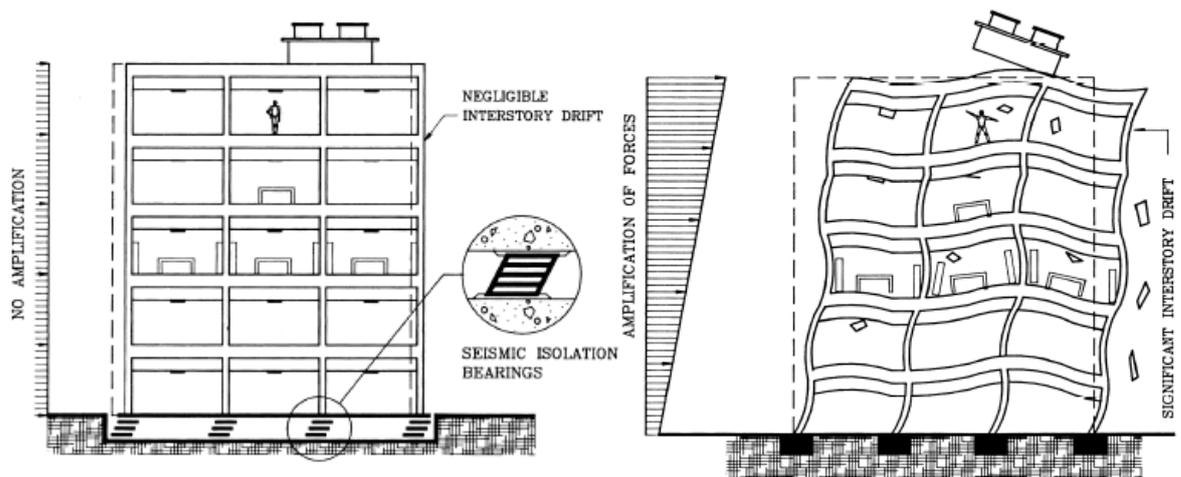


Figura 2. Comparación mostrando los efectos de la aislación sobre los contenidos de una edificación.

Referencias

- Fotografías 1 y 2:
DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS Y GEOTECNIA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL DE LA UNIVERSIDAD DE CHILE.
2002. Aislación Sísmica y Disipación [Fotografías] Chile. Consulta: 5 de octubre de 2011. <<http://www.ieg.uc.cl/docs/Aislacion.pdf>>
- Fotografía 3
MAURER SÖHNE, 2012, Lead Rubber Bearings [Fotografía] Alemania. Consulta: 25 de mayo de 2012
<http://www.maurer-soehne.com/structural_protection_systems/seismic_devices/isolators/lead_rubber_bearings/>
- Fotografía 4
Hendri Singarimbun, 2009, Base Isolator Lead Rubber Bearing Technology In High Risk Seismic Zone [Fotografía] Indonesia. Consulta: 25 de mayo de 2012.
<<http://hendrasingarimbun.blogspot.com/2009/08/pengaruh-penggunaan-base-isolator-lead.html>>
- Fotografía 5
Centro de Atención Ciudadana de Acapulco, Guerrero. 2011. Aisladores sísmicos de triple péndulo [Fotografía] México. Consulta: 25 de mayo de 2012.
< <http://cedac.guerrero.gob.mx/?p=280>>
- Figura 1
SKINNER, Ivan, KELLY, Trevor y ROBINSON, Bill. 2011 Seismic isolation for designers and structural engineers. National Information Centre of Earthquake Engineering [Figura]. India
- Figura 2
UNIFORM BUILDING CODE. 1997 UBC– APPENDIX CHAPTER 16. División IV – Earthquake Regulations for Seismic – Isolated Structures [Figura]. EE.UU.

Anexo

3.1

Norma técnica

UBC 1997, Capítulo 16

Division IV—EARTHQUAKE REGULATIONS FOR SEISMIC-ISOLATED STRUCTURES

SECTION 1654 — GENERAL

Every seismic-isolated structure and every portion thereof shall be designed and constructed in accordance with the requirements of this division and the applicable requirements of Chapter 16, Part IV.

The lateral-force-resisting system and the isolation system shall be designed to resist the deformations and stresses produced by the effects of seismic ground motions as provided in this division.

Where wind forces prescribed by Chapter 16, Part III, produce greater deformations or stresses, such loads shall be used for design in lieu of the deformations and stresses resulting from earthquake forces.

SECTION 1655 — DEFINITIONS

The definitions of Section 1627 and the following apply to the provisions of this division:

DESIGN DISPLACEMENT is the design-basis earthquake lateral displacement, excluding additional displacement due to actual and accidental torsion, required for design of the isolation system.

DESIGN-BASIS EARTHQUAKE is defined in Section 1631.2.

EFFECTIVE DAMPING is the value of equivalent viscous damping corresponding to energy dissipated during cyclic response of the isolation system.

EFFECTIVE STIFFNESS is the value of the lateral force in the isolation system, or an element thereof, divided by the corresponding lateral displacement.

ISOLATION INTERFACE is the boundary between the upper portion of the structure, which is isolated, and the lower portion of the structure, which moves rigidly with the ground.

ISOLATION SYSTEM is the collection of structural elements that includes all individual isolator units, all structural elements that transfer force between elements of the isolation system, and all connections to other structural elements. The isolation system also includes the wind-restraint system if such a system is used to meet the design requirements of this section.

ISOLATOR UNIT is a horizontally flexible and vertically stiff structural element of the isolation system that permits large lateral deformations under design seismic load. An isolator unit may be used either as part of or in addition to the weight-supporting system of the building.

MAXIMUM CAPABLE EARTHQUAKE is the maximum level of earthquake ground shaking that may ever be expected at the building site within the known geological framework. In Seismic Zones 3 and 4, this intensity may be taken as the level of earthquake ground motion that has a 10 percent probability of being exceeded in a 100-year time period.

MAXIMUM DISPLACEMENT is the maximum capable earthquake lateral displacement, excluding additional displacement due to actual and accidental torsion, required for design of the isolation system.

TOTAL DESIGN DISPLACEMENT is the design-basis earthquake lateral displacement, including additional displacement due to actual and accidental torsion, required for design of the isolation system, or an element thereof.

TOTAL MAXIMUM DISPLACEMENT is the maximum capable earthquake lateral displacement, including additional displacement due to actual and accidental torsion, required for verification of the stability of the isolation system, or elements thereof, design of building separations, and vertical load testing of isolator unit prototypes.

WIND-RESTRAINT SYSTEM is the collection of structural elements that provide restraint of the seismic-isolated structure for wind loads. The wind-restraint system may be either an integral part of isolator units or may be a separate device.

SECTION 1656 — SYMBOLS AND NOTATIONS

The symbols and notations of Section 1628 and the following provisions apply to the provisions of this division:

- B_D = numerical coefficient related to the effective damping of the isolation system at the design displacement, β_D , as set forth in Table A-16-C.
- B_M = numerical coefficient related to the effective damping of the isolation system at the maximum displacement, β_M , as set forth in Table A-16-C.
- b = the shortest plan dimension of the structure, in feet (mm), measured perpendicular to d .
- C_{AD} = the seismic coefficient, C_a , as set forth in Table 16-Q.
- C_{AM} = the seismic coefficient, C_a , as set forth in Table A-16-F for shaking intensity, $M_M Z N_a$.
- C_{VD} = seismic coefficient, C_v , as set forth in Table 16-R.
- C_{VM} = seismic coefficient, C_v , as set forth in Table A-16-G for shaking intensity, $M_M Z N_v$.
- D_D = design displacement, in inches (mm), at the center of rigidity of the isolation system in the direction under consideration, as prescribed by Formula (58-1).
- D_D' = design displacement, in inches (mm), at the center of rigidity of the isolation system in the direction under consideration, as prescribed by Formula (59-1).
- D_M = maximum displacement, in inches (mm), at the center of rigidity of the isolation system in the direction under consideration, as prescribed by Formula (58-3).
- D_M' = maximum displacement, in inches (mm), at the center of rigidity of the isolation system in the direction under consideration, as prescribed by Formula (59-2).
- D_{TD} = total design displacement, in inches (mm), of an element of the isolation system including both translational displacement at the center of rigidity, D_D , and the component of torsional displacement in the direction under consideration, as specified in Section 1658.3.5.
- D_{TM} = total maximum displacement, in inches (mm), of an element of the isolation system, including both translational displacement at the center of rigidity, D_M , and the component of torsional displacement in the direction under consideration, as specified by Section 1658.3.3.
- d = the longest plan dimension of the structure, in feet (mm).
- E_{LOOP} = energy dissipated in kip-inches (kN-mm), in an isolator unit during a full cycle of reversible load over a test displacement range from Δ^+ to Δ^- , as measured by the area enclosed by the loop of the force-deflection curve.
- ΣE_D = total energy dissipated, in kip-inches (kN-mm), of all units of the isolation system during a full cycle of response at the design displacement, D_D .

ΣE_M = total energy dissipated, in kip-inches (kN-mm), of all units of the isolation system during a full cycle of response at the maximum displacement, D_M .

e = the actual eccentricity, in feet (mm), measured in plan between the center of mass of the structure above the isolation interface and the center of rigidity of the isolation system, plus accidental eccentricity, in feet (mm), taken as 5 percent of the maximum building dimension perpendicular to the direction of force under consideration.

F^- = negative force, in kips (kN), in an isolator unit during a single cycle of prototype testing at a displacement amplitude of Δ^- .

F^+ = positive force, in kips (kN), in an isolator unit during a single cycle of prototype testing at a displacement amplitude of Δ^+ .

$\Sigma |F_D^+|_{max}$
= sum, for all isolator units, of the absolute values of the individual isolator unit's maximum positive force in kips (kN) at positive displacement D_D . For a given isolator unit, the maximum positive force at positive displacement, D_D , is determined by comparing each of the maximum positive forces that occurred during each cycle of the prototype test sequence associated with displacement increment D_D , and selecting the maximum positive value at positive displacement, D_D .

$\Sigma |F_D^+|_{min}$
= sum, for all isolator units, of the absolute values of the individual isolator unit's minimum positive force in kips (kN) at positive displacement D_D . For a given isolator unit, the minimum positive force at positive displacement, D_D , is determined by comparing each of the minimum positive forces that occurred during each cycle of the prototype test sequence associated with displacement increment D_D , and selecting the minimum positive value at positive displacement, D_D .

$\Sigma |F_D^-|_{max}$
= sum, for all isolator units, of the absolute values of the individual isolator unit's maximum negative force in kips (kN) at negative displacement D_D . For a given isolator unit, the maximum negative force at negative displacement, D_D , is determined by comparing each of the maximum negative forces that occurred during each cycle of the prototype test sequence associated with displacement increment D_D , and selecting the maximum negative value at negative displacement, D_D .

$\Sigma |F_D^-|_{min}$
= sum, for all isolator units, of the absolute values of the individual isolator unit's minimum negative force in kips (kN) at negative displacement D_D . For a given isolator unit, the minimum negative force at negative displacement, D_D , is determined by comparing each of the minimum negative forces that occurred during each cycle of the prototype test sequence associated with displacement increment D_D , and selecting the minimum negative value at negative displacement, D_D .

$\Sigma |F_M^+|_{max}$
= sum, for all isolator units, of the absolute values of the individual isolator unit's maximum positive force in kips (kN) at positive displacement D_M . For a given isolator unit, the maximum positive force at positive displacement, D_M , is determined by comparing each of the maximum positive forces that occurred during each cycle of the prototype test sequence associated with displacement increment D_M , and selecting the maximum positive value at positive displacement, D_M .

placement, D_M , is determined by comparing each of the maximum positive forces that occurred during each cycle of the prototype test sequence associated with displacement increment D_M , and selecting the maximum positive value at positive displacement, D_M .

$\Sigma |F_M^+|_{min}$
= sum, for all isolator units, of the absolute values of the individual isolator unit's minimum positive force in kips (kN) at positive displacement, D_M . For a given isolator unit, the minimum positive force at positive displacement, D_M , is determined by comparing each of the minimum positive forces that occurred during each cycle of the prototype test sequence associated with displacement increment D_M and selecting the minimum positive value at positive displacement, D_M .

$\Sigma |F_M^-|_{max}$
= sum, for all isolator units, of the absolute values of the individual isolator unit's maximum negative force in kips (kN) at negative displacement D_M . For a given isolator unit, the maximum negative force at negative displacement, D_M , is determined by comparing each of the maximum negative forces that occurred during each cycle of the prototype test sequence associated with displacement increment D_M and selecting the maximum negative value at negative displacement, D_M .

$\Sigma |F_M^-|_{min}$
= sum, for all isolator units, of the absolute values of the individual isolator unit's minimum negative force in kips (kN) at negative displacement D_M . For a given isolator unit, the minimum negative force at negative displacement, D_M , is determined by comparing each of the minimum negative forces that occurred during each cycle of the prototype test sequence associated with displacement increment D_M and selecting the minimum negative value at negative displacement, D_M .

g = gravity constant (386.4 in/sec.², or 9,810 mm/sec.², for SI).

k_{eff} = effective stiffness of an isolator unit, in kips/inch as prescribed by Formula (65-1).

k_{Dmax} = maximum effective stiffness, in kips/inch (kN/mm), of the isolation system at the design displacement in the horizontal direction under consideration.

k_{Mmax} = maximum effective stiffness, in kips/inch (kN/mm), of the isolation system at the maximum displacement in the horizontal direction under consideration.

k_{Dmin} = minimum effective stiffness, in kips/inch (kN/mm), of the isolation system at the design displacement in the horizontal direction under consideration.

k_{Mmin} = minimum effective stiffness, in kips/inch (kN/mm), of the isolation system at the maximum displacement in the horizontal direction under consideration.

M_M = numerical coefficient related to maximum capable earthquake response as set forth in Table A-16-D.

N_a = near-source factor used in the determination of C_{AD} and C_{AM} related to both the proximity of the building or structure to known faults with magnitudes and slip rates as set forth in Tables 16-S and 16-U.

N_v = near-source factor used in the determination of C_{VD} and C_{VM} related to both the proximity of the building or structure to known faults with magnitudes and slip rates as set forth in Tables 16-T and 16-U.

- R_l = numerical coefficient related to the type of lateral-force-resisting system above the isolation system as set forth in Table A-16-E for seismic-isolated structures.
- T_D = effective period, in seconds, of seismic-isolated structure at the design displacement in the direction under consideration, as prescribed by Formula (58-2).
- T_M = effective period, in seconds, of seismic-isolated structure at the maximum displacement in the direction under consideration, as prescribed by Formula (58-4).
- V_b = the total lateral seismic design force or shear on elements of the isolation system or elements below the isolation system as prescribed by Formula (58-5).
- V_s = the total lateral seismic design force or shear on elements above the isolation system as prescribed by Formula (58-8) and the limits specified in Section 1658.
- W = the total seismic dead load defined in Section 1630.1. For design of the isolation system, W is the total seismic dead load weight of the structure above the isolation interface.
- y = the distance, in feet (mm), between the center of rigidity of the isolation system and the element of interest, measured perpendicular to the direction of seismic loading under consideration.
- β_{eff} = effective damping of the isolation system and isolator unit, as prescribed by Formula (65-2).
- β_D = effective damping of the isolation system at the design displacement, as prescribed by Formula (65-3).
- β_M = effective damping of the isolation system at the maximum displacement, as prescribed by Formula (65-4).
- $\Delta+$ = maximum positive displacement of an isolator unit during each cycle of prototype testing.
- $\Delta-$ = maximum negative displacement of an isolator unit during each cycle of prototype testing.

SECTION 1657 — CRITERIA SELECTION

1657.1 Basis for Design. The procedures and limitations for the design of seismic-isolated structures shall be determined considering zoning, site characteristics, vertical acceleration, cracked section properties of concrete and masonry members, occupancy, configuration, structural system and height in accordance with Section 1629, except as noted below.

1657.2 Stability of the Isolation System. The stability of the vertical load-carrying elements of the isolation system shall be verified by analysis and test, as required, for lateral seismic displacement equal to the total maximum displacement.

1657.3 Occupancy Categories. The importance factor, I , for a seismic-isolated building shall be taken as 1.0 regardless of occupancy category.

1657.4 Configuration Requirements. Each structure shall be designated as being regular or irregular on the basis of the structural configuration above the isolation system, in accordance with Section 1629.5.

1657.5 Selection of Lateral Response Procedure.

1657.5.1 General. Any seismic-isolated structure may be, and certain seismic-isolated structures defined below shall be, designed using the dynamic lateral response procedure of Section 1659.

1657.5.2 Static analysis. The static lateral response procedure of Section 1658 may be used for design of a seismic-isolated structure, provided:

1. The structure is located at least 10 kilometers (km) from all active faults.
2. The structure is located on Soil Profile Type S_A , S_B , S_C or S_D .
3. The structure above the isolation interface is equal to or less than four stories, or 65 feet (19.8 m), in height.
4. The effective period of the isolated structure, T_M , is equal to or less than 3.0 seconds.
5. The effective period of the isolated structure, T_D , is greater than three times the elastic, fixed-base period of the structure above the isolation system, as determined by Formula (30-8) of Section 1630.
6. The structure above the isolation system is of regular configuration.
7. The isolation system is defined by all of the following attributes:
 - 7.1 The effective stiffness of the isolation system at the design displacement is greater than one third of the effective stiffness at 20 percent of the design displacement.
 - 7.2 The isolation system is capable of producing a restoring force, as specified in Section 1661.2.4.
 - 7.3 The isolation system has force-deflection properties which are independent of the rate of loading.
 - 7.4 The isolation system has force-deflection properties which are independent of vertical load and bilateral load.
 - 7.5 The isolation system does not limit maximum capable earthquake displacement to less than C_{VM}/C_{VD} times the total design displacement.

1657.5.3 Dynamic analysis. The dynamic lateral response procedure of Section 1659 shall be used for design of seismic-isolated structures as specified below:

1. **Response spectrum analysis.** Response spectrum analysis may be used for design of a seismic-isolated structure, provided:
 - 1.1 The structure is located on Soil Profile Type S_A , S_B , S_C or S_D .
 - 1.2 The isolation system is defined by all of the attributes specified in Section 1657.5.2, Item 7.
2. **Time-history analysis.** Time-history analysis may be used for design of any seismic-isolated structure and shall be used for design of all seismic-isolated structures not meeting the criteria of Section 1657.5.3, Item 1.
3. **Site-specific design spectra.** Site-specific ground motion spectra of the design-basis earthquake and the maximum capable earthquake, developed in accordance with Section 1631.2, shall be used for design and analysis of all seismic-isolated structures as specified below:
 1. The structure is located on Soil Profile Type S_E or S_F .
 2. The structure is located within 10 km of an active fault.

SECTION 1658 — STATIC LATERAL RESPONSE PROCEDURE

1658.1 General. Except as provided in Section 1659, every seismic-isolated structure, or portion thereof, shall be designed and constructed to resist minimum earthquake displacements and

forces as specified by this section and the applicable requirements of Section 1630.

1658.2 Deformation Characteristics of the Isolation System. Minimum lateral earthquake design displacements and forces on seismic-isolated structures shall be based on the deformation characteristics of the isolation system.

The deformation characteristics of the isolation system shall explicitly include the effects of the wind-restraint system if such a system is used to meet the design requirements of this document.

The deformation characteristics of the isolation system shall be based on properly substantiated tests performed in accordance with Section 1665.

1658.3 Minimum Lateral Displacements.

1658.3.1 Design displacement. The isolation system shall be designed and constructed to withstand minimum lateral earthquake displacements which act in the direction of each of the main horizontal axes of the structure in accordance with the formula:

$$D_D = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right)C_{VD}T_D}{B_D} \quad (58-1)$$

1658.3.2 Effective period at the design displacement. The effective period of the isolated structure at the design displacement, T_D , shall be determined using the deformational characteristics of the isolation system in accordance with the formula:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Dmin}g}} \quad (58-2)$$

1658.3.3 Maximum displacement. The maximum displacement of the isolation system, D_M , in the most critical direction of horizontal response shall be calculated in accordance with the formula:

$$D_M = \frac{\left(\frac{g}{4\pi^2}\right)C_{VM}T_M}{B_M} \quad (58-3)$$

1658.3.4 Effective period at the maximum displacement. The effective period of the isolated structure at the maximum displacement, T_M , shall be determined using the deformational characteristics of the isolation system in accordance with the formula:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{Mmin}g}} \quad (58-4)$$

1658.3.5 Total displacement. The total design displacement, D_{TD} , and the total maximum displacement, D_{TM} , of elements of the isolation system shall include additional displacement due to actual and accidental torsion calculated considering the spatial distribution of the lateral stiffness of the isolation system and the most disadvantageous location of mass eccentricity.

The total design displacement, D_{TD} , and the total maximum displacement, D_{TM} , of elements of an isolation system with uniform spatial distribution of lateral stiffness shall not be taken as less than that prescribed by the formulas:

$$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (58-5)$$

$$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (58-6)$$

The total design displacement, D_{TD} , and the total maximum displacement, D_{TM} , may be taken as less than the value prescribed by Formulas (58-5) and (58-6), but not less than 1.1 times D_D and 1.1 times D_M , respectively, provided the isolation system is shown by calculation to be configured to resist torsion accordingly.

1658.4 Minimum Lateral Forces.

1658.4.1 Isolation system and structural elements at or below the isolation system. The isolation system, the foundation, and all structural elements below the isolation system shall be designed and constructed to withstand a minimum lateral seismic force, V_b , using all of the appropriate provisions for a nonisolated structure where:

$$V_b = k_{Dmax}D_D \quad (58-7)$$

1658.4.2 Structural elements above the isolation system. The structure above the isolation system shall be designed and constructed to withstand a minimum shear force, V_s , using all of the appropriate provisions for a nonisolated structure where:

$$V_s = \frac{k_{Dmax}D_D}{R_I} \quad (58-8)$$

The R_I factor shall be based on the type of lateral-force-resisting system used for the structure above the isolation system.

1658.4.3 Limits on V_s . The value of V_s shall not be taken as less than the following:

1. The lateral seismic force required by Chapter 16, Division III, for a fixed-base structure of the same weight, W , and a period equal to the isolated period, T_D .
2. The base shear corresponding to the design wind load.
3. The lateral seismic force required to fully activate the isolation system factored by 1.5 (e.g., one and one-half times the yield level of a softening system, the ultimate capacity of a sacrificial wind-restraint system or the static friction level of a sliding system).

1658.5 Vertical Distribution of Force. The total force shall be distributed over the height of the structure above the isolation interface in accordance with the formula:

$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i} \quad (58-9)$$

At each level designated as x , the force F_x shall be applied over the area of the building in accordance with the mass distribution at the level. Stresses in each structural element shall be calculated as the effect of force, F_x , applied at the appropriate levels above the base.

1658.6 Drift Limits. The maximum interstory drift ratio of the structure above the isolation system shall not exceed $0.010/R_I$.

SECTION 1659 — DYNAMIC LATERAL-RESPONSE PROCEDURE

1659.1 General. As required by Section 1657, every seismic-isolated structure, or portion thereof, shall be designed and constructed to resist earthquake displacements and forces as specified in this section and the applicable requirements of Section 1631.

1659.2 Isolation System and Structural Elements below the Isolation System. The total design displacement of the isolation system shall not be taken as less than 90 percent of D_{TD} as specified by Section 1658.3.3.

The total maximum displacement of the isolation system shall not be taken as less than 80 percent of D_{TM} as prescribed by Formula (58-6).

The design lateral shear force on the isolation system and structural elements below the isolation system shall not be taken as less than 90 percent of V_b as prescribed by Formula (58-7).

The limits of the first and second paragraphs shall be evaluated using values of D_{TD} and D_{TM} determined in accordance with Section 1658.3, except that $D_{D'}$ may be used in lieu of D_D and $D_{M'}$ may be used in lieu of D_M , where $D_{D'}$ and $D_{M'}$ are prescribed by the formulas:

$$D_{D'} = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_D}\right)^2}} \quad (59-1)$$

$$D_{M'} = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}} \quad (59-2)$$

and T is the elastic, fixed-base period of the structure above the isolation system, as determined only by Formula (30-4) of Section 1630.

1659.3 Structural Elements above the Isolation System. The design lateral shear force on the structure above the isolation system, if regular in configuration, shall not be taken as less than 80 percent of V_S as prescribed by Formula (58-8) or less than the limits specified by Section 1658.4.3.

EXCEPTION: The design lateral shear force on the structure above the isolation system, if regular in configuration, may be taken as less than 80 percent, but not less than 60 percent, of V_S provided time-history analysis is used for design of the structure.

The design lateral shear force on the structure above the isolation system, if irregular in configuration, shall not be taken as less than V_S as prescribed by Formula (58-8) or less than the limits specified by Section 1658.4.3.

EXCEPTION: The design lateral shear force on the structure above the isolation system, if irregular in configuration, may be taken as less than 100 percent, but not less than 80 percent, of V_S , provided time-history analysis is used for design of the structure.

1659.4 Ground Motion.

1659.4.1 Design spectra. Properly substantiated, site-specific spectra are required for design of all structures with an isolated period, T_M , greater than 3.0 seconds, or located on Soil Profile Type S_E or S_F or located within 10 km of an active fault or located

in Seismic Zone 1, 2A or 2B. Structures that do not require site-specific spectra and for which site-specific spectra have not been calculated shall be designed using spectra based on Figure 16-3 of Chapter 16, Division III.

A design spectrum shall be constructed for the design-basis earthquake. This design spectrum shall not be taken as less than the response spectrum given in Figure 16-3 of Chapter 16, Division III, where the values of C_a shall be taken as equal to C_{AD} and C_v shall be taken as equal to C_{VD} .

EXCEPTION: If a site-specific spectrum is calculated for the design-basis earthquake, then the design spectrum may be taken as less than 100 percent, but not less than 80 percent of the response spectrum given in Figure 16-3 of Chapter 16, Division III, where the values of C_a shall be taken as equal to C_{AD} and C_v shall be taken as equal to C_{VD} .

A design spectrum shall be constructed for the maximum capable earthquake. This spectrum shall not be taken as less than the spectrum given in Figure 16-3 of Chapter 16, Division III where the values of C_a shall be taken as equal to C_{AM} and C_v shall be taken as equal to C_{VM} . This spectrum shall be used to determine the total maximum displacement and overturning forces for design and testing of the isolation system.

EXCEPTION: If a site-specific spectrum is calculated for the maximum capable earthquake, then the design spectrum may be taken as less than 100 percent, but not less than 80 percent of the response spectrum given in Figure 16-3 of Chapter 16, Division III, where the values of C_a shall be taken as equal to C_{AM} and C_v shall be taken as equal to C_{VM} .

1659.4.2 Time histories. Pairs of appropriate horizontal ground-motion time-history components shall be selected and scaled from not less than three recorded events. Appropriate time histories shall have magnitudes, fault distances and source mechanisms that are consistent with those that control the design-basis earthquake (or maximum capable earthquake). Where three appropriate recorded ground motion time history pairs are not available, appropriate simulated ground motion time history pairs may be used to make up the total number required. For each pair of horizontal ground-motion components, the square root sum of the squares (SRSS) of the 5 percent-damped spectrum of the scaled horizontal components shall be constructed. The motions shall be scaled such that the average value of the SRSS spectra does not fall below 1.3 times the 5 percent-damped spectrum of the design-basis earthquake (or maximum capable earthquake) by more than 10 percent for periods from $0.5T_D$ seconds to $1.25T_M$ seconds.

1659.5 Mathematical Model.

1659.5.1 General. The mathematical models of the isolated structure, including the isolation system, the lateral-force-resisting system and other structural elements, shall conform to Section 1631.3 and to the requirements of Sections 1659.5.2 and 1659.5.3 below.

1659.5.2 Isolation system. The isolation system shall be modeled using deformational characteristics developed and verified by test in accordance with the requirements of Section 1658.2.

The isolation system shall be modeled with sufficient detail to:

1. Account for the spatial distribution of isolator units,
2. Calculate translation, in both horizontal directions, and torsion of the structure above the isolation interface, considering the most disadvantageous location of mass eccentricity,
3. Assess overturning/uplift forces on individual isolator units; and
4. Account for the effects of vertical load, bilateral load and/or the rate of loading if the force deflection properties of the isolation system are dependent on one or more of these attributes.

1659.5.3 Isolated structure.

1659.5.3.1 Displacement. The maximum displacement of each floor and the total design displacement and total maximum displacement across the isolation system shall be calculated using a model of the isolated structure that incorporates the force-deflection characteristics of nonlinear elements of the isolation system and the lateral-force-resisting system.

Lateral-force-resisting systems with nonlinear elements include, but are not limited to, irregular structural systems designed for a lateral force less than V_s as prescribed by Formula (58-8) and the limits specified by Section 1658.4.3, and regular structural systems designed for a lateral force less than 80 percent of V_s .

1659.5.3.2 Forces and displacements in key elements. Design forces and displacements in key elements of the lateral-force-resisting system may be calculated using a linear elastic model of the isolated structure, provided:

1. Pseudo-elastic properties assumed for nonlinear isolation system components are based on the maximum effective stiffness of the isolation system.
2. All key elements of the lateral-force-resisting system are linear.

1659.6 Description of Analysis Procedures.

1659.6.1 General. A response spectrum analysis or a time-history analysis, or both, shall be performed in accordance with Sections 1631.4 and 1631.5 and the requirements of this section.

1659.6.2 Input earthquake. The design-basis earthquake shall be used to calculate the total design displacement of the isolation system and the lateral forces and displacements of the isolated structure. The maximum capable earthquake shall be used to calculate the total maximum displacement of the isolation system.

1659.6.3 Response spectrum analysis. Response spectrum analysis shall be performed using a modal damping value for the fundamental mode in the direction of interest not greater than the effective damping of the isolation system or 30 percent of critical, whichever is less. Modal damping values for higher modes shall be selected consistent with those appropriate for response spectrum analysis of the structure above the isolation system on a fixed base.

Response spectrum analysis used to determine the total design displacement and the total maximum displacement shall include simultaneous excitation of the model by 100 percent of the most critical direction of ground motion and 30 percent of the ground motion on the orthogonal axis. The maximum displacement of the isolation system shall be calculated as the vectorial sum of the two orthogonal displacements.

1659.6.4 Time-history analysis. Time-history analysis shall be performed with at least three appropriate pairs of horizontal time-history components, as defined in Section 1659.4.2.

Each pair of time histories shall be applied simultaneously to the model, considering the most disadvantageous location of mass eccentricity. The maximum displacement of the isolation system shall be calculated from the vectorial sum of the two orthogonal displacements at each time step.

The parameter of interest shall be calculated for each time-history analysis. If three time-history analyses are performed, then the maximum response of the parameter of interest shall be used for design. If seven or more time-history analyses are performed, then the average value of the response parameter of interest may be used for design.

1659.7 Design Lateral Force.

1659.7.1 Isolation system and structural elements at or below the isolation system. The isolation system, foundation and all structural elements below the isolation system shall be designed using all of the appropriate provisions for a nonisolated structure and the forces obtained from the dynamic analysis.

1659.7.2 Structural elements above the isolation system. Structural elements above the isolation system shall be designed using the appropriate provisions for a nonisolated structure and the forces obtained from the dynamic analysis divided by a factor of R_I . The R_I factor shall be based on the type of lateral-force-resisting system used for the structure above the isolation system.

1659.7.3 Scaling of results. When the factored lateral shear force on structural elements, determined using either response spectrum or time-history analysis, is less than minimum level prescribed by Sections 1659.1 and 1659.2, then all response parameters, including member forces and moments shall be adjusted upward proportionally.

1659.8 Drift Limits. Maximum interstory drift corresponding to the design lateral force, including displacement due to vertical deformation of the isolation system, shall not exceed the following limits:

1. The maximum interstory drift ratio of the structure above the isolation system, calculated by response spectrum analysis, shall not exceed $0.015/R_I$.

2. The maximum interstory drift ratio of the structure above the isolation system, calculated by time-history analysis considering the force-deflection characteristics of nonlinear elements of the lateral-force-resisting system, shall not exceed $0.020/R_I$.

The secondary effects of the maximum capable earthquake lateral displacement, Δ , of the structure above the isolation system combined with gravity forces shall be investigated if the interstory drift ratio exceeds $0.010/R_I$.

SECTION 1660 — LATERAL LOAD ON ELEMENTS OF STRUCTURES AND NONSTRUCTURAL COMPONENTS SUPPORTED BY STRUCTURES

1660.1 General. Parts or portions of an isolated structure, permanent nonstructural components and the attachments to them, and the attachments for permanent equipment supported by a structure shall be designed to resist seismic forces and displacements as prescribed by this section and the applicable requirements of Section 1632.

1660.2 Forces and Displacements.

1660.2.1 Components at or above the isolation interface. Elements of seismic-isolated structures and nonstructural components, or portions thereof, which are at or above the isolation interface, shall be designed to resist a total lateral seismic force equal to the maximum dynamic response of the element or component under consideration.

EXCEPTION: Elements of seismic-isolated structures and nonstructural components, or portions thereof, may be designed to resist total lateral seismic force as prescribed by Formula (32-1) or (32-2) of Section 1632.

1660.2.2 Components that cross the isolation interface. Elements of seismic-isolated structures and nonstructural components, or portions thereof, that cross the isolation interface shall be designed to withstand the total maximum displacement.

1660.2.3 Components below the isolation interface. Elements of seismic-isolated structures and nonstructural compo-

nents, or portions thereof, which are below the isolation interface shall be designed and constructed in accordance with the requirements of Section 1632.

SECTION 1661 — DETAILED SYSTEMS REQUIREMENTS

1661.1 General. The isolation system and the structural system shall comply with the requirements of Section 1633 and the material requirements of Chapters 19 through 23. In addition, the isolation system shall comply with the detailed system requirements of this section and the structural system shall comply with the detailed system requirements of this section and the applicable portions of Section 1633.

1661.2 Isolation System.

1661.2.1 Environmental conditions. In addition to the requirements for vertical and lateral loads induced by wind and earthquake, the isolation system shall be designed with consideration given to other environmental conditions including aging effects, creep, fatigue, operating temperature and exposure to moisture or damaging substances.

1661.2.2 Wind forces. Isolated structures shall resist design wind loads at all levels above the isolation interface in accordance with the general wind design provisions. At the isolation interface, a wind restraint system shall be provided to limit lateral displacement in the isolation system to a value equal to that required between floors of the structure above the isolation interface.

1661.2.3 Fire resistance. Fire resistance for the isolation system shall meet that required for the building columns, walls or other structural elements in which it is installed.

Isolator systems required to have a fire-resistive rating shall be protected with approved materials or construction assemblies designed to provide the same degree of fire resistance as the structural element in which it is installed when tested in accordance with UBC Standard 7-1. See Section 703.2.

Such isolation system protection applied to isolator units shall be capable of retarding the transfer of heat to the isolator unit in such a manner that the required gravity load-carrying capacity of the isolator unit will not be impaired after exposure to the standard time-temperature curve fire test prescribed in UBC Standard 7-1 for a duration not less than that required for the fire-resistive rating of the structural element in which it is installed.

Such isolation system protection applied to isolator units shall be suitably designed and securely installed so as not to dislodge, loosen, sustain damage, or otherwise impair its ability to accommodate the seismic movements for which the isolator unit is designed and to maintain its integrity for the purpose of providing the required fire-resistive protection.

1661.2.4 Lateral restoring force. The isolation system shall be configured to produce a restoring force such that the lateral force at the total design displacement is at least $0.025W$ greater than the lateral force at 50 percent of the total design displacement.

EXCEPTION: The isolation system need not be configured to produce a restoring force, as required above, provided the isolation system is capable of remaining stable under full vertical load and accommodating a total maximum displacement equal to the greater of either 3.0 times the total design displacement $36 C_{VM}$, inches (For SI: $914.4 C_{VM}$, mm).

1661.2.5 Displacement restraint. The isolation system may be configured to include a displacement restraint that limits lateral displacement due to the maximum capable earthquake to less

than C_{VM}/C_{VD} times the total design displacement, provided that the seismic-isolated structure is designed in accordance with the following criteria when more stringent than the requirements of Section 1629.

1. Maximum capable earthquake response is calculated in accordance with the dynamic analysis requirements of Sections 1631 and 1659, explicitly considering the nonlinear characteristics of the isolation system and the structure above the isolation system.

2. The ultimate capacity of the isolation system and structural elements below the isolation system shall exceed the strength and displacement demands of the maximum capable earthquake.

3. The structure above the isolation system is checked for stability and ductility demand of the maximum capable earthquake.

4. The displacement restraint does not become effective at a displacement less than 0.75 times the total design displacement unless it is demonstrated by analysis that earlier engagement does not result in unsatisfactory performance.

1661.2.6 Vertical load stability. Each element of the isolation system shall be designed to be stable under the maximum vertical load, $1.2D + 1.0L + |E|_{max}$ and the minimum vertical load, $0.80|E|_{min}$, at a horizontal displacement equal to the total maximum displacement. The vertical earthquake load on an individual isolation unit due to overturning, $|E|_{max}$ and $|E|_{min}$, shall be based on peak response due to the maximum capable earthquake.

1661.2.7 Overturning. The factor of safety against global structural overturning at the isolation interface shall not be less than 1.0 for required load combinations. All gravity and seismic loading conditions shall be investigated. Seismic forces for overturning calculations shall be based on the maximum capable earthquake and W shall be used for the vertical restoring force.

Local uplift of individual elements is permitted provided the resulting deflections do not cause overstress or instability of the isolator units or other building elements.

1661.2.8 Inspection and replacement.

1. Access for inspection and replacement of all components of the isolation system shall be provided.

2. The architect or engineer of record or a person designated by the architect or engineer of record shall complete a final series of inspections or observations of building separation areas and of components that cross the isolation interface prior to the issuance of the certificate of occupancy for the seismic-isolated building. Such inspections and observations shall indicate that as-built conditions allow for free and unhindered displacement of the structure to maximum design levels and that all components that cross the isolation interface as installed, are able to accommodate the stipulated displacements.

3. Seismic-isolated buildings shall have a periodic monitoring, inspection and maintenance program for the isolation system established by the architect or engineer responsible for the design of the system. The objective of such a program shall be to ensure that all elements of the isolation system are able to perform to minimum design levels at all times.

4. Remodeling, repair or retrofitting at the isolation system interface, including that of components that cross the isolation interface, shall be performed under the direction of an architect or engineer licensed in the appropriate disciplines and experienced in the design and construction of seismic-isolated structures.

5. Horizontal displacement recording devices shall be installed at the isolation interface in seismic-isolated buildings.

1661.2.9 Quality control. A quality control testing program for isolator units shall be established by the engineer responsible for the structural design.

1661.3 Structural System.

1661.3.1 Horizontal distribution of force. A horizontal diaphragm or other structural elements shall provide continuity above the isolation interface and shall have adequate strength and ductility to transmit forces (due to nonuniform ground motion) from one part of the building to another.

1661.3.2 Building separations. Minimum separations between the isolated building and surrounding retaining walls or other fixed obstructions shall not be less than the total maximum displacement.

SECTION 1662 — NONBUILDING STRUCTURES

Nonbuilding structures shall be designed in accordance with the requirements of Section 1634 using design displacements and forces calculated in accordance with Section 1658 or 1659.

SECTION 1663 — FOUNDATIONS

Foundations shall be designed and constructed in accordance with the requirements of Chapter 18 using design forces calculated in accordance with Section 1658 or 1659.

SECTION 1664 — DESIGN AND CONSTRUCTION REVIEW

1664.1 General. A design review of the isolation system and related test programs shall be performed by an independent engineering team including persons licensed in the appropriate disciplines, experienced in seismic analysis methods and the theory and application of seismic isolation.

1664.2 Isolation System. Isolation system design review shall include, but not be limited to, the following:

1. Review of site-specific seismic criteria, including the development of site-specific spectra and ground motion time histories, and all other design criteria developed specifically for the project.
2. Review of the preliminary design, including the determination of the total design displacement of the isolation system design displacement and lateral force design level.
3. Overview and observation of prototype testing (Section 1665).
4. Review of the final design of the entire structural system and all supporting analyses.
5. Review of the isolation system quality control testing program (Section 1661.2.9).

The engineer of record shall submit with the plans and calculations a statement by all members of the independent engineering team stating that the above has been completed.

SECTION 1665 — REQUIRED TESTS OF ISOLATION SYSTEM

1665.1 General. The deformation characteristics and damping values of the isolation system used in the design and analysis of seismic-isolated structures shall be based on the following tests of a selected sample of the components prior to construction.

The isolation system components to be tested shall include the wind restraint system if such systems are used in the design.

The tests specified in this section are for establishing and validating the design properties of the isolation system, and shall not be considered as satisfying the manufacturing quality control tests of Section 1661.2.9.

1665.2 Prototype Tests.

1665.2.1 General. Prototype tests shall be performed separately on two full-size specimens or sets of specimens, as appropriate, of each type and size of isolator unit of the isolation system. The test specimens shall include the wind restraint system, as well as individual isolator units, if such systems are used in the design. Specimens tested shall not be used for construction.

1665.2.2 Record. For each cycle of tests the force-deflection behavior of the test specimen shall be recorded.

1665.2.3 Sequence and cycles. The following sequence of tests shall be performed for the prescribed number of cycles at a vertical load equal to the average $D + 0.5L$ on all isolator units of a common type and size:

1. Twenty fully reversed cycles of loading at a lateral force corresponding to the wind design force.
2. Three fully reversed cycles of loading at each of the following increments of displacement: $0.2 D_D$, $0.5 D_D$ and $1.0 D_D$, $1.0 D_M$.
3. Three fully reversed cycles at the total maximum displacement, $1.0 D_{TM}$.
4. $(15C_{VD}/C_{VA}B_D)$, but not less than 10, fully reversed cycles of loading at 1.0 times the total design displacement, $1.0 D_{TD}$.

If an isolator unit is also a vertical load-carrying element, then Item 2 of the sequence of cyclic tests specified above shall be performed for two additional vertical load cases:

$$(1) 1.2D + 0.5L + |E|$$

$$(2) 0.8D - |E|$$

where D and L are defined in Chapter 16, Division III. The vertical test load on an individual isolator unit shall include the load increment due to earthquake overturning, $|E|$, and shall be equal to or greater than the peak earthquake vertical force response corresponding to the test displacement being evaluated. In these tests, the combined vertical load shall be taken as the typical or average downward force on all isolator units of a common type and size.

1665.2.4 Units dependent on loading rates. If the force-deflection properties of the isolator units are dependent on the rate of loading, then each set of tests specified in Section 1665.2.3 shall be performed dynamically at a frequency equal to the inverse of the effective period, T_D , of the isolated structure.

If reduced-scale prototype specimens are used to quantify rate-dependent properties of isolators, the reduced-scale prototype specimens shall be of the same type and material and be manufactured with the same processes and quality as full-scale prototypes, and shall be tested at a frequency that represents full-scale prototype loading rates.

The force-deflection properties of an isolator unit shall be considered to be dependent on the rate of loading if there is greater than a plus or minus 10 percent difference in the effective stiffness at the design displacement when tested at a frequency equal to the inverse of the effective period, T_D , of the isolated structure and when tested at any frequency in the range of 0.1 to 2.0 times the inverse of the effective period, T_D , of the isolated structure.

1665.2.5 Units dependent on bilateral load. If the force-deflection properties of the isolator units are dependent on bilateral load, then the tests specified in Sections 1665.2.3 and 1665.2.4 shall be augmented to include bilateral load at increments of the total design displacement 0.25 and 1.0, 0.50 and 1.0, 0.75 and 1.0, and 1.0 and 1.0.

EXCEPTION: If reduced-scale prototype specimens are used to quantify bilateral-load-dependent properties, then such scaled specimens shall be of the same type and material, and manufactured with the same processes and quality as full-scale prototypes.

The force-deflection properties of an isolator unit shall be considered to be dependent on bilateral load, if the bilateral and unilateral force-deflection properties have greater than a plus or minus 10 percent difference in effective stiffness at the design displacement.

1665.2.6 Maximum and minimum vertical load. Isolator units that carry vertical load shall be statically tested for the maximum and minimum vertical load, at the total maximum displacement. In these tests, the combined vertical loads of $1.2D + 1.0L + |E|_{max}$ shall be taken as the maximum vertical force, and the combined vertical load of $0.8D - |E|_{min}$ shall be taken as the minimum vertical force, on any one isolator unit of a common type and size. The vertical load on an individual isolator unit shall include the load increment due to earthquake overturning, $|E|_{max}$ and $|E|_{min}$, and shall be based on peak response due to the maximum capable earthquake.

1665.2.7 Sacrificial wind-restraint systems. If a sacrificial wind-restraint system is to be utilized, then the ultimate capacity shall be established by test.

1665.2.8 Testing similar units. The prototype tests are not required if an isolator unit is of similar dimensional characteristics and of the same type and material as the prototype isolator unit that has been previously tested using the specified sequence of tests.

1665.3 Determination of Force-deflection Characteristics. The force-deflection characteristics of the isolation system shall be based on the cyclic load tests of isolator prototypes specified in Section 1665.2.3.

As required, the effective stiffness of an isolator unit, k_{eff} , shall be calculated for each cycle of loading by the formula:

$$k_{eff} = \frac{F^+ - F^-}{\Delta^+ - \Delta^-} \quad (65-1)$$

where F^+ and F^- are the positive and negative forces at Δ^+ and Δ^- , respectively.

As required, the effective damping (β_{eff}) of an isolator unit shall be calculated for each cycle of loading by the formula:

$$\beta_{eff} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{E_{Loop}}{k_{eff}(|\Delta^+| + |\Delta^-|)^2} \right] \quad (65-2)$$

where the energy dissipated per cycle of loading, E_{Loop} , and the effective stiffness, k_{eff} , shall be based on test displacements of Δ^+ and Δ^- .

1665.4 System Adequacy. The performance of the test specimens shall be assessed as adequate if the following conditions are satisfied:

1. The force-deflection plots of all tests specified in Section 1665.2 have a positive incremental force-carrying capacity.

2. For each increment of test displacement specified in Section 1665.2.3, Item 2, and for each vertical load case specified in Section 1665.2.3:

2.1 There is no greater than a plus or minus 10 percent difference between the effective stiffness at each of the three cycles of test and the average value of effective stiffness for each test specimen.

2.2 There is no greater than a 10 percent difference in the average value of effective stiffness of the two test specimens of a common type and size of the isolator unit over the required three cycles of test.

3. For each specimen there is no greater than a plus or minus 20 percent change in the initial effective stiffness of each test specimen over the $(15C_{VD}/C_{VA}B_D)$, but not less than 10, cycles of the test specified in Section 1665.2.3, Item 4.

4. For each specimen there is no greater than a 20 percent decrease in the initial effective damping over for the $(15C_{VD}/C_{VA}B_D)$, but not less than 10, cycles of the test specified in Section 1665.2.3, Item 4.

5. All specimens of vertical load-carrying elements of the isolation system remain stable at the total maximum displacement for static load as prescribed in Section 1665.2.6.

1665.5 Design Properties of the Isolation System.

1665.5.1 Maximum and minimum effective stiffness. At the design displacement, the maximum and minimum effective stiffnesses of the isolation system, k_{Dmax} and k_{Dmin} , shall be based on the cyclic tests of Section 1665.2.3 and calculated by the formulas:

$$k_{Dmax} = \frac{\sum |F_D^+|_{max} + \sum |F_D^-|_{max}}{2D_D} \quad (65-3)$$

$$k_{Dmin} = \frac{\sum |F_D^+|_{min} + \sum |F_D^-|_{min}}{2D_D} \quad (65-4)$$

At the maximum displacement, the maximum and minimum effective stiffness of the isolation system, k_{Mmax} and k_{Mmin} , shall be based on the cyclic tests of Section 1665.2.3 and calculated by the formulas:

$$k_{Mmax} = \frac{\sum |F_M^+|_{max} + \sum |F_M^-|_{max}}{2D_M} \quad (65-5)$$

$$k_{Mmin} = \frac{\sum |F_M^+|_{min} + \sum |F_M^-|_{min}}{2D_M} \quad (65-6)$$

For isolator units that are found by the tests of Sections 1665.2.3, 1665.2.4 and 1665.2.5 to have force-deflection characteristics which vary with vertical load, rate of loading or bilateral load, respectively, the values of k_{Dmax} and k_{Mmax} shall be increased and the values of k_{Dmin} and k_{Mmin} shall be decreased, as necessary, to bound the effects of measured variation in effective stiffness.

1665.5.2 Effective damping. At the design displacement, the effective damping of the isolation system, β_D , shall be based on the cyclic tests of Section 1665.2.3 and calculated by the formula:

$$\beta_D = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\sum E_D}{k_{Dmax} D_D^2} \right] \quad (65-7)$$

In Formula (65-7), the total energy dissipated in the isolation system per cycle of design displacement response, ΣE_D , shall be taken as the sum of the energy dissipated per cycle in all isolator units measured at test displacements, Δ^+ and Δ^- , that are equal in magnitude to the design displacement, D_D .

At the maximum displacement, the effective damping of the

isolation system, β_M , shall be based on the cyclic tests of Section 1665.2.3 and calculated by the formula:

$$\beta_M = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\sum E_M}{k_{Mmax} D_M^2} \right] \quad (65-8)$$

In Formula (65-8), the total energy dissipated in the isolation system per cycle of response, E_M , shall be taken as the sum of the energy dissipated per cycle in all isolator units measured at test displacements, Δ^+ and Δ^- , that are equal in magnitude to the maximum displacement, D_M .

TABLE A-16-C—DAMPING COEFFICIENTS, B_D AND B_M

EFFECTIVE DAMPING, β_D or β_M (percentage of critical) ^{1,2}	B_D or B_M FACTOR
≤ 2	0.8
5	1.0
10	1.2
20	1.5
30	1.7
40	1.9
≥ 50	2.0

¹The damping coefficient shall be based on the effective damping of the isolation system determined in accordance with the requirements of Section 1665.5.

²The damping coefficient shall be based on linear interpolation for effective damping values other than those given.

TABLE A-16-D—MAXIMUM CAPABLE EARTHQUAKE RESPONSE COEFFICIENT, M_M

DESIGN BASIS EARTHQUAKE SHAKING INTENSITY, Z_N	MAXIMUM CAPABLE EARTHQUAKE RESPONSE COEFFICIENT, M_M
0.075	2.67
0.15	2.0
0.20	1.75
0.30	1.50
0.40	1.25
≥ 0.50	1.20

TABLE A-16-E—STRUCTURAL SYSTEMS ABOVE THE ISOLATION INTERFACE¹

BASIC STRUCTURAL SYSTEM ²	LATERAL-FORCE-RESISTING SYSTEM DESCRIPTION	R_f	HEIGHT LIMIT FOR SEISMIC ZONES 3 AND 4
			× 304.8 for mm
1. Bearing wall system	1. Light-framed walls with shear panels		
	a. Wood structural panel walls for structures three stories or less	2.0	65
	b. All other light-framed walls	2.0	65
	2. Shear walls		
	a. Concrete	2.0	160
	b. Masonry	2.0	160
	3. Light steel-framed bearing walls with tension-only bracing	1.6	65
	4. Braced frames where bracing carries gravity load		
	a. Steel	1.6	160
	b. Concrete ³	1.6	—
c. Heavy timber	1.6	65	
2. Building frame system	1. Steel eccentrically braced frame (EBF)	2.0	240
	2. Light-framed walls with shear panels		
	a. Wood structural panel walls for structures three stories or less	2.0	65
	b. All other light-framed walls	2.0	65
	3. Shear walls		
	a. Concrete	2.0	240
	b. Masonry	2.0	160
	4. Ordinary braced frames		
	a. Steel	1.6	160
	b. Concrete ³	1.6	—
c. Heavy timber	1.6	65	
5. Special concentrically braced frames			
a. Steel	2.0	240	

(Continued)

TABLE A-16-E—STRUCTURAL SYSTEMS ABOVE THE ISOLATION INTERFACE¹—(Continued)

BASIC STRUCTURAL SYSTEM ²	LATERAL-FORCE-RESISTING SYSTEM DESCRIPTION	R_I	HEIGHT LIMIT FOR SEISMIC ZONES 3 AND 4
			× 304.8 for mm
3. Moment-resisting frame system	1. Special moment-resisting frame (SMRF)		
	a. Steel	2.0	N.L.
	b. Concrete	2.0	N.L.
	2. Masonry moment-resisting wall frame (MMRWF)	2.0	160
	3. Concrete intermediate moment-resisting frame (IMRF) ⁴	2.0	—
4. Dual systems	4. Ordinary moment-resisting frame (OMRF)		
	a. Steel ⁵	2.0	160
	b. Concrete ⁶	2.0	—
	5. Special truss moment frames of steel (TMF)	2.0	240
	1. Shear walls		
a. Concrete with SMRF	2.0	N.L.	
b. Concrete with steel OMRF	2.0	160	
c. Concrete with IMRF ⁴	2.0	160	
d. Masonry with SMRF	2.0	160	
e. Masonry with steel OMRF	2.0	160	
f. Masonry with concrete IMRF ³	2.0	—	
g. Masonry with masonry MMRWF	2.0	160	
2. Steel EBF			
a. With steel SMRF	2.0	N.L.	
b. With steel OMRF	2.0	160	
3. Ordinary braced frames			
a. Steel with steel SMRF	2.0	N.L.	
b. Steel with steel OMRF	2.0	160	
c. Concrete with concrete SMRF ³	2.0	—	
d. Concrete with concrete IMRF ³	2.0	—	
4. Specially concentrically braced frames			
a. Steel with steel SMRF	2.0	N.L.	
b. Steel with steel OMRF	2.0	160	
5. Cantilevered column building systems	1. Cantilevered column elements	1.4	35 ⁷
6. Shear wall-frame interaction systems	1. Concrete ⁶	2.0	—
7. Undefined systems	See Sections 1629.6.7 and 1629.9.2		—

N.L.—no limit.

¹See Section 1630.4 for combination of structural systems.

²Basic structural systems are defined in Section 1629.6.

³Prohibited in Seismic Zones 3 and 4.

⁴Prohibited in Seismic Zones 3 and 4, except as permitted in Section 1633.2.

⁵Ordinary moment-resisting frames in Seismic Zone 1 meeting the requirements of Section 2213.6 may use an R_I value of 2.0.

⁶Prohibited in Seismic Zones 2A, 2B, 3 and 4. See Section 1633.2.7.

⁷Total height of the building including cantilevered columns.

TABLE A-16-F—SEISMIC COEFFICIENT, C_{AM} ¹

SOIL PROFILE TYPE	MAXIMUM CAPABLE EARTHQUAKE SHAKING INTENSITY $M_M Z N_a$				
	$M_M Z N_a = 0.075$	$M_M Z N_a = 0.15$	$M_M Z N_a = 0.2$	$M_M Z N_a = 0.3$	$M_M Z N_a \geq 0.4$
S_A	0.06	0.12	0.16	0.24	$0.8 M_M Z N_a$
S_B	0.08	0.15	0.20	0.30	$1.0 M_M Z N_a$
S_C	0.09	0.18	0.24	0.33	$1.0 M_M Z N_a$
S_D	0.12	0.22	0.28	0.36	$1.1 M_M Z N_a$
S_E	0.19	0.30	0.34	0.36	$0.9 M_M Z N_a$
S_F	See Footnote 2				

¹Linear interpolation may be used to determine the value of C_{AM} for values of $M_M Z N_a$ for other than those shown in the table.

²Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis shall be performed to determine seismic coefficients for soil.

TABLE A-16-G—SEISMIC COEFFICIENT, C_{VM} ¹

SOIL PROFILE TYPE	MAXIMUM CAPABLE EARTHQUAKE SHAKING INTENSITY $M_M Z N_v$				
	$M_M Z N_v = 0.075$	$M_M Z N_v = 0.15$	$M_M Z N_v = 0.20$	$M_M Z N_v = 0.30$	$M_M Z N_v \geq 0.40$
S_A	0.06	0.12	0.16	0.24	$0.8M_M Z N_v$
S_B	0.08	0.15	0.20	0.30	$1.0M_M Z N_v$
S_C	0.13	0.25	0.32	0.45	$1.4M_M Z N_v$
S_D	0.18	0.32	0.40	0.54	$1.6M_M Z N_v$
S_E	0.26	0.50	0.64	0.84	$2.4M_M Z N_v$
S_F	See Footnote 2				

¹Linear Interpolation may be used to determine the value of C_{VM} for values of $M_M Z N_v$ for other than those shown in the table.

²Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response analysis shall be performed to determine seismic coefficients for soil.

Anexo

3.2

Norma técnica

Federal Emergency Management Agency (FEMA), 274

SEISMICALLY ISOLATED STRUCTURES

Charles A. Kircher, P.E., Ph.D.

Chapter 13 of the 2000 *NEHRP Recommended Provisions* addresses the design of buildings that incorporate a seismic isolation system. The *Provisions* provides essentially a stand alone set of design and analysis criteria for an isolation system. Chapter 13 defines load, design, and testing requirements specific to the isolation system and interfaces with the appropriate materials chapters for design of the structure above the isolation system and of the foundation and structural elements below.

A discussion of background, basic concepts, and analysis methods is followed by an example that illustrates the application of the *Provisions* to the structural design of a building with an isolation system. In this example, the building is a three-story emergency operations center (EOC) with a steel concentrically braced frame above the isolation system. Although the facility is hypothetical, it is of comparable size and configuration to actual base-isolated EOCs, and is generally representative of base-isolated buildings.

The EOC is located in San Francisco and has an isolation system that utilizes elastomeric bearings, a type of bearing commonly used for seismic isolation of buildings. The example comprehensively describes the EOC's configuration, defines appropriate criteria and design parameters, and develops a preliminary design using the equivalent lateral force (ELF) procedure of Chapter 13. It also includes a check of the preliminary design using dynamic analysis as required by the *Provisions* and specifies isolation system design and testing criteria.

Located in a region of very high seismicity, the building is subject to particularly strong ground motions. Large seismic demands pose a challenge for the design of base-isolated structures in terms of the capacity of the isolation system and the configuration of the structure above the isolation system. The isolation system must accommodate large lateral displacements (e.g., in excess of 2 ft). The structure above the isolation system should be configured to produce the smallest practical overturning loads (and uplift displacements) on the isolators. The example addresses these issues and illustrates that isolation systems can be designed to meet the requirements of the *Provisions*, even in regions of very high seismicity. Designing an isolated structure in a region of lower seismicity would follow the same approach. The isolation system displacement, overturning forces, and so forth would all be reduced, and therefore, easier to accommodate using available isolation system devices.

The isolation system for the building in the example is composed of high-damping rubber (HDR) elastomeric bearings. HDR bearings are constructed with alternating layers of rubber and steel plates all sheathed in rubber. The first base-isolated building in the United States employed this type of isolation system. Other types of isolation systems used to base isolate buildings employed lead-core elastomeric bearings (LR) and sliding isolators, such as the friction pendulum system (FPS). In regions of very high seismicity, viscous dampers have been used to supplement isolation system damping (and reduce displacement demand). Using HDR bearings in this example should not be taken as an endorsement of this particular type of isolator to the exclusion of others. The concepts of the *Provisions* apply to all types

of isolations systems, and other types of isolators (and possible supplementary dampers) could have been used equally well in the example.

In addition to the 2000 *NEHRP Recommended Provisions and Commentary* (hereafter, the *Provisions and Commentary*), the following documents are either referenced directly or are useful aids for the analysis and design of seismically isolated structures.

ATC 1996	Applied Technology Council. 1996. Seismic Evaluation and Retrofit of Buildings, ATC40.
Constantinou	Constantinou, M. C., P. Tsopelas, A. Kasalanati, and E. D. Wolff. 1999. <i>Property Modification Factors for Seismic Isolation Bearings</i> , Technical Report MCEER-99-0012. State University of New York.
CSI	Computers and Structures, Inc. (CSI). 1999. <i>ETABS Linear and Nonlinear Static and Dynamic Analysis and Design of Building Systems</i> .
FEMA 273	Federal Emergency Management Agency. 1997. <i>NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings</i> , FEMA 273.
FEMA 222A	Federal Emergency Management Agency. 1995. <i>NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings</i> , FEMA 222A.
91 UBC	International Conference of Building Officials. 1991. <i>Uniform Building Code</i> .
94 UBC	International Conference of Building Officials. 1994. <i>Uniform Building Code</i> .
Kircher	Kircher, C. A., G. C. Hart, and K. M. Romstad. 1989. "Development of Design Requirements for Seismically Isolated Structures" in <i>Seismic Engineering and Practice</i> , Proceedings of the ASCE Structures Congress, American Society of Civil Engineers, May 1989.
SEAOC 1999	Seismology Committee, Structural Engineers Association of California. 1999. <i>Recommended Lateral Force Requirements and Commentary</i> , 7 th Ed.
SEAOC 1990	Seismology Committee, Structural Engineers Association of California. 1990. <i>Recommended Lateral Force Requirements and Commentary</i> , 5th Ed.
SEAONC Isolation	Structural Engineers Association of Northern California. 1986. <i>Tentative Seismic Isolation Design Requirements</i> .

Although the guide is based on the 2000 *Provisions*, it has been annotated to reflect changes made to the 2003 *Provisions*. Annotations within brackets, [], indicate both organizational changes (as a result of a reformat of all of the chapters of the 2003 *Provisions*) and substantive technical changes to the 2003 *Provisions* and its primary reference documents. While the general changes to the document are described, the design examples and calculations have not been revised to reflect the changes to the 2003 *Provisions*.

In the 2003 edition of the *Provisions*, Chapter 13 has been restructured so that it is better integrated into the *Provisions* as a whole and is less of a stand alone set of requirements. Where they affect the design examples in this chapter, other significant changes to the 2003 *Provisions* and primary reference documents may be noted.

11.1 BACKGROUND AND BASIC CONCEPTS

Seismic isolation, commonly referred to as base isolation, is a design concept that presumes a structure can be substantially decoupled from potentially damaging earthquake ground motions. By decoupling the structure from ground shaking, isolation reduces the level of response in the structure that would otherwise occur in a conventional, fixed-base building. Conversely, base-isolated buildings may be designed with a reduced level of earthquake load to produce the same degree of seismic protection. That decoupling is achieved when the isolation scheme makes the fundamental period of the isolated structure several times greater than the period of the structure above the isolation system.

The potential advantages of seismic isolation and the advancements in isolation system products led to the design and construction of a number of isolated buildings and bridges in the early 1980s. This activity, in turn, identified a need to supplement existing seismic codes with design requirements developed specifically for such structures. These requirements assure the public that isolated buildings are safe and provide engineers with a basis for preparing designs and building officials with minimum standards for regulating construction.

Initial efforts developing design requirements for base-isolated buildings began with ad hoc groups of the Structural Engineers Association of California (SEAOC), whose Seismology Committee has a long history of contributing to codes. The northern section of SEAOC was the first to develop guidelines for the use of elastomeric bearings in hospitals. These guidelines were adopted in the late 1980s by the California Office of Statewide Health Planning and Development (OSHPD) and were used to regulate the first base-isolated hospital in California. At about the same time, the northern section of SEAOC published SEAONC Isolation, first set of general requirements to govern the design of base-isolated buildings. Most of the basic concepts for the design of seismically isolated structures found in the *Provisions* can be traced back to the initial work by the northern section of SEAOC.

By the end of the 1980s, the Seismology Committee of SEAOC recognized the need to have a more broadly based document and formed a statewide committee to develop design requirements for isolated structures Kircher. The "isolation" recommendations became an appendix to the 1990 SEAOC Blue Book. The isolation appendix was adopted with minor changes as a new appendix in the 1991 Uniform Building Code and has been updated every three years, although it remains largely the same as the original 91 UBC appendix. (SEAOC 1990 and 1999 are editions of SEAOC's *Recommended Lateral Force Requirements and Commentary*, which is also known as the *Blue Book*.)

In the mid-1990s, the Provisions Update Committee of the Building Seismic Safety Council incorporated the isolation appendix of the 94 UBC into the 1994 *Provisions* (FEMA 222A). Differences between the *Uniform Building Code* (UBC) and the *Provisions* were intentionally minimized and subsequent editions of the *UBC* and the *Provisions* are nearly identical. Additional background may be found in the commentary to the 1999 SEAOC *Blue Book*.

The *Provisions* for designing the isolation system of a new building were used as the starting point for the isolation system requirements of the *NEHRP Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings* (FEMA 273). FEMA 273 follows the philosophy that the isolation system for a rehabilitated building should be comparable to that for a new building (for comparable ground shaking criteria, etc.). The superstructure, however, could be quite different, and FEMA 273 provides more suitable design requirements for rehabilitating existing buildings using an isolation system.

11.1.1 Types of Isolation Systems

The *Provisions* requirements are intentionally broad, accommodating all types of acceptable isolation systems. To be acceptable, the *Provisions* requires the isolation system to:

1. Remain stable for maximum earthquake displacements,
2. Provide increasing resistance with increasing displacement,
3. Have limited degradation under repeated cycles of earthquake load, and
4. Have well-established and repeatable engineering properties (effective stiffness and damping).

The *Provisions* recognizes that the engineering properties of an isolation system, such as effective stiffness and damping, can change during repeated cycles of earthquake response (or otherwise have a range of values). Such changes or variability of design parameters are acceptable provided that the design is based on analyses that conservatively bound (limit) the range of possible values of design parameters.

The first seismic isolation systems used in buildings in the United States were composed of elastomeric bearings that had either a high-damping rubber compound or a lead core to provide damping to isolated modes of vibration. Other types of isolation systems now include sliding systems, such as the friction pendulum system (FPS), or some combination of elastomeric and sliding isolators. Some applications at sites with very strong ground shaking use supplementary fluid-viscous dampers in parallel with either sliding or elastomeric isolators to control displacement. While generally applicable to all types of systems, certain requirements of the *Provisions* (in particular, prototype testing criteria) were developed primarily for isolation systems with elastomeric bearings.

Isolation systems typically provide only horizontal isolation and are rigid or semi-rigid in the vertical direction. A rare exception to this rule is the full isolation (horizontal and vertical) of a building in southern California isolated by large helical coil springs and viscous dampers. While the basic concepts of the *Provisions* can be extended to full isolation systems, the requirements are only for horizontal isolation systems. The design of a full isolation system requires special analyses that explicitly include vertical ground shaking and the potential for rocking response.

Seismic isolation is commonly referred to as base isolation because the most common location of the isolation system is at or near the base of the structure. The *Provisions* does not restrict the plane of isolation to the base of the structure but does require the foundation and other structural elements below the isolation system to be designed for unreduced ($R_f = 1.0$) earthquake forces.

11.1.2 Definition of Elements of an Isolated Structure

The design requirements of the *Provisions* distinguish between structural elements that are either components of the isolation system or part of the structure below the isolation system (e.g., foundation) and elements of the structure above the isolation system. The isolation system is defined by the *Provisions* as:

The collection of structural elements that includes all individual isolator units, all structural elements that transfer force between elements of the isolation system, and all connections to other structural elements. The isolation system also includes the wind-restraint system, energy-dissipation devices, and/or the displacement restraint system if such systems and devices are used to meet the design requirements of Chapter 13.

Figure 11.1-1 illustrates this definition and shows that the isolation system consists not only of the isolator units but also of the entire collection of structural elements required for the system to function properly. The isolation system typically includes segments of columns and connecting girders just above the isolator units because such elements resist moments (due to isolation system displacement) and their yielding or failure could adversely affect the stability of isolator units.

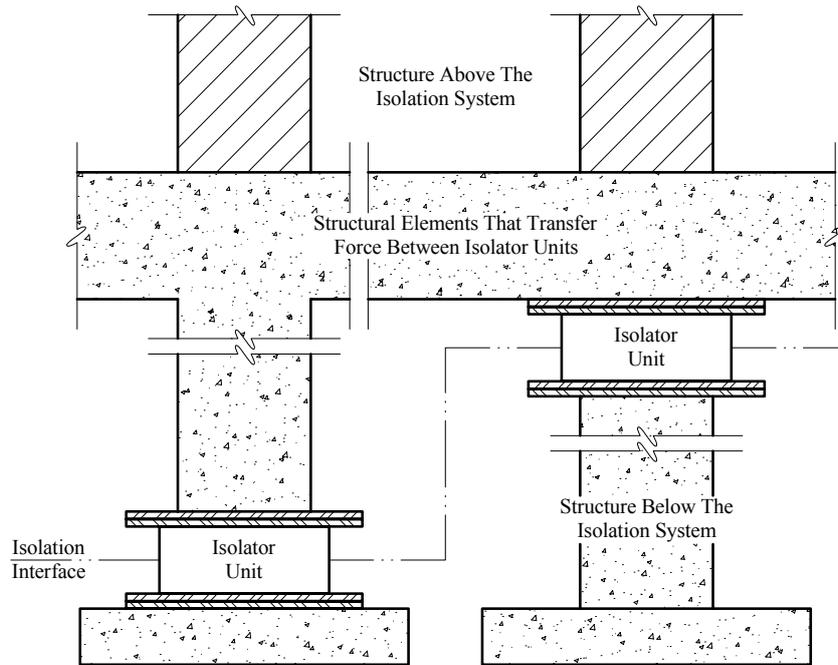


Figure 11.1-1 Isolation system terminology.

The isolation interface is an imaginary boundary between the upper portion of the structure, which is isolated, and the lower portion of the structure, which is assumed to move rigidly with the ground. Typically, the isolation interface is a horizontal plane, but it may be staggered in elevation in certain applications. The isolation interface is important for design of nonstructural components, including components of electrical and mechanical systems that cross the interface and must accommodate large relative displacements.

The wind-restraint system is typically an integral part of isolator units. Elastomeric isolator units are very stiff at very low strains and usually satisfy drift criteria for wind loads, and the static (breakaway) friction force of sliding isolator units is usually greater than the wind force.

11.1.3 Design Approach

The design of isolated structures using the *Provisions* (like the *UBC* and *SEAOC's Blue Book*) has two objectives: achieving life safety in a major earthquake and limiting damage due to ground shaking. To meet the first performance objective, the isolation system must be stable and capable of sustaining forces and displacements associated with the maximum considered earthquake and the structure above the isolation system must remain essentially elastic when subjected to the design earthquake. Limited ductility demand is considered necessary for proper functioning of the isolation system. If significant inelastic response was permitted in the structure above the isolation system, unacceptably large drifts could result due to the nature of long-period vibration. Limiting ductility demand on the superstructure has the additional benefit of meeting the second performance objective of damage control.

The *Provisions* addresses the performance objectives by requiring:

1. Design of the superstructure for forces associated with the design earthquake, reduced by only a fraction of the factor permitted for design of conventional, fixed-base buildings (i.e., $R_f = 3/8 R \leq 2.0$).
2. Design of the isolation system and elements of the structure below the isolation system (e.g., foundation) for unreduced design earthquake forces.
3. Design and prototype testing of isolator units for forces (including effects of overturning) and displacements associated with the maximum considered earthquake.
4. Provision of sufficient separation between the isolated structure and surrounding retaining walls and other fixed obstructions to allow unrestricted movement during the maximum considered earthquake.

11.1.4 Effective Stiffness and Effective Damping

The *Provisions* utilizes the concepts of effective stiffness and damping to define key parameters of inherently nonlinear, inelastic isolation systems in terms of amplitude-dependent linear properties. Effective stiffness is the secant stiffness of the isolation system at the amplitude of interest. Effective damping is the amount of equivalent viscous damping described by the hysteresis loop at the amplitude of interest. Figure 11.1-2 shows the application of these concepts to both hysteretic isolator units (e.g., friction or yielding devices) and viscous isolator units and shows the *Provisions* equations used to determine effective stiffness and damping from tests of prototypes. Ideally, the effective damping of velocity-dependent devices (including viscous isolator units) should be based on the area of hysteresis loops measured during cyclic testing of the isolation system at full-scale earthquake velocities. Tests of prototypes are usually performed at lower velocities (due to test facility limitations), resulting in hysteresis loops with less area, which produce lower (conservative) estimates of effective damping.

11.2 CRITERIA SELECTION

As specified in the *Provisions* the design of isolated structures must be based on the results of the equivalent lateral force (ELF) procedure, response spectrum analysis, or (nonlinear) time history analysis. Because isolation systems are typically nonlinear, linear methods (ELF procedure and response spectrum analysis) use effective stiffness and damping properties to model nonlinear isolation system components.

The ELF procedure is intended primarily to prescribe minimum design criteria and may be used for design of a very limited class of isolated structures (without confirmatory dynamic analyses). The simple equations of the ELF procedure are useful tools for preliminary design and provide a means of expeditious review and checking of more complex calculations. The *Provisions* also uses these equations to establish lower-bound limits on results of dynamic analysis that may be used for design. Table 11.2-1 summarizes site conditions and structure configuration criteria that influence the selection of an acceptable method of analysis for designing of isolated structures. Where none of the conditions in Table 11.2-1 applies, all three methods are permitted.

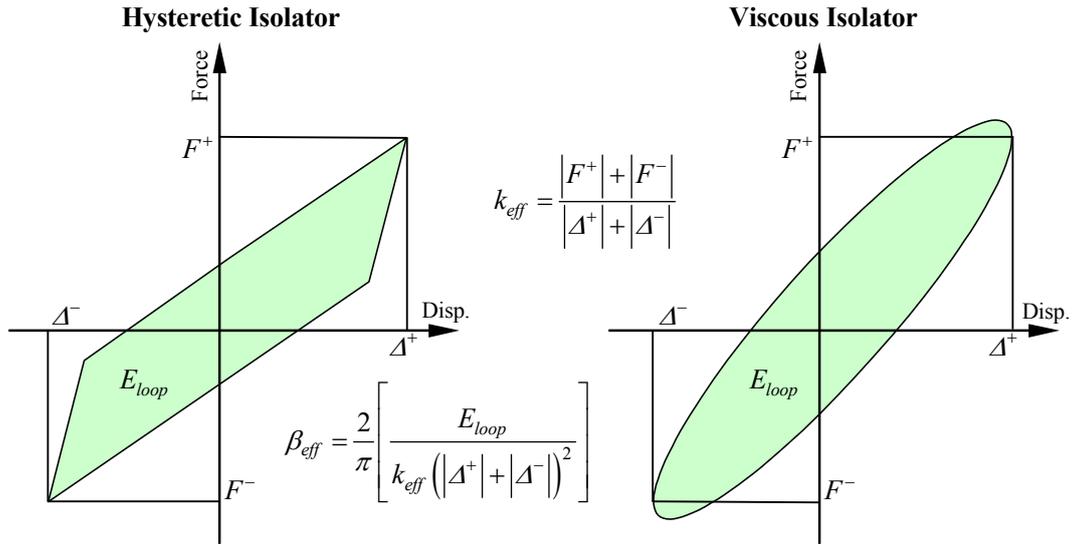


Figure 11.1-2 Effective stiffness and effective damping.

Table 11.2-1 Acceptable Methods of Analysis*

Site condition or Structure Configuration Criteria	ELF Procedure	Response Spectrum Analysis	Time History Analysis
Site Conditions			
Near-source ($S_I > 0.6$)	NP	P	P
Soft soil (Site Class E or F)	NP	NP	P
Superstructure Configuration			
Flexible or irregular superstructure (height > 4 stories, height > 65 ft, or $T_M > 3.0$ sec., or $T_D \leq 3T$)	NP	P	P
Nonlinear superstructure (requiring explicit modeling of nonlinear elements; Provisions Sec. 13.2.5.3.1) [13.4.1.2]	NP	NP	P
Isolation System Configuration			
Highly nonlinear isolation system or system that otherwise does not meet the criteria of Provisions Sec. 13.2.5.2, Item 7 [13.2.4.1, Item 7]	NP	NP	P

* P indicates permitted and NP indicates not permitted by the Provisions.

Seismic criteria are based on the same site and seismic coefficients as conventional, fixed-base structures (e.g., mapped value of S_I as defined in *Provisions* Chapter 4 [3]). Additionally, site-specific design criteria are required for isolated structures located on soft soil (Site Class E or F) or near an active source such that S_I is greater than 0.6, or when nonlinear time history analysis is used for design.

11.3 EQUIVALENT LATERAL FORCE PROCEDURE

The equivalent lateral force (ELF) procedure is a displacement-based method that uses simple equations to determine isolated structure response. The equations are based on ground shaking defined by 1 second spectral acceleration and the assumption that the shape of the design response spectrum at long periods is inversely proportional to period as shown in *Provisions* Figure 4.1.2.6 [3.3-15]. [In the 2003 edition of the *Provisions*, there is also a $1/T^2$ portion of the spectrum at periods greater than T_L . However, in most parts of the United States T_L is longer than the period of typical isolated structures.] Although the ELF procedure is considered a linear method of analysis, the equations incorporate amplitude-dependent values of effective stiffness and damping to implicitly account for the nonlinear properties of the isolation system. The equations are consistent with the nonlinear static procedure of FEMA 273 assuming the superstructure is rigid and lateral displacements to occur primarily in the isolation system.

11.3.1 Isolation System Displacement

The isolation system displacement for the design earthquake is determined by using *Provisions* Eq. 13.3.3.1 [13.3-1]:

$$D_D = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \frac{S_{DI} T_D}{B_D}$$

where the damping factor, B_D , is based on effective damping, β_D , using *Provisions* Table 13.3.3.1 [13.3-1]. This equation describes the peak (spectral) displacement of a single-degree-of-freedom (SDOF) system with period, T_D , and damping, β_D , for the design earthquake spectrum defined by the seismic coefficient, S_{DI} . S_{DI} corresponds to 5 percent damped spectral response at a period of 1 second. B_D converts 5 percent damped response to the level of damping of the isolation system. B_D is 1.0 when effective damping, β_D , is 5 percent of critical. Figure 11.3-1 illustrates the underlying concepts of *Provisions* Eq. 13.3.3.1 [13.3-1] and the amplitude-dependent equations of the *Provisions* for effective period, T_D , and effective damping, β_D .

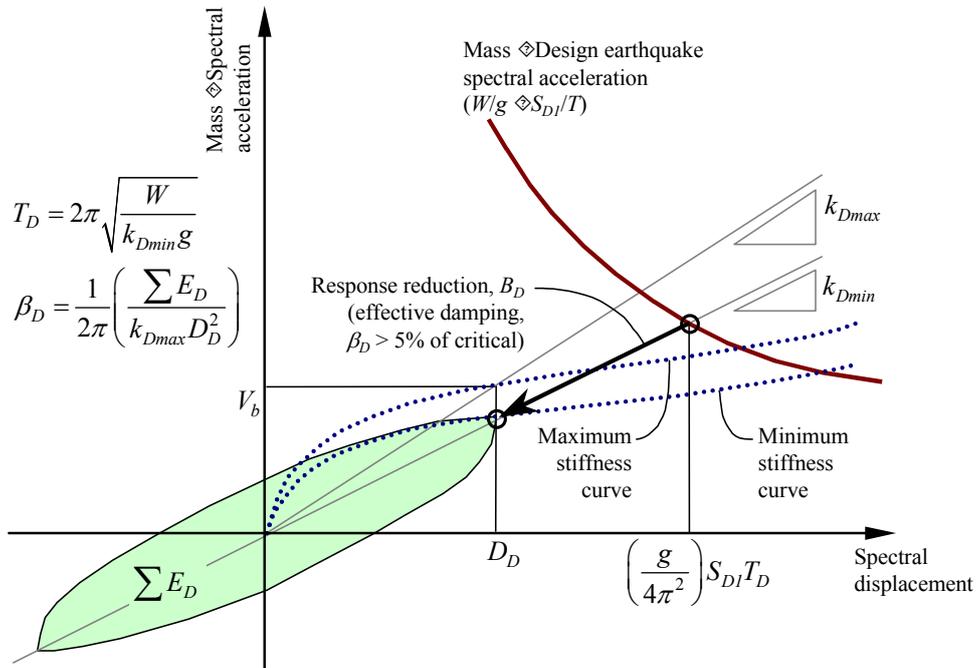


Figure 11.3-1 Isolation system capacity and earthquake demand.

The equations for maximum displacement, D_M , and design displacement, D_D , reflect differences due to the corresponding levels of ground shaking. The maximum displacement is associated with the maximum considered earthquake (characterized by S_{MI}) whereas the design displacement corresponds to the design earthquake (characterized by S_{DI}). In general, the effective period and the damping factor (T_M and B_M , respectively) used to calculate the maximum displacement are different from those used to calculate the design displacement (T_D and B_D) because the effective period tends to shift and effective damping may change with the increase in the level of ground shaking.

As shown in Figure 11.3-1, the calculation of effective period, T_D , is based on the minimum effective stiffness of the isolation system, k_{Dmin} , as determined by prototype testing of individual isolator units. Similarly, the calculation of effective damping is based on the minimum loop area, E_D , as determined by prototype testing. Use of minimum effective stiffness and damping produces larger estimates of effective period and peak displacement of the isolation system.

The design displacement, D_D , and maximum displacement, D_M , represent peak earthquake displacements at the center of mass of the building without the additional displacement, that can occur at other locations due to actual or accidental mass eccentricity. Equations for determining total displacement, including the effects of mass eccentricity as an increase in the displacement at the center of mass, are based on the plan dimensions of the building and the underlying assumption that building mass and isolation stiffness have a similar distribution in plan. The increase in displacement at corners for 5 percent mass eccentricity is about 15 percent if the building is square in plan, and as much as 30 percent if the building is long in plan. Figure 11.3-2 illustrates design displacement, D_D , and maximum displacement, D_M , at the center of mass of the building and total maximum displacement, D_{TM} , at the corners of an isolated building.

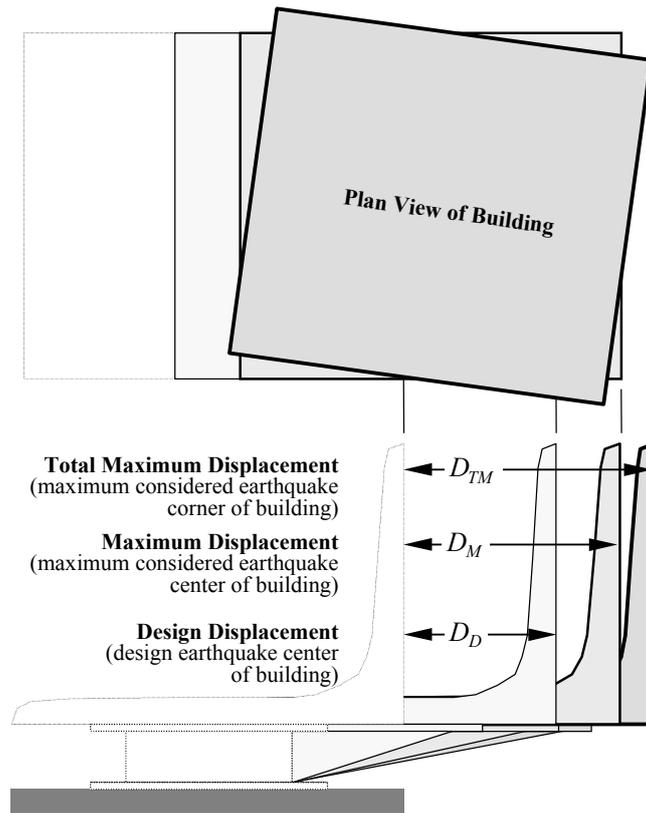


Figure 11.3-2 Design, maximum, and total maximum displacement.

11.3.2 Design Forces

Forces required by the *Provisions* for design of isolated structures are different for design of the superstructure and design of the isolation system and other elements of the structure below the isolation system (e.g., foundation). In both cases, however, use of the maximum effective stiffness of the isolation system is required to determine a conservative value of design force.

In order to provide appropriate overstrength, peak design earthquake response (without reduction) is used directly for design of the isolation system and the structure below. Design for unreduced design earthquake forces is considered sufficient to avoid inelastic response or failure of connections and other elements for ground shaking as strong as that associated with the maximum considered earthquake (i.e., shaking as much as 1.5 times that of the design earthquake). The design earthquake base shear, V_b , is given by *Provisions* Eq. 13.3.4.1 [13.3-7]:

$$V_b = k_{D_{max}} D_D,$$

where $k_{D_{max}}$ is the maximum effective stiffness of the isolation system at the design displacement, D_D . Because the design displacement is conservatively based on minimum effective stiffness, *Provisions* Eq. 13.3.4.1 implicitly induces an additional conservatism of a worst case combination mixing maximum and minimum effective stiffness in the same equation. Rigorous modeling of the isolation system for dynamic

analyses precludes mixing of maximum and minimum stiffness in the same analysis (although separate analyses are typically required to determine bounding values of both displacement and force).

Design earthquake response is reduced by a modest factor for design of the superstructure above the isolation interface, as given by *Provisions* Eq. 13.3.4.2 [13.3-8]:

$$V_s = \frac{V_b}{R_I} = \frac{k_{Dmax} D_D}{R_I}$$

The reduction factor, R_I , is defined as three-eighths of the R factor for the seismic-force-resisting system of the superstructure, as specified in *Provisions* Table 5.2.2 [4.3-1], with an upper-bound value of 2.0. A relatively small R_I factor is intended to keep the superstructure essentially elastic for the design earthquake (i.e., keep earthquake forces at or below the true strength of the seismic-force-resisting system). The *Provisions* also impose three limits on design forces that require the value of V_s to be at least as large as each of:

1. The shear force required for design of a conventional, fixed-base structure of period T_D .
2. The shear force required for wind design, and/or
3. A factor of 1.5 times the shear force required for activation of the isolation system.

These limits seldom govern design but reflect principles of good design. In particular, the third limit is included in the *Provisions* to ensure that isolation system displaces significantly before lateral forces reach the strength of the seismic-force-resisting system.

For designs using the ELF procedure, the lateral forces, F_x , must be distributed to each story over the height of the structure, assuming an inverted triangular pattern of lateral load (*Provisions* Eq.13.3.5 [13.3-9]):

$$F_x = \frac{V_s w_x h_x}{\sum_{i=1}^n w_i h_i}$$

Because the lateral displacement of the isolated structure is dominated by isolation system displacement, the actual pattern of lateral force in the isolated mode of response is distributed almost uniformly over height. The *Provisions* require an inverted triangular pattern of lateral load to capture possible higher-mode effects that might be missed by not modeling superstructure flexibility. Rigorous modeling of superstructure flexibility for dynamic analysis would directly incorporate higher-mode effects in the results.

Example plots of the design displacement, D_D , total maximum displacement, D_{TM} , and design forces for the isolation system, V_b , and the superstructure, V_s ($R_I = 2$), are shown in Figure 11.3-3 as functions of the effective period of the isolation system. The figure also shows the design base shear required for a conventional building, V ($R/I = 5$). The example plots are for a building assigned to Seismic Design Category D with a one-second spectral acceleration parameter, S_{DI} , equal to 0.6, representing a stiff soil site (Site Class D) located in a region of high seismicity but not close to an active fault. In this example, the isolation system is assumed to have 20 percent effective damping (at all amplitudes of interest) and building geometry is assumed to require 25 percent additional displacement (at corners/edges) due to the requisite 5 percent accidental eccentricity.

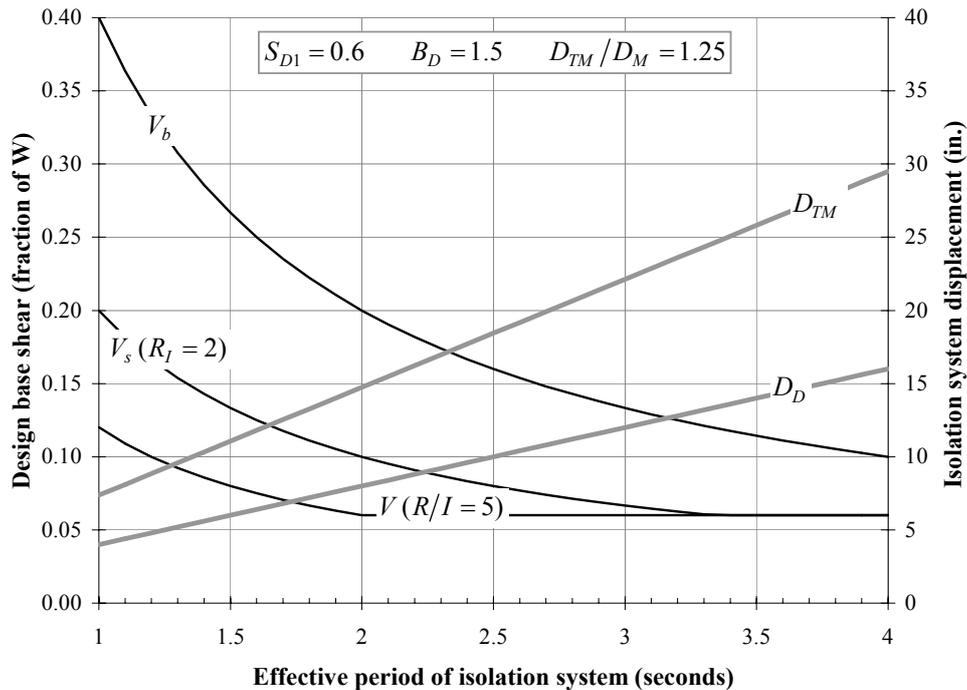


Figure 11.3-3 Isolation system displacement and shear force as function of period (1.0 in. = 25.4 mm).

The plots in Figure 11.3-3 illustrate the fundamental trade off between displacement and force as a function of isolation system displacement. As the period is increased, design forces decrease and design displacements increase linearly. Plots like those shown in Figure 11.3-3 can be constructed during conceptual design once site seismicity and soil conditions are known (or are assumed) to investigate trial values of effective stiffness and damping of the isolation system. In this particular example, an isolation system with an effective period falling between 2.5 and 3.0 seconds would not require more than 22 in. of total maximum displacement capacity (assuming $T_M \leq 3.0$ seconds). Design force on the superstructure would be less than about eight percent of the building weight (assuming $T_D \geq 2.5$ seconds and $R_I \geq 2.0$).

11.4 DYNAMIC LATERAL RESPONSE PROCEDURE

While the ELF procedure equations are useful tools for preliminary design of the isolations system, the *Provisions* requires a dynamic analysis for most isolated structures. Even where not strictly required by the *Provisions*, the use of dynamic analysis (usually time history analysis) to verify the design is common.

11.4.1 Minimum Design Criteria

The *Provisions* encourages the use of dynamic analysis but recognize that along with the benefits of more complex models and analyses also comes an increased chance of design error. To avoid possible under design, the *Provisions* establishes lower-bound limits on results of dynamic analysis used for design. The limits distinguish between response spectrum analysis (a linear, dynamic method) and time history analysis (a nonlinear, dynamic method). In all cases, the lower-bound limit on dynamic analysis is established as a percentage of the corresponding design parameter calculated using the ELF procedure equations. Table 11.4-1 summarizes the percentages that define lower-bound limits on dynamic analysis.

Table 11.4-1 Summary of Minimum Design Criteria for Dynamic Analysis

Design Parameter	Response Spectrum Analysis	Time History Analysis
Total design displacement, D_{TD}	90% D_{TD}	90% D_{TD}
Total maximum displacement, D_{TM}	80% D_{TM}	80% D_{TM}
Design force on isolation system, V_b	90% V_b	90% V_b
Design force on irregular superstructure, V_s	100% V_s	80% V_s
Design force on regular superstructure, V_s	80% V_s	60% V_s

The *Provisions* permits more liberal drift limits when the design of the superstructure is based on dynamic analysis. The ELF procedure drift limits of $0.010h_{sx}$ are increased to $0.015h_{sx}$ for response spectrum analysis and to $0.020h_{sx}$ for time history analysis (where h_{sx} is the story height at level x). Usually a stiff system (e.g., braced frames) is selected for the superstructure and drift demand is typically less than about $0.005h_{sx}$. *Provisions* Sec. 13.4.7.4 [13.4.4] requires an explicit check of superstructure stability at the maximum considered earthquake displacement if the design earthquake story drift ratio exceeds $0.010/R_f$.

11.4.2 Modeling Requirements

As for the ELF procedure, the *Provisions* requires the isolation system to be modeled for dynamic analysis using stiffness and damping properties that are based on tests of prototype isolator units. Additionally, dynamic analysis models are required to account for:

1. Spatial distribution of individual isolator units,
2. Effects of actual and accidental mass eccentricity,
3. Overturning forces and uplift of individual isolator units, and
4. Variability of isolation system properties (due to rate of loading, etc.).

The *Provisions* requires explicit nonlinear modeling of elements if time history analysis is used to justify design loads less than those permitted for ELF or response spectrum analysis. This option is seldom exercised and the superstructure is typically modeled using linear elements and conventional methods. Special modeling concerns for isolated structures include two important and related issues: the uplift of isolator units, and the P-delta effects on the isolated structure. Isolator units tend to have little or no ability to resist tension forces and can uplift when earthquake overturning (upward) loads exceed factored gravity (downward) loads. Local uplift of individual elements is permitted (*Provisions* Sec. 13.6.2.7 [13.2.5.7]) provided the resulting deflections do not cause overstress or instability. To calculate uplift effects, gap elements may be used in nonlinear models or tension may be released manually in linear models.

The effects of P-delta loads on the isolation system and adjacent elements of the structure can be quite significant. The compression load, P , can be large due to earthquake overturning (and factored gravity loads) at the same time that large displacements occur in the isolation system. Computer analysis programs (most of which are based on small-deflection theory) may not correctly calculate P-delta moments at the isolator level in the structure above or in the foundation below. Figure 11.4-1 illustrates moments due to P-delta effects (and horizontal shear loads) for an elastomeric bearing isolation system and a sliding isolation system. For the elastomeric system, the P-delta moment is split one-half up and one-half down. For the sliding system, the full P-delta moment is applied to the foundation below (due to the orientation of the sliding surface). A reverse (upside down) orientation would apply the full P-delta moment on the structure above.

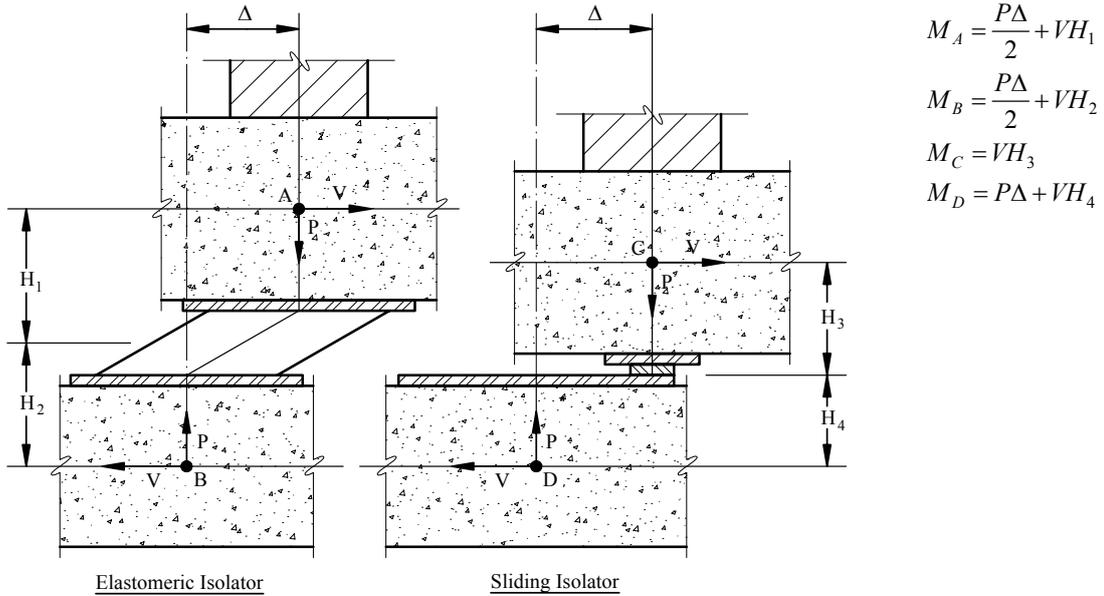


Figure 11.4-1 Moments due to horizontal shear and P-delta effects.

For time history analysis, nonlinear force-deflection characteristics of isolator units are explicitly modeled (rather than using effective stiffness and damping). Force-deflection properties of isolator units are typically approximated by a bilinear, hysteretic curve whose properties can be accommodated by commercially available nonlinear structural analysis programs. Such bilinear hysteretic curves should have approximately the same effective stiffness and damping at amplitudes of interest as the true force-deflection characteristics of isolator units (as determined by prototype testing).

Figure 11.4-2 shows a bilinear idealization of the response of a typical nonlinear isolator unit. Figure 11.4-2 also includes simple equations defining the yield point (D_y, F_y) and end point (D, F) of a bilinear approximation that has the same effective stiffness and damping as the true curve (at a displacement, D).

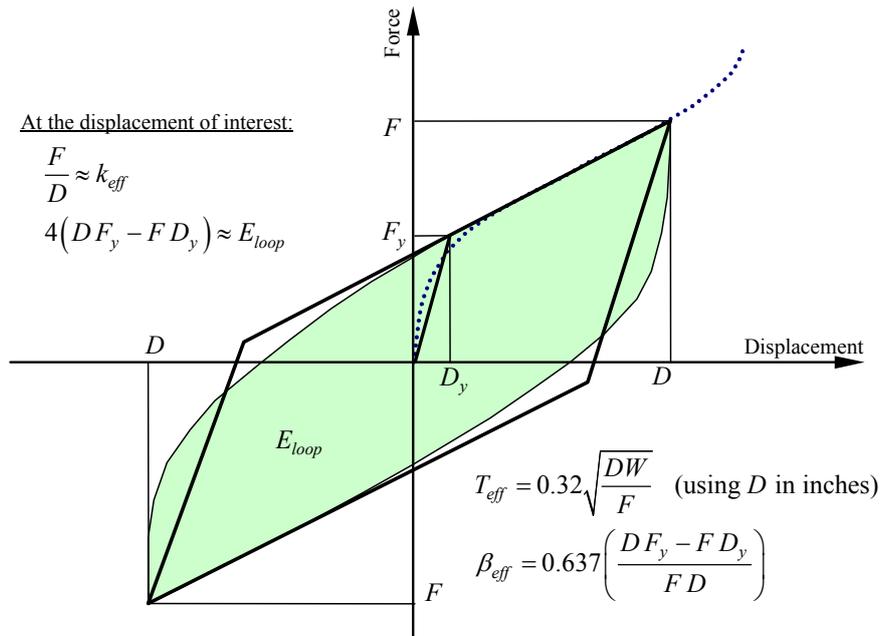


Figure 11.4-2 Bilinear idealization of isolator unit behavior.

11.4.3 Response Spectrum Analysis

Response spectrum analysis requires that isolator units be modeled using amplitude-dependent values of effective stiffness and damping that are the same as those for the ELF procedure. The effective damping of the isolated modes of response is limited to 30 percent of critical. Higher modes of response are usually assumed to have five percent damping—a value of damping appropriate for the superstructure, which remains essentially elastic. As previously noted, maximum and minimum values of effective stiffness are typically used to individually capture maximum displacement of the isolation system and maximum forces in the superstructure. Horizontal loads are applied in the two orthogonal directions, and peak response of the isolation system and other structural elements is determined using the 100 percent plus 30 percent combination method.

11.4.4 Time History Analysis

Time history analysis with explicit modeling of nonlinear isolator units is commonly used for the evaluation of isolated structures. Where at least seven pairs of time history components are employed, the values used in design for each response parameter of interest may be the average of the corresponding analysis maxima. Where fewer pairs are used (with three pairs of time history components being the minimum number permitted), the maximum value of each parameter of interest must be used for design.

The time history method is not a particularly useful design tool due to the complexity of results, the number of analyses required (e.g., to account for different locations of eccentric mass), the need to combine different types of response at each point in time, etc. It should be noted that while *Provisions* Chapter 5 does not require consideration of accidental torsion for either the linear or nonlinear response history procedures, Chapter 13 does require explicit consideration of accidental torsion, regardless of the analysis method employed. Time history analysis is most useful when used to verify a design by

checking a few key design parameters, such as: isolation displacement, overturning loads and uplift, and story shear force.

11.5 EMERGENCY OPERATIONS CENTER USING ELASTOMERIC BEARINGS, SAN FRANCISCO, CALIFORNIA

This example features the seismic isolation of a hypothetical emergency operations center (EOC), located in the center of San Francisco, California, an area of very high seismicity. Using high-damping rubber bearings, other types of isolators could be designed to have comparable response properties. Isolation is an appropriate design strategy for EOCs and other buildings where the goal is to limit earthquake damage and protect facility function. The example illustrates the following design topics:

1. Determination of seismic design parameters,
2. Preliminary design of superstructure and isolation systems (using the ELF procedure),
3. Dynamic analysis of seismically isolated structures, and
4. Specification of isolation system design and testing criteria.

While the example includes development of the entire structural system, the primary focus is on the design and analysis of the isolation system. Examples in other chapters may be referred to for more in-depth descriptions of the provisions governing detailed design of the superstructure (i.e., the structure above the isolation system) and the foundation.

11.5.1 System Description

This EOC is a three-story, steel-braced frame structure with a large, centrally located mechanical penthouse. Story heights of 15 ft at all floors accommodate computer access floors and other architectural and mechanical systems. The roof and penthouse roof decks are designed for significant live load to accommodate a helicopter-landing pad and meet other functional requirements of the EOC. Figure 11.5-1 shows the three-dimensional model of the structural system.

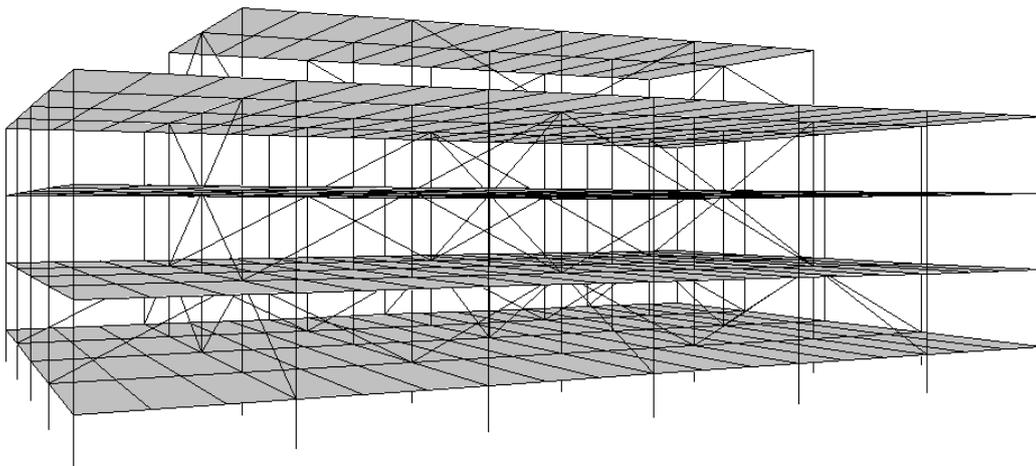


Figure 11.5-1 Three-dimensional model of the structural system.

Anexo

3.3

Norma técnica

Norma Chilena NCh-2745 2003

Contenido		Página
	Preámbulo	I
0	Introducción	1
1	Alcance y campo de aplicación	2
2	Referencias normativas	2
3	Términos y definiciones	4
4	Símbolos y términos abreviados	11
5	Generalidades	20
6	Criterio de selección	26
6.1	Bases de diseño	26
6.2	Estabilidad del sistema de aislación	26
6.3	Categorías de destino	27
6.4	Requisitos de configuración	27
6.5	Selección de procedimientos de respuesta lateral	27
7	Procedimiento de análisis estático	37
7.1	Generalidades	37
7.2	Característica fuerza-deformación del sistema de aislación	37
7.3	Desplazamientos laterales mínimos	50
7.4	Fuerzas laterales mínimas	56
		III

Contenido		Página
7.5	Distribución de fuerzas en vertical	58
7.6	Límite de desplazamiento de entrepiso	59
8	Procedimiento de análisis dinámico	59
8.1	Generalidades	59
8.2	Sistema de aislación y elementos de la subestructura	59
8.3	Elementos estructurales de la superestructura	61
8.4	Movimiento del suelo	61
8.5	Modelo matemático	64
8.6	Descripción de los procedimientos de análisis	68
8.7	Fuerza lateral de diseño	71
8.8	Límites de desplazamiento de entrepiso	72
9	Carga lateral en elementos de estructuras y en los componentes no estructurales soportados por estructuras	73
9.1	Generalidades	73
9.2	Fuerzas y desplazamientos	73
10	Requisitos detallados de los sistemas	74
10.1	Generalidades	74
10.2	Sistema de aislación	74
10.3	Sistema estructural	81
11	Estructuras que no forman parte de edificaciones	82
		IV

Contenido		Página
12	Fundaciones	82
13	Revisión de diseño y construcción	83
13.1	Generalidades	83
13.2	Sistema de aislación	83
14	Ensayos requeridos para el sistema de aislación	84
14.1	Generalidades	84
14.2	Ensayos de los prototipos	85
14.3	Determinación de las características fuerza-deformación	89
14.4	Aprobación del sistema	90
14.5	Propiedades para el diseño del sistema de aislación	91
Anexos		
	Anexo A (informativo) Bibliografía	96
Figuras		
	Figura 1 Espectro base de diseño para zona 2 y los tres tipos de suelos ($\beta = 0,05$)	62
	Figura C.1 Probabilidad de excedencia de un nivel de aceleración máxima del suelo para tres sitios en suelo duro, en zonas sísmicas 3, 2 y 1, respectivamente, en lapsos de 50 y 100 años	6
	Figura C.2 Modo fundamental de un edificio aislado	8
	Figura C.3 Cortes de entrepiso para un marco plano aislado de 5 pisos y distintos niveles de razón de amortiguamiento en el sistema de aislación	9
		V

Contenido		Página
	Figura C.4 Reducción promedio de aceleraciones para estructuras aisladas de período objetivo 2,5 s, sometidas a los registros chilenos del terremoto de 1985 indicados en C8.4.2	10
	Figura C.5 Requerimiento de rigidez para realizar análisis estático lateral equivalente	35
	Figura C.6 Ciclo fuerza-deformación de una pareja de aisladores de bajo amortiguamiento LDR	38
	Figura C.7 Ciclo fuerza-deformación de una pareja de aisladores con corazón de plomo LRB	39
	Figura C.8 Ajuste de un modelo bilineal al ciclo fuerza-deformación de una pareja de aisladores LRB	40
	Figura C.9 Curva fuerza-deformación de una pareja de aisladores de alto amortiguamiento HDR	41
	Figura C.10 Definición de modelo bilineal de una pareja de aisladores de alto amortiguamiento HDR	43
	Figura C.11 Descenso del aislador como resultado de la deformación lateral γ	46
	Figura C.12 Mecanismos típicos de aislación friccional y relaciones constitutivas fuerza-deformación	47
	Figura C.13 Variación del coeficiente de fricción dinámico μ_d con la velocidad y presión de contacto	49
	Figura C.14 Variación observada de los coeficientes de roce $\mu_{min.}$, $\mu_{max.}$ y μ_s, como función de la presión de contacto	50
	Figura C.15 Factor de modificación de respuesta para suelo tipo II obtenido a partir de registros compatibles	52
	Figura C.16 Deformada instantánea del edificio aislado FCC (Fire Command & Control Building) durante el sismo de Northridge, 1994	58
	Figura C.17 Definición del espectro de diseño de pseudo-aceleración	62
		VI

Contenido

	Página
Figura C.18 Registros sintéticos compatibles con los espectros de diseño para $\beta = 0,5$. Ellos fueron obtenidos a partir de una componente de registros reales en suelos I, II y III	63
Figura C.19 Amplificación de registros y combinación de componentes	64
Figura C.20 Definición de la zona de independencia de velocidad de carga para un aislador	87
Figura C.21 Cálculo de la rigidez efectiva (secante) máxima y mínima para una pareja de aisladores elastoméricos	91
Figura C.22 Efecto de la carga axial sobre la curva fuerza-deformación medida en un aislador FPS	92
Tablas	
Tabla 1 Coeficiente de destino de la estructura	94
Tabla 2 Factores de modificación de respuesta por amortiguamiento, B_D y B_M	94
Tabla 3 Factor de amplificación para el sismo máximo posible (Probabilidad de excedencia del PGA igual a 10% en 100 años)	95
Tabla 4 Factor de reducción para el diseño de la superestructura	95
Tabla 5 Factor que depende de la zonificación sísmica definida en NCh433	95
Tabla 6 Definición del espectro de diseño, SDI	95
Tabla C.1 Valor del coeficiente “ α ”	52
Tabla C.2 Factores de modificación de respuesta por amortiguamiento, B_D y B_M (UBC)	53
Tabla C.3 Irregularidades verticales estructurales	66
Tabla C.4 Irregularidades estructurales en planta	67
Tabla C.5 Resumen de propiedades mecánicas de la pareja de aisladores de Figura C.21 para $\gamma = 100\%$ (columnas 3 a 6)	91

Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica - Requisitos

0 Introducción

0.1 El proyecto de norma que sirvió de base a la discusión de esta norma fue el resultado del trabajo del Grupo N° 5 de la Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Sísmica, ACHISINA, Protección Sísmica: Aislación Sísmica y Disipación de Energía, desde su creación en el año 1999. El proyecto contiene la traducción, comentario, y adaptación del código *Uniform Building Code* del año 1997 a la realidad sísmica chilena. En lo posible, este documento fue compatibilizado además con la norma chilena NCh433.Of1996 *Diseño sísmico de edificios*. Esto no fue una tarea sencilla debido a que el diseño de estructuras aisladas se basa principalmente en criterios de desempeño que no son consistentes con la filosofía de NCh433.Of1996 vigente.

0.2 Tal vez una de las lecciones más significativas que dejó la terrible experiencia ocurrida en los terremotos de Northridge (1994) y Kobe (1995), fue el exitoso comportamiento sísmico de las estructuras con aislación basal. Este resultado ha ocasionado una explosión en el desarrollo y uso de los sistemas de aislación en Japón, y en menor medida en California. Frente a esta rápida evolución de la Ingeniería Sísmica en el mundo hacia el uso de sistemas de reducción de vibraciones, en particular, de aislación sísmica, se torna necesario complementar los códigos sísmicos actualmente existentes con requisitos específicos para estructuras aisladas. Esta necesidad es compartida por los distintos agentes involucrados en el desarrollo y ejecución de proyectos civiles: inmobiliarias, constructoras, fabricantes, proyectistas, y usuarios, quienes favorecen el concepto de la aislación sísmica, pero que requieren como respaldo, un estándar mínimo para el diseño y construcción de estas estructuras.

0.3 Aunque en principio la idea de traducir y adaptar un código existente pareció una tarea sencilla, el tiempo y esfuerzo involucrado en este trabajo ha demostrado lo contrario. Especialmente laborioso ha sido el desarrollo de un comentario, que si bien puede ser aún pulido considerablemente, incluye aspectos relevantes que en opinión del Comité pueden ayudar eficazmente a la comprensión de los conceptos fundamentales del comportamiento sísmico de estructuras aisladas como también a aspectos muy concretos de su diseño.

0.4 Las disposiciones de esta norma no pueden garantizar por sí solas un buen comportamiento sísmico de las estructuras aisladas. Esto se debe a que este comportamiento está influido por la forma de dimensionamiento o diseño de los elementos estructurales, la cual depende de la norma de diseño del material correspondiente, y particularmente, por la forma en que se ejecutó la construcción del edificio. A esto se debe agregar que la capacidad y seguridad sísmica de la estructura y elementos no estructurales se ven afectados por el nivel de deterioro a que se ve expuesto el edificio, a las modificaciones que eventualmente se realicen durante su vida útil y por la severidad y características del evento sísmico.

1 Alcance y campo de aplicación

Esta norma establece requisitos para el análisis y diseño sísmico de edificios con aislación sísmica. También establece requisitos para el diseño de los elementos no estructurales soportados por el edificio y los ensayos requeridos para el sistema de aislación. Esta norma no incluye el diseño sísmico de edificios que usan disipadores de energía en la superestructura.

2 Referencias normativas

Los documentos normativos siguientes contienen disposiciones que, a través de referencias en el texto de la norma, constituyen requisitos de la norma.

A la fecha de publicación de esta norma estaba vigente la edición que se indica a continuación.

Todas las normas están sujetas a revisión y a las partes que deban tomar acuerdos, basados en esta norma, se les recomienda investigar la posibilidad de aplicar las ediciones más recientes de las normas que se incluyen a continuación.

NOTA - El Instituto Nacional de Normalización mantiene un registro de las normas nacionales e internacionales vigentes.

NCh427.cR1977 *Especificaciones para el cálculo de estructuras de acero para edificios.*

NCh430.EOf1961 *Hormigón armado - II Parte.*

NCh432.Of1971 *Cálculo de la acción del viento sobre las construcciones.*

NCh433.Of1996 *Diseño sísmico de edificios.*

NCh2745

- NCh1537.Of1986 *Diseño estructural de edificios - Cargas permanentes y sobrecarga de uso.*
 NCh1928.Of1993 *Albañilería armada - Requisitos para el diseño y cálculo.*
 NCh2123.Of1997 *Albañilería confinada - Requisitos de diseño y cálculo.*
 UBC: 1997 *Uniform Building Code.*

NCh2745	Comentarios
<p>3 Términos y definiciones</p> <p>Para los propósitos de esta norma, se aplican los términos y definiciones siguientes:</p> <p>3.1 aislador: elemento estructural del sistema de aislación que es horizontalmente flexible y verticalmente rígido y que permite grandes deformaciones laterales bajo sollicitación sísmica. Es un elemento que se puede utilizar como parte del, o adicionalmente al, sistema de carga gravitacional de la estructura</p> <p>3.2 amortiguamiento efectivo: valor de la razón de amortiguamiento viscoso equivalente que se obtiene de la energía disipada para respuesta cíclica del sistema de aislación</p> <p>3.3 desplazamiento de diseño: desplazamiento lateral producido por el sismo de diseño, excluyendo el desplazamiento debido a la torsión natural y accidental, requerido para el diseño del sistema de aislación</p> <p>3.4 desplazamiento máximo: desplazamiento lateral provocado por el sismo máximo posible, excluyendo el desplazamiento adicional debido a la torsión natural y accidental, requerido para el diseño del sistema de aislación</p> <p>3.5 desplazamiento total de diseño: desplazamiento lateral provocado por el sismo de diseño, incluyendo desplazamientos adicionales debidos a la torsión natural y accidental, requerido para el diseño del sistema de aislación o de algún elemento de él</p> <p>3.6 desplazamiento total máximo: desplazamiento lateral máximo provocado por el sismo máximo posible incluyendo desplazamientos adicionales debidos a la torsión natural y accidental, requerido para</p>	<p>C3 Términos y definiciones</p> <p>C.3.1 Típicamente, la rigidez vertical mínima del sistema de aislación es tal que la frecuencia de vibración propia de la estructura en sentido vertical, suponiendo una superestructura rígida, debe superar los 10 Hz (C7.2.d.1). Por ejemplo, suponiendo una frecuencia horizontal propia de la estructura aislada de 0,5 Hz, la rigidez vertical de un aislador resulta ser: $k_v = (f_v/f_h)^2 k_h = 400 k_h$, esto es, 400 veces más grande que su rigidez horizontal.</p>

NCh2745

la verificación de la estabilidad del sistema de aislación, o elementos de él, para el diseño de las separaciones entre edificios, y para los ensayos bajo carga vertical de los prototipos de los aisladores

3.7 interfaz de aislación: espacio generado por el sistema de aislación que se encuentra limitado en su parte superior por la superestructura y en su parte inferior por la subestructura (ver 3.14 y 3.15)

3.8 pares de registros: registros del movimiento según dos direcciones ortogonales

3.9 rigidez efectiva o secante: valor de la fuerza lateral que se genera en el sistema de aislación, o en un elemento de él, dividido por el desplazamiento lateral correspondiente

3.10 sismo de diseño (SDI): nivel del movimiento sísmico del suelo que tiene como mínimo el 10% de probabilidad de excedencia en 50 años

3.11 sismo máximo posible (SMP): nivel máximo del movimiento del suelo que puede ocurrir en el lugar de edificación dentro del esquema geológico conocido. En zonas de alta sismicidad, (Zona Sísmica 3 ó 2 de NCh433), éste puede tener una intensidad que se puede considerar como el nivel del movimiento sísmico del suelo que tiene un 10% de probabilidad de ser excedido en un período de 100 años

Comentarios

C3.10 y C3.11 La Figura C.1 muestra como ejemplo el cálculo de la probabilidad de excedencia de un cierto nivel de aceleración máxima del suelo para tres localidades ubicadas en suelo duro, en zonas sísmicas 3, 2 y 1, respectivamente.

Para zona sísmica 3, se observa que una probabilidad de excedencia del 10% ($T = 50$ años), la aceleración resultante entre 0,45 g y 0,6 g, dependiendo de la relación de atenuación utilizada.

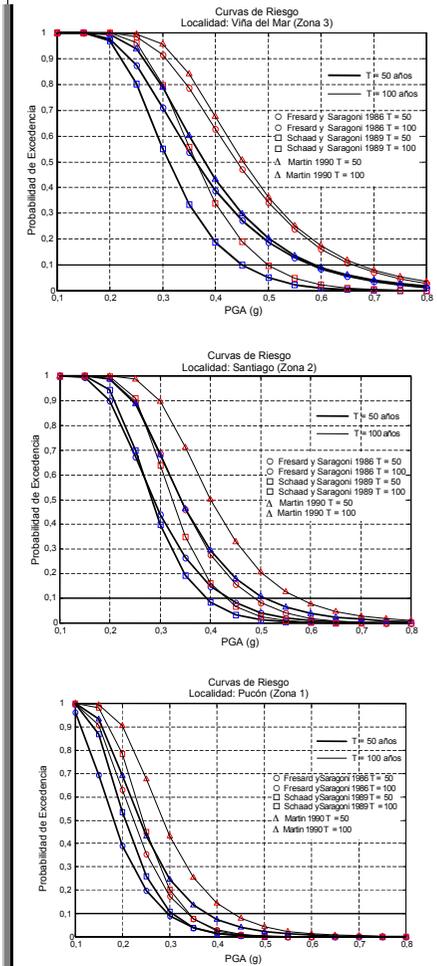
NCh2745**Comentarios**

Figura C.1 - Probabilidad de excedencia de un nivel de aceleración máxima del suelo para tres sitios en suelo duro, en zonas sísmicas 3, 2 y 1, respectivamente, en lapsos de 50 y 100 años (Anexo A, [6, 14, 24])

NCh2745

Comentarios

Similarmente, se observa que para las zonas sísmicas, los valores de aceleración suelo correspondientes a un nivel de excedencia de 10% en 50 años varían entre 0,4 g y 0,5 g para zona 2 y entre 0,3 g y 0,38 g para zona 3.

En base a los resultados de Figura C.1 se observa que el rango de aceleraciones máximas del suelo para estos sitios, y una probabilidad de excedencia de 10% en 100 años, varían entre 0,5 g y 0,65 g para zona 3; 0,45 g y 0,58 g para zona 2; 0,35 g y 0,45 g para zona 3.

Consecuentemente las razones promedio de las aceleraciones máximas correspondientes al SMP y el SDI son, 1,15; 1,12 y 1,05 respectivamente para las zonas 3; 2 y 1 respectivamente. Debido a la similitud de estas razones se ha optado por proponer un factor de amplificación M_M entre ambos niveles igual a 1,2.

La elección de la aceleración máxima del suelo como parámetro de definición para M_M es arbitraria. Sin embargo, a falta de mediciones de velocidad y desplazamiento del suelo en eventos del tipo *máximo posible*, parece razonable escoger por el momento los resultados basados en aceleración máxima, se acostumbra a utilizar en los estudios de riesgo.

3.12 sistema de aislación: conjunto de elementos estructurales que incluye a todos los aisladores individuales, todos los elementos estructurales que transfieren fuerza entre los elementos del sistema de aislación y la superestructura y subestructura, y todas las conexiones a otros elementos estructurales. El sistema de aislación también incluye al sistema de restricción al viento en caso que dicho sistema se use para satisfacer los requisitos de esta norma

C 3.12 sistema de aislación

C3.12.a El objetivo fundamental de la aislación sísmica es *desacoplar* horizontalmente la estructura del suelo de fundación con el objeto de que el movimiento horizontal del suelo durante un sismo no se transmita a la estructura y que ella permanezca idealmente inmóvil en un marco de referencia inercial. Por cierto que un desacople perfecto entre suelo y estructura es impracticable actualmente; sin embargo cualquier sistema de aislación busca concebir en él la deformación impuesta por el sismo

NCh2745

Comentarios

filtrando el movimiento que se transmite hacia la superestructura.

C3.12.b De esta forma, una estructura aislada adecuadamente tendrá un modo fundamental de vibrar como el indicado en Figura C.2 en que se observa que la superestructura es esencialmente rígida y la deformación se concentra en el nivel de aislación. Es importante observar además, que una estructura aislada tendrá generalmente dos frecuencias modales traslacionales (modo aislado traslacional) prácticamente iguales, asociadas al modo indicado en la figura en ambas direcciones horizontales. La frecuencia torsional fundamental del sistema (modo aislado torsional) puede diferir considerablemente de las frecuencias fundamentales traslacionales, dependiendo de la ubicación en planta de los aisladores y sus rigideces relativas, aunque en distribuciones uniformes la razón de frecuencia torsional y lateral es similar (ver Anexo A, [13]) a 1. Cabe aclarar también, que las frecuencias asociadas a los modos superiores de la estructura (modos 4, 5,...) no corresponden ni se parecen a las frecuencias de la estructura con base fija. En verdad estos modos superiores son similares a los modos de deformación de la estructura sin restricción en su base (estructura libre).

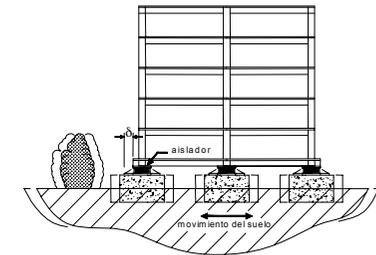


Figura C.2 - Modo fundamental de un edificio aislado

C3.12.c El sistema de aislación debe satisfacer tres requisitos fundamentales:

- 1) tener una gran flexibilidad horizontal modo de alargar el período fundamental vibración de la estructura a una zona menor aceleración espectral;
- 2) introducir un nivel de disipación de energía modo de reducir la demanda de deformación sobre el sistema de aislación; y
- 3) proveer una rigidez suficiente para carga servicio de la estructura de modo de evitar vibraciones molestas.

C3.12.d El incremento de amortiguamiento del sistema de aislación conduce típicamente a menor demanda de deformación sobre el sistema de aislación, lo que a su vez implica reducción de la fuerza de corte que actúa sobre el sistema de aislación y la superestructura. El óptimo de amortiguamiento del sistema depende ciertamente del objetivo de diseño en lo referente a la demanda sobre la estructura (deformación y sus contenidos (aceleraciones)); de hecho, un aumento excesivo del amortiguamiento conlleva a un aumento de las aceleraciones de piso lo que puede inducir problemas con los contenidos de la estructura (Figura C.3).

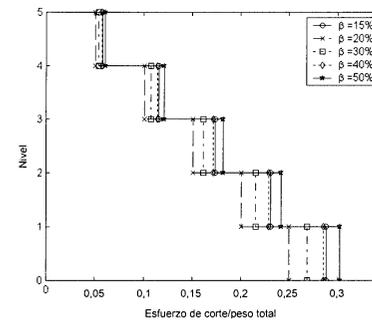


Figura C.3 - Cortes de entrepiso para un marco aislado de 5 pisos y distintos niveles de razón de amortiguamiento en el sistema de aislación

C3.12.e Por último, es interesante ilustrar para un sistema de un grado de libertad cuál es el nivel de reducción de respuesta que se espera con el uso de la aislación sísmica. La Figura C.4 muestra el promedio de la reducción de respuesta de deformación y aceleración total que se obtiene al aislar estructuras convencionales con períodos fundamentales entre 0,3 s y 1,5 s y un período aislado objetivo de 2,5 s para los sismos chilenos que se indican en C8.4.2. Como se aprecia, la reducción de deformaciones y aceleraciones decrece en la medida que la estructura convencional se hace más flexible; sin embargo, para períodos de la estructura convencional de hasta 0,7 s, las reducciones observadas son del orden de 10.

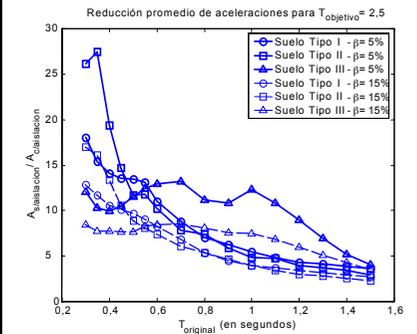


Figura C.4 - Reducción promedio de aceleraciones para estructuras aisladas de período objetivo 2,5 s, sometidas a los registros chilenos del terremoto de 1985 indicados en C8.4.2

3.13 sistema para restringir los efectos del viento: conjunto de elementos estructurales que proveen una restricción al desplazamiento horizontal de la estructura aislada ante cargas de viento. El sistema de restricción puede ser parte integral de los aisladores o bien ser un dispositivo independiente

NCh2745	Comentarios
<p>3.14 subestructura: porción de la estructura que se encuentra por debajo del nivel de aislación</p>	
<p>3.15 superestructura: porción de la estructura que se encuentra por sobre el nivel de aislación</p>	
<p>4 Símbolos y términos abreviados</p>	<p>C4 Símbolos y términos abreviados</p>
<p>Para los propósitos de esta norma, se aplican los símbolos y términos abreviados de NCh433 y adicionalmente los siguientes:</p>	
<p>B_D = coeficiente numérico relativo a la razón de amortiguamiento efectivo del sistema de aislación para el desplazamiento de diseño, β_D (ver Tabla 2)</p>	
<p>B_M = coeficiente numérico relativo a la razón de amortiguamiento efectivo del sistema de aislación para el desplazamiento máximo, β_M (ver Tabla 2)</p>	
<p>b = dimensión más corta de la planta de la estructura, medida perpendicularmente a d</p>	
<p>C_D = coeficiente sísmico de desplazamiento correspondiente al nivel sísmico de diseño, según ecuación 1</p>	
<p>C_M = coeficiente sísmico de desplazamiento correspondiente al nivel sísmico máximo posible, según ecuación 3</p>	
<p>D_D = desplazamiento de diseño, en milímetros (mm), en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo</p>	

NCh2745	Comentarios
	<p>consideración, como se indica en 7.3.1</p>
<p>D'_D = desplazamiento de diseño, en milímetros (mm), en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración, como se indica en 8.2</p>	
<p>D_M = desplazamiento máximo, en milímetros (mm), en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración, como se indica en 7.3.3</p>	
<p>D'_M = desplazamiento máximo, en milímetros (mm), en el centro de rigidez del sistema de aislación en la dirección bajo consideración, como se indica en 8.2</p>	
<p>D_{TD} = desplazamiento total de diseño, en milímetros (mm), de un elemento del sistema de aislación incluyendo tanto el desplazamiento traslacional en el centro de rigidez, D_D, como la componente de desplazamiento torsional en la dirección bajo consideración, como se especifica en 7.3.5</p>	
<p>D_{TM} = desplazamiento total máximo, en milímetros (mm), de un elemento del sistema de aislación incluyendo tanto el desplazamiento traslacional en el centro de rigidez, D_M, como la componente de desplazamiento torsional en la dirección bajo consideración, como se indica en 7.3.3</p>	

NCh2745	Comentarios
d	= dimensión en planta más larga de la estructura
E_{CICLO}	= energía disipada, en kN-mm, en un aislador durante un ciclo completo de carga reversible, en un rango de desplazamiento de ensayo de Δ^+ a Δ^- , medida por el área encerrada por un ciclo de la relación constitutiva fuerza-defomación
$\sum E_D$	= total de energía disipada, en kN-mm, por todos los aisladores durante un ciclo completo de respuesta al desplazamiento de diseño, D_D
$\sum E_M$	= total de energía disipada, en kN-mm, por todos los aisladores durante un ciclo completo de respuesta al desplazamiento máximo, D_M
e	= excentricidad real, en milímetros (mm), medida en planta entre el centro de masa de la superestructura y el centro de rigidez del sistema de aislación, más la excentricidad accidental, igual a un 5% de la dimensión máxima de la planta perpendicular a la dirección de la sollicitación sísmica considerada
$F -$	= fuerza negativa, en kN, en un aislador, durante un ciclo de ensayo a un desplazamiento con una amplitud Δ^-
$F +$	= fuerza positiva, en kN, en un aislador, durante un ciclo de ensayo a un desplazamiento con una amplitud Δ^+

NCh2745	Comentarios
$\sum F_D^+ _{\text{máx.}}$	= suma para todos los aisladores de los valores absolutos de la fuerza positiva máxima de un aislador al desplazamiento positivo D_D . Para un aislador determinado, la fuerza positiva máxima al desplazamiento positivo, D_D , se determina comparando cada una de las fuerzas positivas que ocurren durante cada ciclo de la secuencia de ensayos asociada con el desplazamiento D_D y seleccionando el valor positivo máximo al desplazamiento positivo D_D
$\sum F_D^+ _{\text{mín.}}$	= suma para todos los aisladores de los valores absolutos de la fuerza positiva mínima de un aislador al desplazamiento positivo D_D . Para un aislador determinado, la fuerza positiva mínima al desplazamiento positivo D_D se determina comparando cada una de las fuerzas positivas que ocurren durante cada ciclo de la secuencia de ensayos asociada con el desplazamiento D_D y seleccionando el valor positivo mínimo al desplazamiento positivo D_D
$\sum F_D^- _{\text{máx.}}$	= suma para todos los aisladores de los valores absolutos de la fuerza negativa máxima en valor absoluto de un aislador al desplazamiento negativo D_D . Para un aislador determinado, la fuerza negativa máxima al desplazamiento negativo D_D se

La distinción que se realiza entre $F_D^+_{\text{máx.}}$ y F_D^+ es especialmente importante en el caso de aisladores elastoméricos en que la diferencia de las fuerzas máximas depende en general del número de ciclo en cuestión debido a un fenómeno conocido como *scragging*. El *scragging* se debe a un cambio en la estructura del material como resultado de la deformación y justifica la necesidad de eliminarlo mediante ciclado del dispositivo previo a su uso en la estructura (ver 14.5).

NCh2745

Comentarios

determina comparando cada una de las fuerzas negativas que ocurren durante cada ciclo de la secuencia de ensayos asociada con el incremento de desplazamiento D_D y seleccionando el valor absoluto máximo al desplazamiento negativo D_D .

$\sum |F_D^-|_{\min.}$ = suma para todos los aisladores de los valores absolutos de la fuerza negativa mínima en valor absoluto de un aislador al desplazamiento negativo D_D . Para un aislador determinado, la fuerza negativa mínima en el desplazamiento negativo D_D se determina comparando cada una de las fuerzas negativas que ocurren durante cada ciclo de la secuencia de ensayos asociada con el incremento de desplazamiento D_D y seleccionando el valor absoluto mínimo al desplazamiento negativo D_D .

$\sum |F_M^+|_{\max.}$ = suma para todos los aisladores de los valores absolutos de la fuerza positiva máxima de un aislador al desplazamiento positivo D_M . Para un aislador determinado, la fuerza positiva máxima al desplazamiento positivo, D_M , se determina comparando cada una de las fuerzas positivas que ocurren durante cada ciclo de la secuencia de ensayos asociada con el incremento de desplazamiento D_M y seleccionando el valor positivo

NCh2745

Comentarios

máximo al desplazamiento positivo D_M .

$\sum |F_M^+|_{\min.}$ = suma para todos los aisladores de los valores absolutos de la fuerza positiva mínima de un aislador al desplazamiento positivo D_M . Para un aislador determinado, la fuerza positiva mínima al desplazamiento positivo D_M se determina comparando cada una de las fuerzas positivas que ocurren durante cada ciclo de la secuencia de ensayos asociada con el incremento de desplazamiento D_M y seleccionando el valor positivo mínimo al desplazamiento positivo D_M .

$\sum |F_M^-|_{\max.}$ = suma para todos los aisladores de los valores absolutos de la fuerza negativa máxima en valor absoluto de un aislador al desplazamiento negativo D_M . Para un aislador determinado, la fuerza negativa máxima al desplazamiento negativo D_M se determina comparando cada una de las fuerzas negativas que ocurren durante cada ciclo de la secuencia de ensayos asociada con el incremento de desplazamiento D_M y seleccionando el valor absoluto máximo al desplazamiento negativo D_M .

$\sum |F_M^-|_{\min.}$ = suma para todos los aisladores de los valores absolutos de la fuerza negativa mínima en valor absoluto de un aislador al

NCh2745	Comentarios
	desplazamiento negativo D_M . Para un aislador determinado, la fuerza negativa mínima al desplazamiento negativo D_M se determina comparando cada una de las fuerzas negativas que ocurren durante cada ciclo de la secuencia de ensayos asociada con el incremento de desplazamiento D_M y seleccionando el valor absoluto mínimo al desplazamiento negativo D_M
g	= constante de aceleración de gravedad, (9 810 mm/s ²)
H_r	= altura total de la goma del aislador
h_i	= altura en metros sobre la base hasta el nivel i
h_x	= altura en metros sobre la base hasta el nivel x
k_{ef}	= rigidez efectiva o secante de un aislador, en kN/mm, como indica ecuación 11
$k_{D \text{ máx.}}$	= rigidez efectiva o secante máxima del sistema de aislación, en kN/mm, al desplazamiento de diseño en la dirección horizontal considerada
$k_{M \text{ máx.}}$	= rigidez efectiva o secante máxima del sistema de aislación, en kN/mm, al desplazamiento máximo en la dirección horizontal considerada
$k_{D \text{ mín.}}$	= rigidez efectiva o secante mínima del sistema de aislación, en kN/mm, al desplazamiento de

NCh2745	Comentarios
	diseño en la dirección horizontal considerada
$k_{M \text{ mín.}}$	= rigidez efectiva o secante mínima del sistema de aislación, en kN/mm, al desplazamiento máximo en la dirección horizontal considerada
M_M	= coeficiente numérico relacionado con la respuesta al sismo máximo posible (ver Tabla 3)
R_l	= coeficiente de reducción para estructuras aisladas sísmicamente, relacionado con el sistema resistente a las fuerzas laterales de la superestructura como se establece en Tabla 3
T_D	= período efectivo, en segundos, de la estructura aislada al desplazamiento de diseño en la dirección considerada, como se indica en ecuación 2
T_M	= período efectivo, en segundos, de la estructura aislada al desplazamiento máximo en la dirección considerada, como se indica en ecuación 4
V_b	= fuerza o corte lateral total de diseño sísmico en los elementos del, o por debajo del, sistema de aislación, como se indica en ecuación 7
V_s	= fuerza o corte lateral total de diseño sísmico en los elementos de la superestructura, como se indica en ecuación y en los límites especificados en cláusula 7

NCh2745	Comentarios	NCh2745	Comentarios
W = carga muerta sísmica total definida en NCh433. Para el diseño del sistema de aislación, W es el peso de la carga muerta sísmica total de la superestructura		Δ^+ = desplazamiento positivo máximo de un aislador durante cada ciclo de ensayo del prototipo	
w_i = la parte de W ubicada o asignada al nivel i		Δ^- = desplazamiento negativo mínimo de un aislador durante cada ciclo de ensayo del prototipo	
w_x = la parte de W ubicada o asignada al nivel x		5 Generalidades	C5 Generalidades
y = distancia, en milímetros (mm), entre el centro de rigidez del sistema de aislación y el elemento de interés, medida perpendicularmente a la dirección de la sollicitación sísmica considerada		5.1 Todas las estructuras con aislación sísmica y cada porción de las mismas se deben diseñar y construir de acuerdo con los requisitos de esta norma. Las disposiciones de NCh433 también son obligatorias, en lo que no contradigan las disposiciones de la presente norma.	C5.a Introducción
Z = factor que depende de la zonificación sísmica definida en NCh433; se establece en Tabla 5		5.2 El sistema resistente a fuerzas laterales y el sistema de aislación se deben diseñar para resistir las deformaciones y los esfuerzos producidos por los efectos de movimientos del suelo como lo dispone esta norma.	C5.a.1 Durante la última década el concepto de aislación sísmica se ha comenzado a considerar seriamente como una alternativa en el diseño sismorresistente de estructuras, especialmente en aquellos casos en que se busca un mejor desempeño sísmico para las estructuras y sus contenidos. El buen desempeño que las estructuras aisladas han tenido durante los sismos de Northridge (Los Angeles, 1994) y Kobe (Kobe, 1995), avalan las bondades de esta alternativa en cuanto a aumentar considerablemente el nivel de seguridad para las personas y la operabilidad de la estructura después de un sismo.
β_{ef} = amortiguamiento efectivo del sistema de aislación y del aislador como indica ecuación 12		5.3 Cuando las fuerzas de viento indicadas en NCh432, produzcan deformaciones o esfuerzos mayores, dichas cargas se deben utilizar para el diseño en lugar de las deformaciones y esfuerzos resultantes de las fuerzas sísmicas.	C5.a.2 Actualmente, los conceptos de aislación sísmica se enseñan como parte del currículo de Ingeniería Civil en la mayoría de las Universidades mundialmente reconocidas, innumerables investigaciones se han desarrollado para demostrar la eficiencia de la aislación sísmica como una técnica sismorresistente, y numerosos dispositivos de aislación están comercialmente disponibles para su implementación en la práctica. Consecuentemente, se ha desarrollado una creciente necesidad de suplementar los códigos sísmicos actualmente vigentes con requisitos específicos para estructuras aisladas. Esta necesidad es compartida por los organismos encargados de la construcción y el público en general, quienes requieren que esta tecnología se implemente adecuadamente, y por los ingenieros proyectistas, los que requieren un estándar
β_D = amortiguamiento efectivo del sistema de aislación, al desplazamiento de diseño como indica ecuación 17			
β_M = amortiguamiento efectivo del sistema de aislación, al desplazamiento máximo como indica ecuación 18			
γ = deformación angular del elastómero calculada como el cociente entre la deformación de corte y la altura de goma			

NCh2745

Comentarios

mínimo para el diseño y construcción de estructuras con esta tecnología.

C5.a.3 Los primeros esfuerzos en la dirección un código para el diseño de estructuras aisladas sísmicamente fue publicado por el Structural Engineering Association of California, SEAOC año 1986 en el documento *Tentative Seismic Isolation Design Requirements* (ver Anexo A, [21]). Reconociendo la necesidad de obtener un documento que represente una opción consensuada, el comité sismológico del SEAOC desarrolló los requisitos de diseño *Geotechnical Requirements for the Design and Construction of Seismically Isolated Structures* que fueron publicados en el apéndice 1 L del libro azul del SEAOC (ver Anexo A, [22]) en 1990. Los mismos requisitos fueron publicados posteriormente como un apéndice mandatorio del Capítulo 23 del Código de Edificación (ver Anexo A, [9]) en el año 1991. El comité sismológico del SEAOC y del *International Conference of Building Officials, ICBO*, revisado este documento periódicamente desde entonces y versiones posteriores: estos requisitos se pueden encontrar en el libro azul del SEAOC (ver Anexo A, [23]) año 1996, y en el código UBC (ver Anexo A, [12]) del año 1997. Por otra parte, el Comité de Seguridad Sísmica para Edificios encomendó la incorporación de requisitos para el diseño de estructuras con aislamiento sísmico y disipación de energía en los requisitos *National Earthquake Hazard Reduction Program*, NEHRP, del año 1994. Los requisitos fueron modificados en la versión del año 1997 en que los tres documentos NEHRP/UBC/SEAOC fueron compatibilizados.

C5.a.4 El largo camino recorrido por estas instituciones y comités en EEUU avala la decisión del Grupo N° 5 de ACHI encargado de realizar esta norma de base: el trabajo en el documento UBC (ver Anexo A, [12]) del año 1997. Aunque el documento (ver Anexo A, [12]) puede ser criticado

NCh2745

Comentarios

diversos aspectos, su filosofía y criterios han sido ampliamente discutidos y aceptados por la comunidad científica y profesional en el mundo. Esto no implica que el documento no sea perfectible, y ha sido la intención de este grupo de trabajo el introducir cambios y comentarios en aquellos puntos debatibles y arbitrarios.

C5.b Filosofía de los requisitos de diseño para estructuras aisladas

C5.b.1 Es condición esencial de una estructura aislada el que su desempeño objetivo no sólo involucre la protección de la vida durante un sismo severo, sino también la reducción del daño de la estructura y sus contenidos. De esta forma, los requisitos de diseño que se presentan en esta norma son una combinación de ambos objetivos: protección a la vida y reducción del daño.

C5.b.2 Como punto de partida, estos requisitos definen dos niveles sísmicos: un nivel sísmico de diseño (SDI) y un nivel sísmico máximo posible (SMP). El sismo de diseño coincide con el nivel utilizado comúnmente en el diseño de estructuras convencionales consistente con una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años. Por otra parte, el sismo máximo posible corresponde al máximo nivel de movimiento del suelo que puede ocurrir dentro del marco geológico conocido y ha sido definido como el nivel que tiene una probabilidad de excedencia de un 10% en un período de 100 años.

Estos niveles de riesgo, que son consistentes con la tendencia mundial en los códigos de aislamiento sísmico, son distintos a los utilizados en NCh433, lo que será reflejado a través de un espectro de diseño que difiere del contenido en dicha norma. El nuevo espectro deberá reflejar, además, un nivel de seguridad superior para el sistema de aislamiento, debido a que su falla compromete necesariamente la estabilidad vertical de la estructura completa.

NCh2745	Comentarios
	<p>C5.b.3 Para el diseño de estructuras aisladas requiere que el sistema de aislación sea capaz de sostener las deformaciones y desplazamientos correspondientes al SMP sin falla. Análogamente cualquier sistema que cruce la interfaz de aislación se debe diseñar para acomodar el desplazamiento correspondiente al SMP.</p> <p>C5.b.4 Estas recomendaciones buscan, además, que la superestructura permanezca esencialmente elástica durante el sismo de diseño, a diferencia de los requisitos para estructuras con base fija que buscan alcanzar sólo un nivel de protección razonable frente a fallas estructurales mayores y pérdida de las funciones de la estructura. La filosofía de un sistema sismorresistente establece que las <i>funciones laterales de diseño</i> sean, digamos, un octavo de las fuerzas reales que ocurrirían en el edificio si éste permaneciera elástico durante el sismo. La seguridad a la vida se provee entonces a través de requerir que el sistema tenga una ductilidad adecuada y permanezca esencialmente gravitacionalmente sin daño masivo o para desplazamientos que exceden con creces el límite de fluencia del sistema. Sin embargo, el daño a los elementos estructurales y componentes no estructurales, y contenidos, son probables en una estructura convencional para un evento mayor.</p> <p>C5.b.5 Para una estructura convencional la supervivencia para el SMP no se ve afectada y se maneja implícitamente a través de mayor ductilidad y mayor detalle en los elementos. Por el contrario, en estructuras aisladas la verificación del desempeño de la estructura para el SMP se debe realizar tanto analítica y experimentalmente. El criterio detrás de esta verificación es precisamente la evidencia que en el peor escenario sísmico posible, la estructura aislada es al menos tan segura como la estructura convencional. El diseño explícito del sistema de aislación y el ensayo de aisladores para el SMP es necesario.</p>

NCh2745	Comentarios
	<p>actualmente debido a que aún no existe suficiente evidencia práctica como para permitir un criterio menos conservador. Es importante notar que, los aisladores friccionales o elastoméricos convencionales utilizados permiten alcanzar el nivel de desempeño correspondiente al SMP sin mayor dificultad.</p> <p>C5.b.6 De acuerdo con los requisitos indicados en esta norma, el diseño de una estructura está orientado a cumplir con los objetivos de desempeño siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Resistir sismos pequeños y moderados sin daño en elementos estructurales, componentes no estructurales, y contenidos del edificio. 2. Resistir sismos severos sin que exista: <ol style="list-style-type: none"> a) falla del sistema de aislación; b) daño significativo a los elementos estructurales; y c) daño masivo a elementos no estructurales. <p>Para cumplir con estos objetivos, los requisitos propuestos limitan la respuesta inelástica de la superestructura a una fracción menor de lo que se permite para edificios convencionales. Consecuentemente, el desplazamiento lateral de una estructura durante un sismo debe ocurrir en la interfaz de aislación y no en la superestructura.</p> <p>C5.b.7 Los objetivos de desempeño establecidos en C5.b.6 exceden a aquellos de estructuras convencionales en sismos moderados y severos. Es importante recalcar que, incluso a través de reforzar considerablemente las estructuras convencionales, es difícil alcanzar los objetivos de desempeño de una estructura aislada, en especial aquellos relacionados con</p>

NCh2745	Comentarios
	<p>los contenidos y terminaciones. Esto se a que el aumento de resistencia de estructura convencional conlleva rigidización de la estructura, lo que inc niveles de aceleración que dificultan control de daños en contenidos, instalacíc y terminaciones, y por ende, la funcional del edificio. Tal fue el caso del Hos Sylmar, durante el sismo de Northridge e año 1994 (ver Anexo A, [8]).</p> <p>C5.c Proyectos de edificación con aisla sísmica en Chile</p> <p>C5.c.1 A la fecha de la redacción de norma existen tres edificios con aisla sísmica en Santiago, el edificio de vivie social de la Comunidad Andal (ver Anexo A, [15]) diseñado y constr entre los años 1991 y 1992, la Clínica Carlos de la P. Universidad Católica de C construida durante el año 2000 (ver Anex [3]), y el Edificio San Agustín de la Facu de Ingeniería de la P. Universidad Cat de Chile construido durante 2001 y 2 (ver Anexo A, [3]). Además, durante el 2002 finalizó la etapa de desarrollo proyecto del edificio Placa Técnica Hospital Militar ubicado en La Reina, qu convertirá en la estructura aislada grande del país (ver Anexo A, [25]).</p> <p>C5.c.2 Los antecedentes mundiales mues que con posterioridad a los terremotos Northridge y Kobe, el uso de la aisla sísmica en el mundo ha cre considerablemente. Por ejemplo, estadísticas en Japón muestran que año 1998 se construyeron más 700 edificios con aislación sísmica, entre que se incluyen 35 hospitales, 18 edif gubernamentales y 304 edificios de vivie</p> <p>C5.c.3 Los sistemas de aislación más utiliz: en el mundo actualmente son los aislad elastoméricos de bajo amortiguamiento (LD</p>

NCh2745	Comentarios
<p>6 Criterio de selección</p> <p>6.1 Bases de diseño</p> <p>Los procedimientos y limitaciones para el diseño de estructuras con aislación sísmica se deben determinar considerando la zona, características del lugar, aceleración vertical, propiedades de las secciones agrietadas de los elementos de hormigón y mampostería, destino, configuración, sistema estructural y altura.</p> <p>6.2 Estabilidad del sistema de aislación</p> <p>La estabilidad de los elementos del sistema de aislación sujetos a cargas verticales se debe verificar por análisis y ensayos, según se requiera, para desplazamientos sísmicos laterales iguales al desplazamiento máximo total.</p>	<p>alto amortiguamiento (HDR), los aisladores elastoméricos con corazón de plomo (LRB), el aislador de péndulo friccional (FPS), y los deslizadoros teflón-acero (PTFE).</p> <p>C5.c.4 Cada proyecto tiene sus propios factores que motivan el uso de sistemas de aislación y posee diferentes objetivos de desempeño. El primer paso esencial en el desarrollo del proyecto es definir el criterio de diseño en base a los objetivos del propietario en lo que respecta a la funcionalidad de la estructura, daño y protección de la inversión, preservación histórica de la estructura, riesgo a las personas, y economía en la construcción. Para aquellos propietarios que desean una alta prioridad a la funcionalidad, protección de los contenidos, e inversión, requieren un criterio de diseño más estricto que aquellos que buscan un nivel de desempeño de protección a la vida únicamente. En cualquier caso, es el propietario el que debe estar consciente del nivel de riesgo que se desea asumir en el diseño.</p> <p>C.6 Criterio de selección</p> <p>C6.1 Bases de diseño</p> <p>Las guías de diseño propuestas incluyen aspectos generales del diseño de estructuras con aisladores sísmicos y son aplicables a una amplia gama de soluciones estructurales posibles para el sistema de aislación.</p> <p>C6.2 Estabilidad del sistema de aislación</p> <p>Debido a esta generalidad, esta norma descansa en la exigencia de que los sistemas de aislación sean ensayados para confirmar las propiedades utilizadas en el cálculo y diseño de la estructura aislada. En general los sistemas de aislación que se consideran adecuados deben:</p>

NCh2745	Comentarios
	<ul style="list-style-type: none"> a) Permanecer estables para el desplazamiento de diseño requerido. b) Proveer una resistencia que no decaiga con un aumento en el desplazamiento. c) No degradarse en rigidez y resistencia a carga cíclica. d) Poseer una relación constitutiva de deformación que esté bien definida y repetible.
6.3 Categorías de destino	C6.3 Categorías de destino
<p>El factor de importancia, I, para una edificación con aislación sísmica se debe considerar igual a 1,0 sin considerar la categoría de destino.</p>	<p>Dos razones justifican un valor único de coeficiente de importancia I en estructuras aisladas. Primero, se reconoce que existe una certeza en relación a estructuras convencionales sobre el verdadero nivel de demanda impuesta sobre la estructura. Segundo, como el objetivo de desempeño del diseño es siempre la funcionalidad luego del sismo, no tiene sentido diferenciar por concepto de uso de estructuras. No se eliminó la Tabla 1 para facilitar la eventual incorporación de valores diferentes a 1 para destinos o niveles de desempeño distintos a los contemplados actualmente en dicha tabla.</p>
NOTA - Ver Tabla 1.	
6.4 Requisitos de configuración	
<p>Cada estructura se debe clasificar como estructura regular o irregular en base a la configuración estructural del sistema de aislación, de acuerdo con Tablas C.3 y C.4 de 8.5.3.1.</p>	
6.5 Selección de procedimientos de respuesta lateral	
6.5.1 Generalidades	C6.5.1 Generalidades
Cualquier estructura con aislación sísmica se puede, y ciertas estructuras aisladas definidas más adelante se deben diseñar utilizando el procedimiento de respuesta lateral dinámico	C6.5.1.a General
	C6.5.1.a.1 El modelo estructural del sistema de aislación y de la sub y la superestructura

NCh2745	Comentarios
de cláusula 8.	cumple dos funciones primordiales:
	a) Cálculo de la respuesta y diseño de la sub y la superestructura para el terremoto de diseño.
	b) Cálculo de la demanda de desplazamientos y verificación de la estabilidad del sistema de aislación para el terremoto máximo posible.
	C6.5.1.a.2 Distintas metodologías de distintos grados de complejidad se pueden utilizar para modelar la respuesta de estructuras aisladas, desde modelos simplificados hasta modelos tridimensionales no-lineales del edificio completo. El nivel de sofisticación del modelo debe ser coherente con el grado de complejidad de la estructura. En general, superestructuras flexibles, irregulares en planta y altura requerirán de modelos más sofisticados.
	C6.5.1.b Modelo del sistema de aislación
	C6.5.1.b.1 El modelo estructural del sistema de aislación debe ser capaz de representar efectos de la respuesta tridimensional del sistema, como por ejemplo la torsión en planta, la correcta distribución de cargas verticales en los aisladores, interacción bidireccional, e interacción lateral-vertical (aislador de péndulo friccional). Además, el análisis del modelo estructural debe considerar la variabilidad de las propiedades de los aisladores; debe considerar la mayor rigidez del sistema de aislación en la determinación de las fuerzas de diseño de la superestructura y la menor rigidez posible en la determinación de la deformación del sistema de aislación.
	C6.5.1.b.2 Si el sistema de aislación permite el levantamiento de la estructura, el modelo debe ser capaz de representar este levantamiento y el impacto en el contacto entre estructura y dispositivo. El levantamiento es un fenómeno no-lineal y requiere modelación explícita (aunque ocurre en estructuras aisladas como no aisladas), por ejemplo, a través de un

elemento tipo *gap* que impone cero fuerza momento de levantamiento libre de estructura. La importancia de que el model aislador permita el levantamiento en cas ocurrir, es determinar en forma adecuac redistribución de esfuerzos y deformaciones ocurre en la estructura una vez que el ví del aislador desaparece.

C6.5.1.b.3 Otro aspecto importante e consideración del efecto $P-\Delta$ a través aislador. Este efecto crea un mom significativo sobre la estructura bajo y s el aislador. Dependiendo del sistema anclaje del dispositivo, este momento p variar entre P veces $\Delta/2$ y P veces Δ d P es la carga axial sobre el aislador y desplazamiento. Este momento es en ad al momento flector debido al corte a tr del aislador.

C6.5.1.b.4 Modelación de aisladores

C6.5.1.b.4.1 General

Uno de los objetivos primordiales del mc estructural debe ser acotar las pos variaciones observadas en las propied mecánicas de los aisladores como resu de variaciones de la carga vertical velocidad de carga, movimiento bidirecci temperatura, y envejecimiento del aislador.

C6.5.1.b.4.2 Modelos lineales

C6.5.1.b.4.2.1 Para los procedimie lineales establecidos por esta norm sistema de aislación se puede representar p modelo lineal equivalente. Las propiedade este modelo son la rigidez secante del aisl también confusamente denominada (equivalente, k_{ef} :

$$k_{ef} = \frac{|F^+| + |F^-|}{|\Delta^+| + |\Delta^-|}$$

y la razón de amortiguamiento lineal viscoso equivalente β_{ef} :

$$\beta_{ef} = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\sum E_{di}}{K_{ef} D^2} \right] \quad (C.2)$$

en que:

$\sum E_{di}$ = suma de las energías disipadas por todos los aisladores en un ciclo;

$K_{ef} = \sum k_{ef}$ = rigidez efectiva o secante de todos los aisladores del sistema de aislación.

Todas las cantidades se determinan en base a ciclos de amplitud D .

C6.5.1.b.4.2.2 Los modelos lineales equivalentes deben ser utilizados sólo en el diseño de aisladores elastoméricos, cuyas propiedades no son altamente dependientes de la carga axial. En el caso de aisladores friccionales, se recomienda adicionalmente verificar el diseño de estos dispositivos mediante un análisis no-lineal de respuesta en el tiempo.

C6.5.1.b.4.3 Modelos no-lineales

C6.5.1.b.4.3.1 Para evaluar la respuesta no-lineal de la estructura con aisladores sísmicos se requiere utilizar un modelo que sea representativo de la constitutiva no-lineal del dispositivo. De acuerdo con lo descrito anteriormente, este modelo es típicamente independiente de la velocidad de deformación en el caso de aisladores elastoméricos, pero dependiente de ella en el caso de aisladores friccionales.

C6.5.1.b.4.3.2 Debido a que la respuesta dinámica de la estructura completa queda controlada por el comportamiento del sistema de aislación, cuando se cumple con las

NCh2745	Comentarios
	<p>disposiciones de esta norma, es admisible el modelo utilizado durante el diseño sistema de aislación sea simple e ignore ejemplo, la flexibilidad de la superestructura. Esto permite ahorrar gran cantidad de tiempo en el cálculo de las respuestas y conduce lo general a resultados precisos. Sin embargo, una vez concluido el proceso de diseño, es recomendable verificar, con un modelo lineal de los aisladores y tridimensional de la superestructura, el comportamiento del sistema completo para un conjunto de sismos.</p> <p>C6.5.1.b.4.3.3 El hecho de que la no-linealidad del sistema se localice en el sistema de aislación conduce a que los análisis no-lineales desajustados sean de bajo costo computacional en relación a lo que sería un análisis no-lineal de una estructura convencional. Además, la interpretación de las respuestas medidas durante sismos en estructuras aisladas muestra que es posible predecir con gran nivel de precisión (error menor al 10%) el verdadero comportamiento no-lineal de estas estructuras (ver Anexo A, [4]).</p> <p>C6.5.1.c Modelo de la superestructura</p> <p>C6.5.1.c.1 En general, la superestructura debe modelarse con igual detalle que para un edificio convencional; sin embargo, es un hecho que la incertidumbre en la respuesta del modelo de la superestructura se reduce gracias al sistema de aislación. El nivel de detalle del modelo de la superestructura debe ser tal que permita evaluar correctamente la distribución de esfuerzos y deformaciones en sus elementos.</p> <p>C6.5.1.c.2 Es importante recordar que la superestructura será diseñada para permanecer elástica esencialmente y por lo tanto su rigidez y resistencia debe ser consistente con el comportamiento. De no ser así, se perderá el gran beneficio del sistema de aislación en cuanto al control del daño de la estructura y</p>

NCh2745	Comentarios
	<p>contenidos. Se define que la superestructura permanece esencialmente elástica durante el sismo si el requerimiento nominal de ductilidad sobre las componentes del sistema de resistencia lateral del edificio es pequeño ($R \approx 2$). Este requerimiento de ductilidad no impide que algún elemento entre en el rango inelástico; sin embargo, el sistema resistente lateral de la estructura como un todo no cambia su característica apreciablemente.</p> <p>C6.5.1.d Procedimiento de análisis</p> <p>C6.5.1.d.1 En esta norma es posible utilizar modelos lineales o no-lineales para el análisis de estructuras aisladas sísmicamente. El análisis estático con modelos lineales establece valores mínimos del desplazamiento de diseño para el sistema de aislación y se puede utilizar en una clase muy limitada de estructuras. Este procedimiento es recomendado para un diseño preliminar de la estructura y provee un mecanismo de verificación simple de modelos más sofisticados.</p> <p>C6.5.1.d.2 El análisis de respuesta espectral se recomienda para estructuras que tienen:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) una superestructura flexible; 2) una superestructura de planta irregular; y 3) aisladores con una relación constitutiva fuerza-deformación que puede ser adecuadamente representada por un modelo lineal equivalente. <p>La mayor ventaja de un análisis de respuesta espectral con superestructura flexible es que permite calcular en forma simple la distribución de fuerzas y deformaciones en los elementos.</p> <p>C6.5.1.d.3 Los procedimientos de análisis no-lineal incluyen en general Análisis Estático No-lineal (AENL), también conocido como <i>pushover</i>, y Análisis Dinámico No-lineal (ADNL) o de</p>

NCh2745	Comentarios
<p data-bbox="219 1220 421 1241">6.5.2 Análisis estático</p> <p data-bbox="219 1268 627 1334">El procedimiento de análisis estático lateral equivalente de cláusula 5 se puede utilizar para el diseño de una estructura con aislación</p>	<p data-bbox="645 255 1021 443">respuesta en el tiempo. El modelo no incluye a los aisladores y puede incluir o no la superestructura dependiendo de su importancia. Sin embargo, es relevante insistir en que el objetivo de la aislación sísmica es que la linealidad de la superestructura sea pequeña para el análisis no-lineal de respuesta en el tiempo. Debe utilizarse en los casos siguientes:</p> <ol data-bbox="645 470 1021 798" style="list-style-type: none"> 1. Sistemas con una razón de amortiguamiento modal mayor a un 30%. 2. Sistemas sin capacidad autocentrante. 3. Sistemas cuya deformación se exceda la distancia disponible de separación con estructuras adyacentes. 4. Sistemas que son dependientes de la velocidad de deformación. 5. Sistemas que experimentan levantamiento y/o impacto. <p data-bbox="645 821 1021 909">En el ADNL, la superestructura se puede modelar como lineal provisto que se demuestre que su respuesta se mantiene en el rango elástico durante el SMP.</p> <p data-bbox="645 933 1021 1197">C6.5.1.d.4 Aunque la mayoría de las estructuras con aislación sísmica se diseñan y analizan por modelos dinámicos lineales (o lineales del sistema de aislación), esta norma establece un requisito mínimo de demanda de deformación y fuerza que es un porcentaje de la demanda indicada por las fórmulas de análisis estático, incluso cuando se requiere análisis dinámico. Esta indicación provee un nivel mínimo de seguridad que protege contra un diseño excesivamente no conservador.</p> <p data-bbox="645 1220 862 1241">C6.5.2 Análisis estático</p>

NCh2745	Comentarios
<p data-bbox="1225 255 1422 276">sísmica, siempre que:</p> <ol data-bbox="1225 303 1644 1152" style="list-style-type: none"> 1. La estructura esté ubicada a más de 10 km de todas las fallas activas. 2. La estructura esté ubicada en un tipo de suelo I ó II. 3. La superestructura tenga menos de cinco pisos y una altura menor que 20 m. 4. El período efectivo de la estructura aislada, T_M, sea menor o igual a 3,0 s. 5. El período efectivo de la estructura aislada, T_D, sea mayor que tres veces el período elástico de base fija de la superestructura, y no menor que 2,0 s. 6. La superestructura tenga una configuración regular. 7. El sistema de aislación esté definido por todos los atributos siguientes: <ol data-bbox="1265 1021 1644 1152" style="list-style-type: none"> 7.1 La rigidez efectiva (secante) del sistema de aislación para el desplazamiento de diseño es mayor que un tercio de la rigidez efectiva (secante) a un 20% del desplazamiento de diseño. 	<p data-bbox="1650 303 2076 375">C6.5.2, 1 Las fallas activas consideradas son aquellas capaces de generar sismos que puedan controlar el diseño de la estructura.</p> <p data-bbox="1650 399 2076 446">C6.5.2, 2 En esta norma se ha adoptado la misma clasificación de suelos de NCh433.</p> <p data-bbox="1650 614 2076 718">C6.5.2, 5 La razón de esta cláusula es limitar el análisis estático a superestructuras rígidas, que son aquellas en que se logran las mayores reducciones de esfuerzos (ver Figura C.4).</p> <p data-bbox="1650 734 2076 829">El período elástico de base fija de la superestructura puede ser estimado a partir de expresiones empíricas o de métodos aproximados, como el Método de Rayleigh.</p> <p data-bbox="1650 869 1848 901">C6.5.2,6 Ver C8.5.3.</p> <p data-bbox="1650 1021 2076 1141">C6.5.2, 7.1 La razón de 7.1 es limitar el análisis estático lateral equivalente a sistemas de aislación con constitutivos que no presentan gran degradación de rigidez (ver Figura C.5).</p>

NCh2745

Comentarios

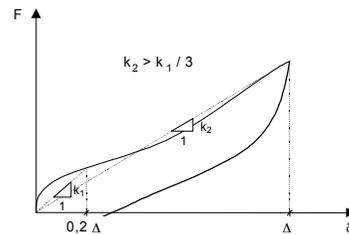


Figura C.5 - Requerimiento de rigidez para realizar análisis estático lateral equivalente

7.2 El sistema de aislación tiene la capacidad de producir una fuerza restitutiva, como se especifica en 10.2.4.

7.3 El sistema de aislación tiene propiedades de fuerza-deformación que son independientes de la velocidad de carga.

7.4 El sistema de aislación tiene propiedades de fuerza-deformación que son independientes de las cargas verticales y efectos de solicitaciones bidireccionales.

7.5 El sistema de aislación debe permitir alcanzar el desplazamiento sísmico máximo posible y no menos de 1,2 veces el desplazamiento total de diseño.

6.5.3 Análisis dinámico

El procedimiento de respuesta lateral dinámica de cláusula 8 se debe utilizar para el diseño de estructuras con aislación sísmica como se especifica a continuación:

1. Análisis espectral

El análisis de respuesta espectral se puede utilizar para el diseño de una

C6.5.2, 7.4 Se excluye por lo tanto del análisis estático a estructuras con sistemas friccionales de aislación las que se deben analizar mediante un análisis de historia de respuesta en el tiempo.

C6.5.3 Análisis dinámico

NCh2745

Comentarios

estructura con aislación sísmica, siempre que:

- La estructura esté ubicada en un tipo de suelo I, II, ó III.
- El sistema de aislación esté definido por todos los atributos especificados en 6.5.2, ítem 7.

2. Análisis de respuesta en el tiempo

El análisis de respuesta en el tiempo se puede utilizar para el diseño de cualquier estructura con aislación sísmica y se debe utilizar para el diseño de todas las estructuras con aislación sísmica que no cumplan con los criterios de b.5.3, ítem 1.

3. Espectro de diseño específico del lugar

Los espectros de movimiento del suelo específicos a un lugar y correspondiente al sismo de diseño y al sismo máximo posible se deben utilizar para el diseño y análisis de todas las estructuras aisladas, cuando:

- La estructura está ubicada en un tipo de suelo IV.
- La estructura está ubicada a menos de 10 km de una falla activa y capaz.

C6.5.3, 3 Debido a que suelos blandos tienden a producir espectros de respuesta con amplificaciones importantes en bandas angostas de frecuencia, es esencial poder caracterizar estas bandas para poder evitar que las frecuencias de diseño de la estructura aislada coincidan con las predominantes del suelo. Un ejemplo característico es el contrasentido que sería fundar un edificio aislado de período cercano a 2 s en las blandas arcillas expansivas de Ciudad de México caracterizadas por períodos predominantes de 2 s.

C6.5.3, 3b Se define a una falla como activa si hay evidencia de a lo menos un desplazamiento en los últimos 10 000 años. (Período Holoceno). Se define además una falla activa como sísmicamente capaz si los desplazamientos de la falla van asociados a la ocurrencia de sismos.

NCh2745

Comentarios

7 Procedimiento de análisis estático

C7 Procedimiento de análisis estático

7.1 Generalidades

A excepción de lo indicado en cláusula 8, toda estructura aislada sísmicamente o parte de ella, se debe diseñar y construir para resistir como mínimo las fuerzas y desplazamientos especificados en esta cláusula. Las disposiciones de NCh433 también son obligatorias, en lo que no contradigan las disposiciones de la presente norma.

C7.1 Generalidades

El objetivo de las fórmulas entregadas en esta norma es acotar los valores de propiedades del sistema de aislación de modo que el diseño resultante sea conservador bajo las fuentes potenciales de variabilidad que afectan a las propiedades del sistema de aislación. Además, las fórmulas reconocen que la rigidez y el amortiguamiento efectivos dependen del nivel de deformación y deben ser evaluados para los niveles sísmicos de diseño y máximo posible. La presente norma no considera el efecto de diferencias que puedan ocurrir entre las propiedades de diseño y las reales (*as-built*) derivando la responsabilidad del control de calidad de la estructura y los aisladores al ingeniero calculista.

7.2 Característica fuerza-deformación del sistema de aislación

Los desplazamientos y fuerzas laterales mínimas de diseño provocados por sismos en estructuras aisladas sísmicamente se deben basar en las características de fuerza-deformación del sistema de aislación.

C7.2 Característica fuerza-deformación del sistema de aislación

C7.2.a Aisladores elastoméricos

C7.2.a.1 Los aisladores elastoméricos son uno de los dispositivos más utilizados actualmente en el diseño de estructuras aisladas. El aislador elastomérico consiste en un conjunto de capas delgadas de caucho natural adheridas a planchas delgadas de acero formando un *sandwich* de goma y acero. Durante su construcción, las láminas de acero y goma se intercalan horizontalmente dentro de un molde de aluminio que da la forma geométrica al aislador. Después de colocadas estas láminas en el molde, se coloca el aislador bajo una prensa y se aplica presión y temperatura de 140°C por un tiempo cercano a las 6 h en el caso de aisladores circulares de diámetro igual o mayor que 60 cm. Durante este proceso la goma se vulcaniza y adquiere su propiedad elástica. Además, el calor aplicado produce la reacción del pegamento epóxico con que se cubren las láminas de goma y acero, por lo que la adherencia debe ser más resistente que

Dichas características de fuerza-deformación deben incluir explícitamente los efectos que provoca el sistema para restringir los efectos del viento, si tal sistema se usa para cumplir con los requisitos de diseño de esta norma.

Las características de fuerza-deformación del sistema de aislación se deben basar en ensayos debidamente fundamentados y realizados de acuerdo con lo estipulado en la cláusula 14.

La rigidez vertical mínima del sistema de aislación debe ser tal que la frecuencia de vibración propia de la estructura aislada en sentido vertical, suponiendo una superestructura rígida, debe ser mayor que 10 Hz.

NCh2745

Comentarios

la goma misma y la falla por cizalle de un aislador debe ocurrir por ruptura de la goma antes que por una falla del pegamento goma-acero.

C7.2.a.2 Las gomas de bajo amortiguamiento (LDR) exhiben en general un comportamiento prácticamente lineal-elástico a bajas deformaciones y lineal-viscoso a grandes deformaciones. La razón de amortiguamiento efectivo es típicamente menor a 0,07 para deformaciones angulares γ que varían entre 0 y 2. Una relación fuerza-deformación característica de un LDR se muestra en Figura C.6. El diseño de estos aisladores se realiza de acuerdo con las ecuaciones C.7 a C.11 que se presentan en C7.2.c.

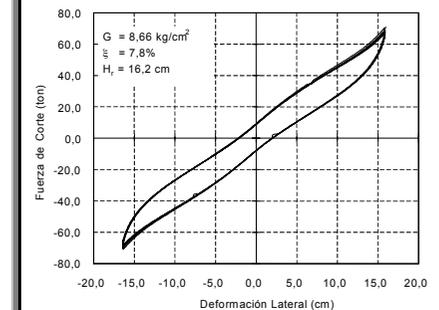


Figura C.6 - Ciclo fuerza-deformación de una pareja de aisladores de bajo amortiguamiento LDR

C7.2.b Aisladores con corazón de plomo

C7.2.b.1 Los aisladores con corazón de plomo (LRB) se construyen en general de goma de bajo amortiguamiento y se les deja un orificio central cilíndrico en el que se introduce el corazón de plomo bajo presión. Bajo deformación lateral, el plomo se deforma en un estado de corte puro y fluye a una tensión cercana a los 10 MPa a temperatura ambiente, produciendo numerosos ciclos histeréticos estables. Debido a que el plomo recristaliza a temperatura ambiente (20°C

aproximadamente), su fluencia repetida produce falla por fatiga. Una de las ventajas de los aisladores con corazón de plomo es que producen en forma natural un nivel de rigidez inicial importante para cargas de ser. Un ciclo típico de fuerza-deformación de un aislador con corazón de plomo se muestra en la Figura C.7.

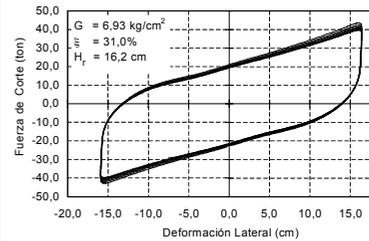


Figura C.7 - Ciclo fuerza-deformación de una pareja de aisladores con corazón de plomo LRB

C7.2.b.2 La capacidad del aislador a deformación, Q , se puede aproximar por:

$$Q = A_p \tau_y$$

en que:

A_p = área de plomo; y

τ_y = tensión de fluencia.

Por otra parte, la rigidez post-fluencia del aislador k_p es en general mayor que la rigidez de la goma del aislador sin el corazón de plomo. De esta forma:

$$k_p = f_L \frac{GA_r}{H_r}$$

en que:

G = módulo de corte de la goma calculado típicamente a $\gamma = 0,5$;

A_r = área de la goma adherida al acero;

H_r = altura total de goma en el aislador; y

f_L = aproximadamente 1,15.

Como regla práctica, la rigidez inicial del aislador es entre 6,5 y 10 veces su rigidez de post-fluencia.

C7.2.b.3 El ciclo fuerza-deformación de un aislador LRB se puede representar por un comportamiento bilineal como se indica en la Figura C.8. El modelo requiere la definición de tres parámetros: la fuerza de fluencia F_y , la rigidez post-fluencia k_p , y el desplazamiento de fluencia D_y . Conocido el desplazamiento de fluencia, la fuerza de fluencia es:

$$F_y = Q + k_p D_y \tag{C.6}$$

en que:

$$D_y = Q / K = \text{con } K = (5,5 \text{ a } 9) k_p$$

El modelo bilineal para la pareja de aisladores LRB de la Figura C.7 se muestra en la Figura C.8.

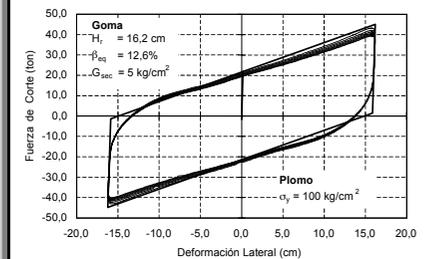


Figura C.8 - Ajuste de un modelo bilineal al ciclo fuerza-deformación de una pareja de aisladores LRB

C7.2.c Aisladores de alto amortiguamiento

C7.2.c.1 Los aisladores sísmicos de amortiguamiento están hechos de compuesto especial de goma que pueden alcanzar típicamente valores para la razón de amortiguamiento entre 0,10 y 0,20 para deformaciones angulares menores a γ ; aproximadamente. Es importante recalcar la inclusión de nuevos aditivos químicos en la fórmula de la goma de alto amortiguamiento afecta también a otras propiedades mecánicas de ella como la elongación de ruptura. Un típico de un aislador de alto amortiguamiento se muestra en Figura C.9.

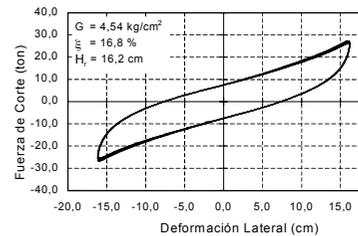


Figura C.9 - Curva fuerza-deformación de un par de aisladores de alto amortiguamiento HDR

C7.2.c.2 Como ocurre con la mayoría de dispositivos de goma, los aisladores elastoméricos requieren de un proceso de estabilización mecánica del ciclo de deformación conocido como *scrag*. Durante el *scragging* el aislador se somete a varios ciclos de deformación lo que modifica la estructura molecular del compuesto de goma produciendo ciclos de fuerza-deformación estables para deformaciones menores a la que se somete durante el *scragging*. Estos recientes muestran que las propiedades iniciales del compuesto sin *scragging* se recuperan parcialmente con el tiempo y la recuperación depende del compuesto utilizado.

C7.2.c.3 Típicamente, en el análisis

estructuras aisladas con aisladores HDR, la constitutiva fuerza-deformación se modela como un sistema bilineal cuyas propiedades dependen de la razón de amortiguamiento efectivo β_{ef} y el módulo de corte tangente G , para un determinado nivel de deformación angular γ . La rigidez postfluencia k_p se puede calcular como (ver Anexo A, [5] y [14]):

$$k_p = \frac{GA}{H_r} \quad (C.7)$$

en que:

H_r = representa la altura total de goma del aislador. Por otra parte, la resistencia característica Q para deformación nula se puede expresar como:

$$Q = \frac{\pi \beta_{ef} k_p D^2}{(2 - \pi \beta_{ef}) D - 2 D_y} \quad (C.8)$$

en que:

D_y = desplazamiento de fluencia, el que se puede aproximar por un valor que varía entre $0,05 H_r$ y $0,1 H_r$.

Por último, la fuerza de fluencia del aislador se puede estimar como $F_y = Q + k_p D_y$.

Alternativamente estas expresiones se pueden escribir en términos de la rigidez efectiva (secante) como:

$$Q = \frac{\pi \beta_{ef} k_{ef} D^2}{2(D - D_y)} \quad (C.9)$$

en que:

k_{ef} = se determina de acuerdo con la curva de ensayo y el procedimiento descrito posteriormente; el módulo efectivo (secante) de la goma resulta:

$$G_{ef} = \frac{k_{ef} H_r}{A} \quad (C)$$

C7.2.c.4 La modelación bilineal de constitutiva fuerza-deformación para aislador de diámetro $\phi = 60$ cm, $A = \pi \cdot 60^2 / 4 = 2827$ cm², $G_{ef} = 6$ kg/cm $H_r = 16$ cm, se muestra en Figura C.10.

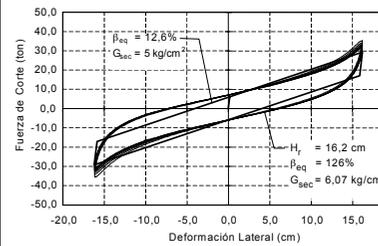


Figura C.10 - Definición de modelo bilineal de una γ de aisladores de alto amortiguamiento HDR

C7.2.c.5 En Figura C.10 el valor del parán U corresponde a la razón entre la fuerza deformación nula y la fuerza para deform: máxima en un ciclo determinado. parámetro se puede usar alternativamente deformación de fluencia D_y en la defin del ciclo histerético del modelo bilineal.

C7.2.c.6 Otro modelo más preciso qu anterior, utilizado para gomas de amortiguamiento, es la constitutiva de E Wen (SAP 2000) que en el unidimensional se puede escribir como:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= \gamma |\dot{x}| z |z|^{n-1} - \nu \dot{x} |z|^n + A \dot{x} \\ f &= \alpha K_d \dot{x} + (1 - \alpha) z \end{aligned} \quad (C)$$

en que:

z = representa la componente

lineal de la fuerza;

γ, n, ν y A = parámetros del estado z del elemento que controlan la forma del ciclo;

α = parámetro que regula la importancia relativa entre la parte lineal (k_d) y no-lineal (z) de la constitutiva.

C7.2.d Rigidez vertical de los aisladores

C7.2.d.1 La rigidez vertical de un aislador se escoge típicamente para producir una frecuencia vertical de vibración del sistema superior a 10 Hz. La rigidez vertical de un aislador se define como:

$$k_z = \frac{E_c A}{H_r} \quad (C.12)$$

en que:

E_c = representa el módulo de compresión para el conjunto goma-acero. En el caso de un aislador circular, el módulo de compresión E_c resulta (ver Anexo A, [13]):

$$\frac{1}{E_c} = \left(\frac{1}{6G_{ef} S^2} + \frac{4}{3K} \right) \quad (C.13)$$

en que:

K = módulo de compresibilidad de la goma (que típicamente adopta un valor de 2 000 MPa); y

S = primer factor de forma del aislador, que en el caso de un aislador circular es $S = \phi / 4t$, en que t es el espesor de las láminas de goma.

En base a estos resultados se demuestra q razón entre la frecuencia vertical y lateral estructura aislada es aproximadamente igual

$$\frac{f_v}{f_h} = \sqrt{\frac{E_c}{G}} = \sqrt{\left(\frac{1}{6G_{ef}S^2} + \frac{4}{3K}\right)^{-1}} \quad (C)$$

es decir, $f_v = 35,4 f_h$ para un aislador $S = 25$, $G_{ef} = 0,8$ Mpa, y $K = 2\ 000$ MP el período fundamental del sistema aislad de 2,5 s, la frecuencia vertical de vibració $f_v = 14$ Hz, aproximadamente, superand límite de 10 Hz. Es posible demostrar q rigidez vertical de un aislador es similar rigidez vertical de una columna de horn armado de un piso tipo y sección idéntica del aislador.

C7.2.d.2 Eventualmente, el sistema p experimentar una amplificación de la aceler vertical del suelo debido a su flexibilidad ve modificando la carga axial sobre los aislador que se debería considerar.

C7.2.d.3 Por último, la deformabilidad axiz aislador, aunque pequeña, se debe consider adición al descenso que experimenta el ais como resultado de su deformación lateral. tal efecto la estructura debe considerar separación vertical mínima entre los elemi de la superestructura y subestructura. Figura C.11 muestra el descenso experimer por una aislador de diámetro 60 cm resultado de la deformación lateral γ .

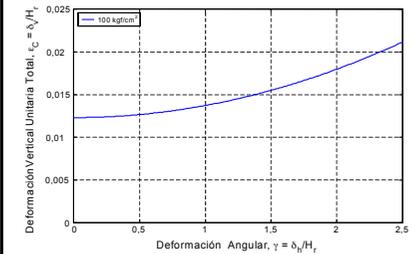


Figura C.11 - Descenso del aislador como resultado de la deformación lateral γ

C7.2.e Deslizadores y aisladores friccionales

C7.2.e.1 El aislador friccional limita nominalmente la carga que se desarrolla en la interfaz de aislación a un cierto nivel predeterminado por el diseñador. Esta carga depende del coeficiente de fricción μ entre las superficies deslizantes y de la carga normal N aplicada sobre ella. Entre las ventajas más importantes de estos dispositivos está la separación entre el sistema de transmisión de carga vertical y el mecanismo de aislación. Sin embargo, el sistema friccional *per se* carece de un mecanismo de restitución que permita el centrado de la estructura como consecuencia del movimiento del suelo. Debido a esto, los aisladores friccionales son utilizados generalmente en combinación (paralelo) con un esquema que proporcione fuerzas restitutivas.

C7.2.e.2 La fuerza lateral que desarrolla un aislador friccional se expresa como:

$$F = \frac{N}{R} u + \mu_d N \operatorname{sgn}(\dot{u}) \quad (C.15)$$

en que:

N = representa la carga normal sobre la superficie de aislación;

R = radio de curvatura de la superficie

sobre la que ocurre el deslizamiento y

u y \dot{u} = corresponden al desplazamiento y velocidad del dispositivo;

μ_d = coeficiente de fricción dinámica

Como es habitual la fuerza friccional se invierte de dirección al invertir el sentido de la velocidad

C7.2.e.3 Dos esquemas de aislamiento friccional muestran en Figura C.12. La Figura C.12(a) muestra esquemáticamente un deslizamiento friccional sobre un plano horizontal. La Figura C.12(b) muestra un deslizador sobre una superficie esférica (por ejemplo, pértiga friccional). Acompañan a estos mecanismos friccional las constitutivas esquemáticas fuerza-deformación de cada uno de ellos.

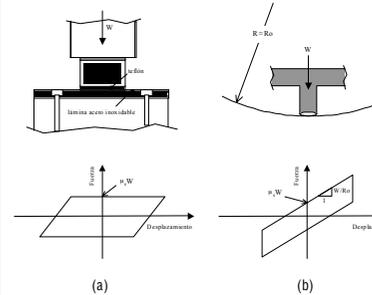


Figura C.12 - Mecanismos típicos de aislamiento friccional y relaciones constitutivas fuerza-deformación

C7.2.e.4 Para el caso del deslizador horizontal el radio de curvatura R es infinito y por lo tanto existe una componente restitutiva que cede el dispositivo. Para una superficie de deslizamiento esférica (ver Anexo A, [27]), el radio de curvatura es constante $R = R_0$ y la componente restitutiva del dispositivo es lineal en el desplazamiento u como indica la ecuación C

C7.2.e.5 Para el caso de deformaciones pequeñas, la fuerza normal en el dispositivo se puede obtener de la expresión siguiente:

$$N = W \left(1 + \frac{\ddot{u}_z}{g} + \frac{N_{vol}}{W} \right) \quad (C.16)$$

en que:

W = corresponde a la carga gravitacional;

\ddot{u}_z = corresponde a la aceleración vertical del suelo; y

N_{vol} = corresponde a la carga normal debida al momento volcante de la estructura.

Si las deformaciones son grandes (por ejemplo, sismos impulsivos de California), la carga normal del deslizador sobre la superficie esférica se debe evaluar correctamente a través de considerar la restricción cinemática que impone esta superficie en las ecuaciones de movimiento de la estructura (ver Anexo A, [1]).

C7.2.e.6 En la fabricación de los aisladores friccionales se utiliza preferentemente Teflón^{®1)} [politetrafluoroetileno (PTFE)] reforzado en contacto con una lámina de acero inoxidable pulida al nivel de espejo. Las presiones de contacto admisibles entre el Teflón[®] y el acero utilizadas en el diseño en general no exceden de 40 MPa. Por otra parte, el coeficiente de fricción varía generalmente entre 0,05 y 0,12 dependiendo de la velocidad de deformación y la presión de contacto.

1) Teflón es el nombre comercial de un producto. Esta información se entrega para la conveniencia de los usuarios de esta norma y no constituye un respaldo del INN al producto mencionado. Se pueden usar productos equivalentes, si se demuestra mediante validación, que con ellos se obtienen los mismos resultados.

C7.2.e.7 Para una interfaz de teflón y acero el coeficiente de fricción dinámico se puede escribir como (ver Anexo A, [26]):

$$\mu_d = \mu_{\text{máx.}} - (\mu_{\text{máx.}} - \mu_{\text{mín.}}) \exp(-a|\dot{u}|) \quad (C)$$

en que:

$\mu_{\text{mín.}}$ y $\mu_{\text{máx.}}$ = representan el coeficiente de fricción a pequeñas y grandes velocidades, respectivamente (ver Figura C.13). Finalmente la Figura C.14 muestra los resultados experimentales de la variación de los coeficientes $\mu_{\text{mín.}}$, $\mu_{\text{máx.}}$ y μ_s con la presión de contacto para distintas velocidades de deslizamiento.

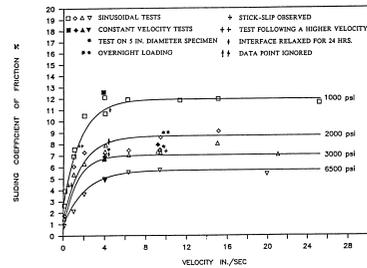


Figura C.13 - Variación del coeficiente de fricción dinámico μ_d con la velocidad y presión de contacto (ver Anexo A, [26])

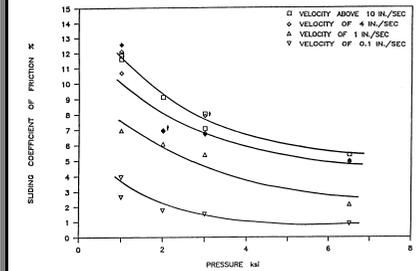


Figura C.14 - Variación observada de los coeficientes de roce $\mu_{\text{mín.}}$, $\mu_{\text{máx.}}$ y μ_s , como función de la presión de contacto (ver Anexo A, [26])

C7.2.f Sistemas híbridos de aislación

Los sistemas de aislación elastoméricos y friccionales se pueden utilizar en combinación con sistemas de disipación de energía. Un ejemplo, es la combinación entre aislación elastomérica y disipación viscosa utilizada recientemente en importantes proyectos como es el refuerzo estructural del edificio de la Municipalidad de la ciudad de Los Angeles en EE.UU. El propósito de esta combinación entre aislador de goma y disipador viscoso es utilizar la acción centrante del aislador elastomérico en conjunto con la gran capacidad disipativa del amortiguador viscoso. Otro sistema híbrido que se ha utilizado con éxito en Japón es el de aisladores elastoméricos y disipadores metálicos helicoidales.

7.3 Desplazamientos laterales mínimos

C7.3 Desplazamientos laterales mínimos

7.3.1 Desplazamientos de diseño

C7.3.1 Desplazamientos de diseño

El sistema de aislación se debe diseñar y construir para soportar, como mínimo, desplazamientos sísmicos laterales que actúen en la dirección de los dos ejes principales de la estructura según la ecuación:

El desplazamiento entregado por la ecuación (1) se supone que ocurre en el centro de masa (CM) del sistema estructural. El coeficiente de reducción por amortiguamiento utilizado B_D se ha determinado a partir de las razones entre los valores espectrales calculados para los registros

compatibles chilenos que se describen en C1 y distintos niveles de la razón amortiguamiento (ver Anexo A, [7]).

La ecuación (1), que asume que superestructura es rígida, provee una estim. conservadora del desplazamiento del sistema aislación, debido a que la flexibilidad de deformación de la superestructura tiende a hacer decrecer el desplazamiento del sistema aislación.

$$D_D = \frac{C_D}{B_D} \quad (1)$$

en que:

200 Z [mm], para Suelo I y $T_D > 2 s$;

300 Z [mm], para Suelo II y $T_D > 2 s$;

330 Z [mm], para Suelo III y $T_D > 2 s$;

B_D = se obtiene de Tabla 2 o de la ecuación (C.18).

Debido a que las estructuras aisladas encuentran en general en la zona de amplificación de desplazamiento, se define un valor constante para el coeficiente sísmico de desplazamiento C_D .

La Tabla 2 presenta el factor de reducción que fue obtenido de 9 registros compatibles con el SDI para los tres tipos de suelo. Este último factor reconoce dependencia con el período de vibración, calidad del suelo de fundación y aunque la obtención es un poco más laboriosa, conduce en general a valores mayores que el factor de modificación indicado por el UBC (ver Anexo [12]).

El coeficiente de modificación de respuesta propuesto es:

$$B_D(\beta_D, T_D) = \frac{1}{B_o - [B_o - 1] \exp[-a|\beta_D - 0,05|T_D]} \quad (C)$$

Para $\beta = 0,05$ se debe usar: $B_o = 1$; $a = 400, 300$ y 200 para suelos tipos I, II, III respectivamente.

Para razones de amortiguamiento β mayores que 0,05 se debe usar:

$$B_o = 2 \left(\frac{1 + \beta}{1 + 14,68 \beta^{0,865}} \right) \quad (C)$$

para los tres tipos de suelo (I, II, y III). Similarmente, el parámetro "a" se obtiene de la tabla siguiente:

Tabla C.1 - Valor del coeficiente "a"

β	Suelo I	Suelo II	Suelo III
0,10	396,9	293,1	224,5
0,15	180,7	124,6	98,0
0,20	117,9	76,1	57,1
0,25	94,0	54,3	39,6
0,30	68,5	42,0	30,4
0,50	36,9	22,2	16,1

La buena correlación entre el estimador indicado por las ecuaciones C.18 y C.19 y el valor de B_D obtenido a partir de los espectros de respuesta correspondientes a los 3 registros compatibles (6 historias) utilizados y los distintos amortiguamientos se muestra en Figura C.15.

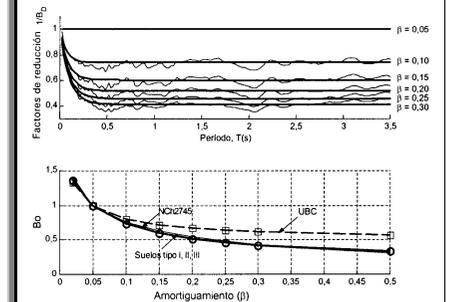


Figura C.15 - Factor de modificación de respuesta para suelo tipo II obtenido a partir de registros compatibles

Alternativamente, el factor de reducción de respuesta por amortiguamiento B_D se puede obtener en forma conservadora a partir de Tabla C.2 que es idéntica a la presentada en el código UBC (ver Anexo A, [12] y [17]).

Tabla C.2 - Factores de modificación de respuesta por amortiguamiento, B_D y B_M (UBC)

Amortiguamiento efectivo, β_D ó β_M (porcentaje del valor crítico) ^{1) 2)}	Factor B_D y B_M
≤ 2	0,8
5	1,0
10	1,2
20	1,5
30	1,7
40	1,9
≥ 50	2,0

1) El factor de modificación de respuesta por amortiguamiento se debe basar en el amortiguamiento efectivo del sistema de aislación determinado de acuerdo con los requisitos de 14.5.

2) El factor de modificación de respuesta por amortiguamiento se debe basar en la interpolación lineal para valores de amortiguamiento efectivo diferentes a los que aparecen en Tabla C.2.

7.3.2 Período efectivo correspondiente al desplazamiento de diseño

El período efectivo de la estructura aislada correspondiente al desplazamiento de diseño, T_D , se debe determinar usando las características de fuerza-deformación del sistema de aislación de acuerdo con la fórmula:

$$T_D = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{D\min} g}} \quad (2)$$

C7.3.2 Período efectivo correspondiente al desplazamiento de diseño

La ecuación (2) indica una estimación del período fundamental correspondiente al desplazamiento de diseño. Esta ecuación se basa en la rigidez secante del sistema de aislación correspondiente al desplazamiento de diseño D_D . Esta estimación se conserva conservadoramente en el menor valor de rigidez efectiva, entregando el máximo valor del período efectivo.

7.3.3 Desplazamiento máximo

El desplazamiento máximo del sistema de aislación, D_M , en la dirección horizontal más crítica se debe calcular de acuerdo con la fórmula:

$$D_M = \frac{C_M}{B_M} \quad (3)$$

en que:

$$200 M_M Z \text{ [mm]}, \text{ para Suelo I y } T_M > 2 \text{ s};$$

$$C_M = 300 M_M Z \text{ [mm]}, \text{ para Suelo II y } T_M > 2 \text{ s};$$

$$330 M_M Z \text{ [mm]}, \text{ para Suelo III y } T_M > 2 \text{ s};$$

M_M se obtiene de Tabla 3.

7.3.4 Período efectivo correspondiente al desplazamiento máximo

El período efectivo de la estructura aislada correspondiente al desplazamiento máximo, T_M , se debe determinar utilizando las características de fuerza-deformación del sistema de aislación de acuerdo con la ecuación:

$$T_M = 2\pi \sqrt{\frac{W}{k_{M\min} g}} \quad (4)$$

C7.3.3 Desplazamiento máximo

El desplazamiento proporcionado por la ecuación (3) se supone que ocurre en el centro de masa (CM) del sistema estructural. A igual que en C7.3.1, el coeficiente de amortiguamiento B_M utilizado se ha obtenido de las razones espectrales para registros chilenos compatibles con los espectros de diseño descritos en C8.4.1.

La ecuación (3), que asume que la superestructura es rígida, provee una estimación conservadora del desplazamiento del sistema de aislación, debido a que la flexibilidad y deformación de la superestructura tienden a hacer decrecer el desplazamiento del sistema de aislación.

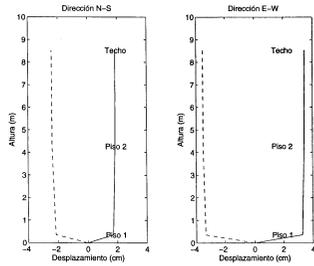
C7.3.4 Período efectivo correspondiente al desplazamiento máximo

La ecuación (4) indica una estimación del período fundamental correspondiente al desplazamiento máximo. Esta ecuación se basa en la rigidez secante del sistema de aislación correspondiente al desplazamiento máximo D_M . Esta estimación se conserva conservadoramente en el menor valor de la rigidez efectiva, entregando el máximo valor del período efectivo.

NCh2745	Comentarios
<p>7.3.5 Desplazamiento total</p>	<p>C7.3.5 Desplazamiento total</p>
<p>7.3.5.1 El desplazamiento de diseño total, D_{TD}, y el desplazamiento máximo total, D_{TM}, de los elementos del sistema de aislación debe incluir desplazamientos adicionales debido a la torsión natural y accidental calculada considerando la distribución espacial de la rigidez lateral del sistema de aislación y la ubicación menos favorable de la excentricidad de la masa.</p>	
<p>7.3.5.2 El desplazamiento total de diseño, D_{TD}, y el desplazamiento total máximo, D_{TM}, de los elementos de un sistema de aislación con distribución espacial uniforme de rigidez lateral no se debe considerar menor que lo indicado por las ecuaciones siguientes:</p>	
$D_{TD} = D_D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (5)$	<p>Las ecuaciones (5) y (6) proveen una forma simple de estimar el desplazamiento en cualquier punto de la planta a lo largo del eje perpendicular a la dirección considerada para el sismo. Estas ecuaciones poseen y aproximaciones que es importante identificar:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Estas ecuaciones están derivadas a partir de un análisis estático de la torsión de la planta y resultan ser una aproximación (sólo regular) de las amplificaciones dinámicas (ver Anexo A, [2]). 2. En la derivación de estas ecuaciones se asume que la razón Ω entre las frecuencias desacopladas torsional y lateral de la estructura es 1; Ω es en general cercano a uno para una estructura aislada siempre que exista una distribución uniforme de aisladores con iguales propiedades. 3. Esta ecuación asume implícitamente que la máxima deformación en un punto de la planta ocurre cuando es máxima
$D_{TM} = D_M \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (6)$	

NCh2745	Comentarios
	<p>traslación y la rotación de la planta simultáneamente, simultaneidad que es sabido no ocurre en la respuesta dinámica del sistema (ver Anexo A, [2]).</p> <p>En cualquier caso, las ecuaciones (5) y (6) tienden a sobrestimar la deformación real de la planta si Ω es menor a 1 y a subestimarla en caso contrario.</p> <p>Finalmente, es importante reconocer que la derivación de estas ecuaciones se basa en que existe una excentricidad de masa en la planta y que la coordenada y se mide con respecto al centro de rigidez de la planta; la excentricidad e en estas ecuaciones incluye la excentricidad estática (torsión natural) y la excentricidad accidental (torsión accidental).</p>
<p>7.3.5.3 El desplazamiento total de diseño, D_{TD}, y el desplazamiento total máximo, D_{TM}, se pueden tomar menores que lo indicado en las ecuaciones (5) y (6), pero no menores que 1,1 veces D_D ni 1,1 veces D_M, respectivamente, siempre que se demuestre mediante cálculos que el sistema de aislación está debidamente configurado para resistir la torsión.</p>	<p>C7.3.5.3 Se puede interpretar que el sistema se considera debidamente configurado para resistir torsión en la medida que los aisladores más rígidos se encuentren a lo largo del perímetro de la estructura conduciendo a estructuras con una razón de frecuencias desacopladas mayor a 1.</p>
<p>7.4 Fuerzas laterales mínimas</p>	<p>C7.4 Fuerzas laterales mínimas</p>
<p>7.4.1 Sistemas de aislación y elementos estructurales en el nivel o bajo el sistema de aislación</p>	<p>C7.4.1 Sistema de aislación y elementos estructurales en el nivel o bajo el sistema de aislación</p>
<p>El sistema de aislación, la fundación y todos los elementos estructurales bajo el sistema de aislación se deben diseñar y construir para resistir una fuerza sísmica lateral mínima, V_b, usando todos los requisitos de capacidad, deformación y resistencia apropiados para estructuras no aisladas, en que:</p>	<p>A diferencia de las estructuras convencionales en que los esfuerzos utilizados para el diseño de las fundaciones son también reducidos por el factor de reducción R, en el caso de estructuras aisladas no se permite tal reducción debido a lo importante que es garantizar la estabilidad de la subestructura para un desempeño adecuado del sistema de aislación.</p>
$V_b = k_{D_{\text{máx}}} \cdot D_D \quad (7)$	

NCh2745	Comentarios
<p>7.4.2 Elementos estructurales sobre el sistema de aislación</p> <p>La estructura sobre el sistema de aislación se debe diseñar y construir para resistir como mínimo una fuerza de corte, V_s, usando todos los requisitos de capacidad, deformación y resistencia apropiados para estructuras no aisladas en que:</p> $V_s = \frac{k_{D\max} D_D}{R_l} \quad (8)$ <p>El factor R_l, según Tabla 4, se debe basar en el tipo de sistema resistente para carga lateral usado en la superestructura.</p> <p>7.4.3 Límites para V_s</p> <p>El valor de V_s no debe ser menor que lo siguiente:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. La fuerza lateral sísmica requerida por NCh433, para una estructura de base fija del mismo peso, W, y un período igual al de la estructura aislada, T_D. 2. El esfuerzo de corte basal correspondiente a la carga de diseño de viento. 	<p>C7.4.2 Elementos estructurales sobre sistema de aislación</p> <p>El factor de reducción de respuesta utilizado para estructuras con aislación sísmica no supera el valor 2, para asegurar que estructura permanezca elástica durante sismo de diseño. Factores mayores de reducción no son deseables en este caso debido a que el movimiento de la estructura está controlado por pulsos de duración 2 s y 3 s, los que de ocurrir, podrían ocasionar grandes deformaciones inelásticas en la superestructura.</p> <p>C7.4.3 Límites para V_s</p> <p>C7.4.3, 1 Se garantiza entonces que una estructura aislada no se puede diseñar con un corte menor al de una estructura de base fija con el mismo período. Esto incluye el mínimo definido por NCh433 en 6.2.3.1.1. Aunque en principio, el mínimo es una restricción innecesaria para un sistema de aislación, la verdad es que el de diseño V_b [ecuación (7)], en un edificio aislado superará típicamente el corte mínimo.</p>

NCh2745	Comentarios
<p>3. La fuerza lateral sísmica requerida para activar completamente el sistema de aislación mayorada por 1,5 (es decir, una vez y media el nivel de fluencia del sistema, la capacidad última de un sistema de sacrificio ante cargas de viento o el nivel de fricción estática de un sistema deslizante).</p> <p>7.5 Distribución de fuerzas en vertical</p> <p>7.5.1 Las fuerzas horizontales se deben obtener distribuyendo uniformemente en la altura el esfuerzo de corte basal sobre la interfaz de la aislación.</p>	<p>C7.4.3, 3 En el caso de un sistema de aislación con corazón de plomo, el corte mínimo resulta igual a 1,5 veces la suma de las capacidades de los corazones de plomo.</p> <p>7.5 Distribución de fuerzas en vertical</p> <p>Se debe notar que para deformaciones menores que las necesarias para la activación del sistema de aislación, la deformada de una estructura aislada es similar a la de una estructura convencional. Sin embargo, si la superestructura es suficientemente rígida, una vez activado el sistema de aislación, aún bajo deformaciones pequeñas de dicho sistema como las indicadas en Figura C.16, la distribución de fuerzas laterales equivalentes quedará controlada por las primeras formas modales del sistema aislado. Debido a que las deformaciones del sistema se concentran en la interfaz de aislación, estos modos aislados conducen a una distribución prácticamente uniforme de fuerzas laterales equivalentes.</p>  <p>Figura C.16 - Deformada instantánea del edificio aislado FCC (Fire Command & Control Building) durante el sismo de Northridge, 1994</p>

NCh2745	Comentarios	NCh2745	Comentarios
<p>7.5.2 En cada nivel designado con x, la fuerza F_x se debe aplicar sobre el centro de masa (CM) de ese nivel. Los esfuerzos en cada elemento estructural se deben calcular como el efecto de las fuerzas F_x, aplicadas en el nivel correspondiente.</p> <p>7.6 Límite de desplazamiento de entrepiso</p> <p>Para los pisos de la superestructura, el desplazamiento relativo máximo entre dos pisos consecutivos, medido en el centro de masas en cada una de las direcciones de análisis, no debe ser mayor que la altura de entrepiso multiplicada por 0,002.</p>	<p>C7.6 Análisis estático no-lineal</p> <p>Aunque no se incluye en esta norma, posible realizar análisis estático no-linea una estructura aislada. El análisis estático lineal debe ser de tipo <i>pushover</i>, y c considerar como desplazamiento objetivo proporcionado por las ecuaciones (1) y (3) el CM del nivel por sobre la aislación.</p>	<p>sistema de aislación no se debe considerar menor que el 90% de D_{TD}, según se especifica en 7.3.3.</p> <p>8.2.2 El desplazamiento total máximo del sistema de aislación no se debe considerar menor que el 80% de D_{TM} calculado con la ecuación (6).</p> <p>8.2.3 La fuerza de corte de diseño en el sistema de aislación y en los elementos estructurales bajo el sistema de aislación no debe ser menor que 90% de V_b calculado con la ecuación (7).</p> <p>8.2.4 Los límites especificados en 8.2.1 y 8.2.2 se deben evaluar usando los valores de D_{TD} y D_{TM} determinados de acuerdo a lo especificado en 7.3, excepto que D_D' se puede usar en lugar de D_D y D_M' se puede usar en lugar de D_M, donde D_D' y D_M' se calculan con las ecuaciones siguientes:</p>	<p>Las ecuaciones (9) y (10) corresponden a modificaciones de las ecuaciones (1) y (3) con el propósito de incluir la influencia de la flexibilidad de la superestructura. Como se observa de estas ecuaciones, la flexibilidad de la superestructura produce una disminución de la demanda de deformación sobre la aislación. Para una razón entre el período fundamental aislado y de base fija (convencional) de 3, la corrección en D es de un 5%, aproximadamente.</p>
<p>8 Procedimiento de análisis dinámico</p> <p>8.1 Generalidades</p> <p>De acuerdo a lo requerido en cláusula 6, cada estructura aislada sísmicamente, o parte de ella, se puede diseñar y construir para resistir los desplazamientos y fuerzas sísmicas especificadas en esta cláusula. Las disposiciones de NCh433 también son obligatorias, en lo que no contradigan las disposiciones de la presente norma.</p>	<p>C8 Procedimiento de análisis dinámico</p>	$D_D' = \frac{D_D}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_D}\right)^2}} \quad (9)$ $D_M' = \frac{D_M}{\sqrt{1 + \left(\frac{T}{T_M}\right)^2}} \quad (10)$	<p>El valor del período de vibración T de la superestructura con base fija en cada una de las direcciones de acción sísmica consideradas en el análisis, se debe calcular mediante un análisis modal o bien mediante la fórmula implícita en NCh433.</p>
<p>8.2 Sistema de aislación y elementos de la subestructura</p> <p>8.2.1 El desplazamiento total de diseño del</p>	<p>C8.2 Sistema de aislación y elemento la subestructura</p>	<p>y T es el período de la superestructura con base fija y comportamiento elástico.</p>	

8.3 Elementos estructurales de la superestructura

8.3.1 El corte de diseño en la superestructura, en caso de ser ésta de configuración regular, no debe ser menor que 80% de V_s calculado con la ecuación (8) ni menor que los límites especificados en 7.4.3.

EXCEPCION: Si la superestructura es de configuración regular, el corte de diseño en la superestructura se puede considerar menor que 80%, pero no menor que 60%, de V_s siempre que se realice análisis de respuesta en el tiempo para diseñar la estructura.

8.3.2 Si la superestructura es de configuración irregular, el corte de diseño en ella no debe ser menor que V_s calculada con la ecuación (8) ni menor que los límites especificados en 7.4.3.

EXCEPCION: Si la superestructura es de configuración irregular, el corte de diseño en ella se puede considerar menor que 100%, pero no menor que 80%, de V_s siempre que se realice análisis de respuesta en el tiempo para diseñar la estructura.

8.4 Movimiento del suelo

8.4.1 Espectros de diseño

8.4.1.1 Para el diseño de todas las estructuras con un período aislado, T_M , mayor que 3,0 s, o ubicadas en suelos tipo IV, o ubicadas a menos de 10 km de una falla activa, se requiere de espectros específicos del sitio debidamente fundamentados. Las estructuras que no requieran de este tipo de espectro y para las cuales no se ha calculado un espectro específico, se deben diseñar usando el espectro indicado en Figura 1 debidamente escalado por el factor Z de Tabla 5, y conjuntamente con los valores indicados en Tabla 6.

C8.4 Movimiento del suelo

C8.4.1 Espectros de diseño

El espectro de diseño propuesto es espectro de Newmark & Hall (ver Anex [17]) cuya definición genérica se present Figura C.17 (ver Tabla 6 y Figura 1).

El espectro base para el diseño de estruc aisladas fue desarrollado para acelerac máximas del terreno de 0,4 g, 0,41 g, y 0 para los suelos I, II, y III, respectivam velocidades máximas de 22 cm/s, 41 cm 57 cm/s, respectivamente; y desplazamii máximos de 10 cm, 15 cm, y 17 respectivamente. Estos desplazamientos terreno fueron derivados asumiendo un f:

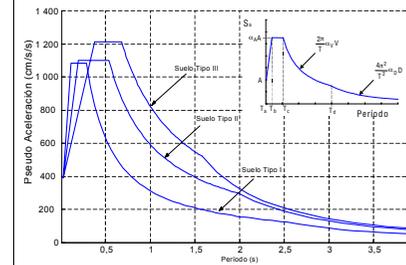


Figura 1 - Espectro base de diseño para zona 2 y los tres tipos de suelos ($\beta = 0,05$)

de amplificación de desplazamiento igual a 2 que es consistente con el valor obtenido de los factores de amplificación promedio para los registros chilenos (ver Anexo A, [20]). Este espectro debe ser modificado para el diseño de acuerdo con el factor Z introducido en 7.3.1 y establecido en Tabla 5.

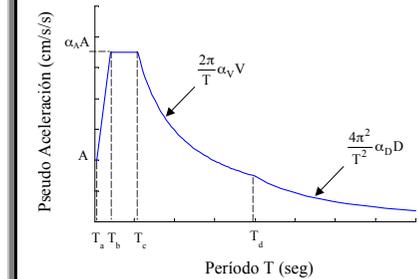


Figura C.17 - Definición del espectro de diseño de pseudo-aceleración

8.4.1.2 El espectro de diseño se debe construir para el sismo de diseño. Este no se debe considerar menor que el espectro entregado por esta norma.

EXCEPCION: Si se calcula un espectro de diseño específico para el sismo de diseño, el espectro de diseño se puede considerar menor que el 100%, pero no menor del 80%, del espectro de diseño definido por Figura 1.

8.4.1.3 Se debe construir un espectro de diseño para el sismo máximo posible. Este espectro no se debe considerar menor que el espectro de diseño definido en esta norma amplificado por el factor M_M . Este espectro se debe usar para determinar el desplazamiento total máximo y las fuerzas provenientes de los momentos volcantes para diseñar y ensayar el sistema de aislación.

EXCEPCION: Si se calcula un espectro de diseño específico para el sismo máximo posible, el espectro de

NCh2745

diseño se puede considerar menor que el 100%, pero no menor del 80%, del espectro de diseño dado en Figura 1 amplificado por el factor M_M .

8.4.2 Registros

8.4.2.1 Se deben seleccionar pares de componentes horizontales de registros de aceleración del suelo de al menos tres eventos sísmicos. Los pares de componentes de registros deben tener magnitudes, distancias a la falla, fuentes del mecanismo del sismo y tipos de suelo que sean consistentes con aquellos que controlan el sismo de diseño (o sismo máximo posible). Cuando no se disponga de pares de componentes de registros reales, se pueden agregar registros artificiales.

Comentarios

C8.4.2 Registros

C8.4.2.1 Con el único propósito y alcance de diseñar estructuras aisladas, se han generado tres registros artificiales para cada tipo de suelo, con dos componentes horizontales uno, compatibles con los espectros de diseño entregados en Figura 1. Estos registros se generaron utilizando las dos componentes horizontales de aceleración medidas durante el sismo del 3 de Marzo de 1985, en estación con suelos tipos I, II y III.

Sólo a modo de ejemplo, en Figura C.1 muestran registros compatibles típicos. Para la conveniencia de la comparación, todos los registros se han normalizado a una aceleración máxima del suelo de 0,4 g.

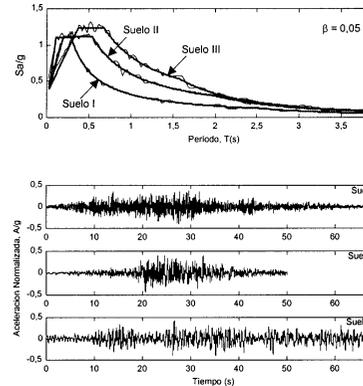


Figura C.18 - Registros sintéticos compatibles con espectros de diseño para $\beta = 0,05$. Ellos fueron obtenidos a partir de una componente de registros reales en suelos I, II y III

NCh2745

8.4.2.2 Para cada par de registros se deben construir los espectros de pseudo-aceleración para $\beta = 0,05$ y se deben combinar según la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS). Los registros se deben modificar de manera que el promedio de los espectros de respuesta combinados con SRSS para las tres parejas de registros, no resulte menor que 1,17 (1,3 - 0,10 x 1,3) veces el espectro del sismo de diseño para $\beta = 0,05$ (ó 1,17 veces el sismo máximo posible cuando corresponda) en el rango de períodos entre $0,5T_D$ y $1,25T_M$.

Comentarios

C8.4.2.2 Este ítem busca conseguir una cierta uniformidad en la intensidad de las componentes en ambas direcciones.

NOTA - Utilizando registros compatibles esta condición se satisface automáticamente. Sin embargo, como se aprecia en Figura C.19 al imponer esta condición a las componentes de un registro real como el de Melipilla (1985) en todo el rango de frecuencias, el resultado es un registro con un espectro de respuesta poco realista.

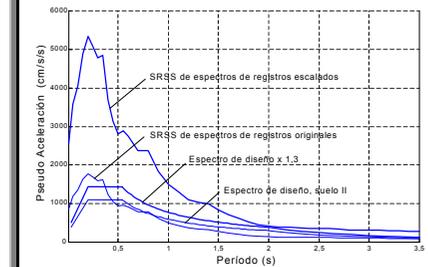


Figura C.19 - Amplificación de registros y combinación de componentes

8.5 Modelo matemático

8.5.1 Generalidades

El modelo matemático de la estructura aislada, incluyendo el sistema de aislación, el sistema resistente de cargas laterales y cualquier otro elemento estructural, debe estar de acuerdo con lo dispuesto en NCh433 y con los requisitos de 8.5.2 y 8.5.3 que se describen a continuación.

8.5.2 Sistemas de aislación

8.5.2.1 El sistema de aislación se debe modelar de acuerdo con las características de deformación desarrolladas y verificadas por ensayos de acuerdo a los requisitos de 7.2.

C8.5 Modelo matemático

C8.5.2 Sistemas de aislación

Los programas de análisis estructural más utilizados actualmente para el análisis y diseño de estructuras aisladas son:

- SAP 2000; y
- 3D-BASIS (ver Anexo A, [19]).

NCh2745	Comentarios
<p>8.5.2.2 El sistema de aislación se debe modelar con suficientes detalles como para:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Considerar la distribución espacial de los aisladores. 2. Calcular las traslaciones en ambas direcciones horizontales y la torsión de la superestructura, considerando la posición menos favorable de la excentricidad de la masa. 3. Poder determinar las fuerzas volcantes o que provoquen levantamiento sobre cada aislador. 4. Considerar los efectos de la carga vertical, acciones bidireccionales, y la velocidad de carga en caso que las propiedades de fuerza-deformación del aislador sean dependientes de una o más de estas variables. <p>8.5.3 Estructura aislada</p> <p>8.5.3.1 Desplazamiento</p> <p>a) El máximo desplazamiento de cada piso, el desplazamiento total de diseño y el desplazamiento total máximo en el sistema de aislación se deben calcular utilizando un modelo de la estructura aislada que incluya las características fuerza-deformación de los elementos no-lineales del sistema de aislación y del sistema resistente a fuerzas laterales.</p>	<p>Ambos programas permiten modelar en f sencilla las constitutivas no-lineales de aisladores. Sin embargo, SAP 2000 pe analizar casos más complejos en que e estructura bajo el nivel de aislación.</p> <p>C8.5.3 Estructura aislada</p> <p>C8.5.3.1 Desplazamiento</p> <p>En caso de que se realice un análisis espe las características no-lineales del ciclo fu deformación de los aisladores se del considerar a través de propiedades lin equivalentes calibradas para obtener disipación cíclica de energía para una sinusoidal que la obtenida de la constit verdadera del aislador.</p> <p>El análisis espectral con propiedades equivalentes para los aisladores intrínsecamente iterativo debido a dependencia con la deformación angular γ d</p>

NCh2745	Comentarios										
<p>b) Los sistemas resistentes a fuerzas laterales con elementos no-lineales incluyen, sin estar limitados a ello, sistemas estructurales irregulares diseñados para una fuerza lateral menor que V_s según lo indica la ecuación (8) y los límites especificados en 7.4.3 y los sistemas estructurales regulares diseñados para una fuerza lateral menor que el 80% de V_s.</p>	<p>propiedades secantes.</p> <p>Las irregularidades de una estructura constituyen discontinuidades físicas importantes en su configuración en altura (ver Tabla C.3) y planta (ver Tabla C.4) y en su sistema resistente a fuerzas laterales. Entre las irregularidades de la superestructura destacan:</p> <p style="text-align: center;">Tabla C.3 - Irregularidades verticales estructurales</p> <table border="1" data-bbox="1693 523 2051 1225"> <tbody> <tr> <td data-bbox="1693 523 1742 644">1</td> <td data-bbox="1742 523 2051 644">Irregularidad de rigidez - piso blando Un piso blando es aquel cuya rigidez lateral es menor del 70% de la rigidez del piso superior o menor del 80% de la rigidez promedio de los 3 pisos superiores al piso blando.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1693 644 1742 762">2</td> <td data-bbox="1742 644 2051 762">Irregularidad de peso (masa) Se debe considerar que existe irregularidad de masa cuando la masa efectiva de cualquier piso es mayor del 150% de la masa efectiva de un piso colindante. No es necesario considerar el nivel de techo.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1693 762 1742 916">3</td> <td data-bbox="1742 762 2051 916">Irregularidad vertical geométrica Se considerará que existe irregularidad vertical geométrica cuando la dimensión horizontal del sistema de resistencia a las fuerzas laterales en cualquier piso es mayor del 130% de la de un piso colindante. No es necesario considerar los pisos de azotea de un solo nivel.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1693 916 1742 1034">4</td> <td data-bbox="1742 916 2051 1034">Discontinuidad en el plano de los elementos verticales resistentes a las fuerzas laterales Una excentricidad en el plano de los elementos resistentes a cargas laterales mayor que la longitud de esos elementos.</td> </tr> <tr> <td data-bbox="1693 1034 1742 1225">5</td> <td data-bbox="1742 1034 2051 1225">Discontinuidad en capacidad - piso blando Un piso débil es aquel en que la resistencia del piso es menor del 80% de la resistencia del piso superior. La resistencia del piso es la resistencia total de todos los elementos resistentes a las fuerzas sísmicas que comparten el esfuerzo cortante del piso en la dirección bajo consideración.</td> </tr> </tbody> </table>	1	Irregularidad de rigidez - piso blando Un piso blando es aquel cuya rigidez lateral es menor del 70% de la rigidez del piso superior o menor del 80% de la rigidez promedio de los 3 pisos superiores al piso blando.	2	Irregularidad de peso (masa) Se debe considerar que existe irregularidad de masa cuando la masa efectiva de cualquier piso es mayor del 150% de la masa efectiva de un piso colindante. No es necesario considerar el nivel de techo.	3	Irregularidad vertical geométrica Se considerará que existe irregularidad vertical geométrica cuando la dimensión horizontal del sistema de resistencia a las fuerzas laterales en cualquier piso es mayor del 130% de la de un piso colindante. No es necesario considerar los pisos de azotea de un solo nivel.	4	Discontinuidad en el plano de los elementos verticales resistentes a las fuerzas laterales Una excentricidad en el plano de los elementos resistentes a cargas laterales mayor que la longitud de esos elementos.	5	Discontinuidad en capacidad - piso blando Un piso débil es aquel en que la resistencia del piso es menor del 80% de la resistencia del piso superior. La resistencia del piso es la resistencia total de todos los elementos resistentes a las fuerzas sísmicas que comparten el esfuerzo cortante del piso en la dirección bajo consideración.
1	Irregularidad de rigidez - piso blando Un piso blando es aquel cuya rigidez lateral es menor del 70% de la rigidez del piso superior o menor del 80% de la rigidez promedio de los 3 pisos superiores al piso blando.										
2	Irregularidad de peso (masa) Se debe considerar que existe irregularidad de masa cuando la masa efectiva de cualquier piso es mayor del 150% de la masa efectiva de un piso colindante. No es necesario considerar el nivel de techo.										
3	Irregularidad vertical geométrica Se considerará que existe irregularidad vertical geométrica cuando la dimensión horizontal del sistema de resistencia a las fuerzas laterales en cualquier piso es mayor del 130% de la de un piso colindante. No es necesario considerar los pisos de azotea de un solo nivel.										
4	Discontinuidad en el plano de los elementos verticales resistentes a las fuerzas laterales Una excentricidad en el plano de los elementos resistentes a cargas laterales mayor que la longitud de esos elementos.										
5	Discontinuidad en capacidad - piso blando Un piso débil es aquel en que la resistencia del piso es menor del 80% de la resistencia del piso superior. La resistencia del piso es la resistencia total de todos los elementos resistentes a las fuerzas sísmicas que comparten el esfuerzo cortante del piso en la dirección bajo consideración.										

Tabla C.4 - Irregularidades estructurales en planta

1	<p>Irregularidad torsional a considerar cuando los diafragmas son rígidos en el plano</p> <p>Se debe considerar que existe irregularidad torsional cuando el máximo desplazamiento relativo del piso calculado incluyendo la torsión accidental, en un extremo de estructura transversal a un eje es más de 1,2 veces el promedio de los desplazamientos relativos del piso de los dos extremos de la estructura.</p>
2	<p>Esquinas reentrantes</p> <p>Se debe considerar que existe irregularidad en planta cuando el sistema resistente a las fuerzas laterales posee planos con esquinas reentrantes tales que los retrocesos o avances ocasionados son mayores que el 15% de la dimensión del plano resistente en la dirección principal.</p>
3	<p>Discontinuidad de diafragma</p> <p>Los diafragmas con discontinuidades abruptas o variaciones de rigidez incluyendo los que tienen áreas recortadas o abiertas mayores del 50% del área bruta encerrada del diafragma cambian en la rigidez efectiva del diafragma mayores del 50% de un piso siguiente.</p>
4	<p>Desviaciones fuera del plano</p> <p>Discontinuidades en una trayectoria de fuerza lateral como desviaciones fuera del plano de los elementos verticales.</p>
5	<p>Sistemas no paralelos</p> <p>Los elementos verticales resistentes a las cargas laterales no son paralelos simétricos con respecto a los ejes ortogonales principales del sistema que resiste las fuerzas laterales.</p>

8.5.3.2 Fuerzas y desplazamientos en los elementos claves

Las fuerzas y desplazamientos de diseño en los elementos claves del sistema resistente a las fuerzas laterales se pueden calcular utilizando un modelo elástico lineal de la estructura aislada, siempre que:

1. Las propiedades elásticas equivalentes

asumidas para los componentes no-lineales de los sistemas de aislamiento se basen en la rigidez efectiva máxima del sistema de aislamiento.

2. Todos los elementos claves del sistema resistente a las fuerzas laterales de la superestructura y subestructura sean lineales.

8.6 Descripción de los procedimientos de análisis

8.6.1 Generalidades

El análisis espectral y el análisis de respuesta en el tiempo se deben realizar de acuerdo con los requisitos de esta cláusula.

8.6.2 Solicitación sísmica

El sismo de diseño se debe utilizar para calcular el desplazamiento total de diseño del sistema de aislamiento y las fuerzas y desplazamientos laterales de la estructura aislada. El sismo máximo posible se debe utilizar para calcular el desplazamiento total máximo del sistema de aislamiento.

8.6.3 Análisis de respuesta espectral

8.6.3.1 El análisis de respuesta espectral reconoce que la razón de amortiguamiento modal en los modos fundamentales de la estructura aislada, es decir, aquellos que corresponden al movimiento traslacional o rotacional predominante de la interfaz de aislamiento y que quedan determinados por las características de ésta, es mayor que la razón de amortiguamiento de los modos que involucran deformación de la superestructura. Para las frecuencias de vibración asociadas a esos modos fundamentales, el espectro de diseño de 8.4.1 se debe dividir por el factor B_D indicado en Tabla 2. Para los modos restantes se deben usar valores de B_D coherentes con la

C8.6.3 Análisis de respuesta espectral

Para el análisis de respuesta espectral de una estructura aislada en que los primeros modos poseen razones de amortiguamiento β mayores que el resto de los modos, el espectro de diseño especificado en 8.4.1 debe ser dividido, para las frecuencias de vibración asociadas a esos modos, por el factor B_D de Tabla 2. Este procedimiento supone que el amortiguamiento interno de la estructura es clásico.

Lamentablemente, el uso de amortiguamiento modal clásico puede conducir en algunos casos a errores importantes en la respuesta de la estructura. Es aconsejable entonces usar una matriz de amortiguamiento C que no sea clásica

NCh2745	Comentarios	NCh2745	Comentarios
<p>razón de amortiguamiento de la superestructura supuesta fija al suelo. Por lo tanto, se deben utilizar dos valores de amortiguamiento modal en el análisis. Este procedimiento supone que el amortiguamiento interno de la estructura es clásico.</p> <p>8.6.3.2 El factor de reducción por amortiguamiento B_D para los modos fundamentales de la estructura aislada debe ser el menor valor entre el valor correspondiente al amortiguamiento efectivo del sistema de aislación y el valor asociado a $\beta = 0,30$.</p>	<p>debido a la concentración de amortiguamiento en los aisladores.</p> <p>Una posibilidad para construir la matriz de amortiguamiento del sistema completo separar las contribuciones a la n de amortiguamiento de los 3 modos fundamentales aislados de la contribución de modos flexibles de la superestructura. Se puede demostrar que es posible construir la matriz de amortiguamiento del sistema aislado a partir de la expresión siguiente:</p> $C = \left[\begin{array}{c c} \Psi^T C_s \Psi & -\Psi^T C_s \\ \hline -C_s^T \Psi & C_s \end{array} \right] \quad (C)$ <p>en que la matriz ψ representa transformación cinemática lineal entre deformaciones q de la superestructura y movimientos impuestos de la base, x, está</p> $q = \psi x \quad (C)$ <p>y la matriz C_s corresponde a la matriz de amortiguamiento clásica modal de la superestructura.</p> <p>Lamentablemente debido a que la mayoría de los programas de análisis para estructuras aisladas disponibles comercialmente utilizan el concepto de amortiguamiento modal clásico las expresiones (C.20) y (C.21) no han sido ampliamente difundidas. La norma acepta lo tanto, el análisis modal clásico con precaución mencionada.</p>	<p>8.6.3.3 El análisis espectral utilizado para determinar el desplazamiento total de diseño y el desplazamiento total máximo debe incluir la acción simultánea sobre el modelo del 100% de la excitación según la dirección crítica del movimiento más el 30% de la excitación según un eje ortogonal a la dirección anterior. El desplazamiento máximo del sistema de aislación se debe calcular como la suma vectorial de los dos desplazamientos ortogonales.</p> <p>8.6.4 Análisis de respuesta en el tiempo</p> <p>8.6.4.1 El análisis de respuesta en el tiempo se debe realizar con al menos tres pares apropiados de componentes horizontales de registros, como se define en 8.4.2.</p> <p>8.6.4.2 Cada par de registros se debe aplicar simultáneamente al modelo, considerando la ubicación menos ventajosa del centro de masa. El desplazamiento máximo del sistema de aislación se debe calcular de la suma vectorial de los dos desplazamientos ortogonales para cada instante.</p> <p>8.6.4.3 Para cada análisis de respuesta en el tiempo se deberá calcular el parámetro de interés. Cuando se realicen tres análisis de respuesta en el tiempo, se deberá utilizar en el diseño la respuesta máxima del parámetro de interés. Cuando se realicen siete o más análisis de respuesta en el tiempo, se podrá utilizar para el diseño el valor promedio de respuesta del parámetro de interés.</p>	<p>C8.6.4 Análisis de respuesta en el tiempo</p> <p>Este procedimiento corresponde a un análisis de historia de respuesta en el tiempo para registros sintéticos o reales característicos de la sismicidad de la zona de emplazamiento de la estructura. En todo caso, los resultados de este análisis se deben escalar hacia arriba si resultan menores que un factor del obtenido por análisis estático (ver 8.7.3).</p> <p>El corrimiento del centro de masas será de acuerdo con NCh433.Of96, acápite 6.3.4 a). Esta subcláusula establece por concepto de torsión accidental un corrimiento de un 5% de la dimensión de la planta en la dirección perpendicular a la acción sísmica considerada.</p> <p>El análisis sísmico de respuesta en el tiempo se puede realizar utilizando un modelo lineal equivalente del sistema de aislación o bien un modelo no-lineal que represente en forma más precisa su constitutiva.</p> <p>Sin embargo, es importante mencionar que existen casos en los que un modelo lineal equivalente del sistema de aislación puede conducir a errores significativos en la estimación de la demanda de deformaciones y fuerzas en el sistema de aislación y la superestructura. Un ejemplo característico es el caso de los aisladores friccionales en que ocurre levantamiento de los apoyos durante un sismo. Otro ejemplo es el uso de sistemas de</p>

NCh2745	Comentarios	NCh2745	Comentarios
<p data-bbox="645 252 1025 395">aislación con restricciones cinemáticas lineales, como es el péndulo friccional (l). En tales casos es necesario modelar en f precisa la constitutiva no-lineal del apoyo acomplamiento entre los movimientos late y verticales.</p> <p data-bbox="219 419 492 443">8.7 Fuerza lateral de diseño</p> <p data-bbox="219 467 627 539">8.7.1 Sistema de aislación y elementos estructurales en el sistema de aislación o en la subestructura</p> <p data-bbox="219 563 627 730">El sistema de aislación, la fundación y todos los sistemas estructurales de la subestructura se deben diseñar utilizando todos los requisitos de capacidad, deformación y resistencia apropiados para estructuras no aisladas y las fuerzas obtenidas del análisis dinámico.</p> <p data-bbox="219 754 627 802">8.7.2 Elementos estructurales por sobre el sistema de aislación</p> <p data-bbox="219 826 627 1066">Los elementos estructurales por sobre el sistema de aislación se deben diseñar utilizando todos los requisitos de capacidad, deformación y resistencia apropiados para estructuras no aisladas y las fuerzas obtenidas del análisis dinámico reducidas por el factor R_1. El factor R_1 se debe basar en el tipo de esquema resistente a fuerzas laterales utilizado en la superestructura y que se detalla en Tabla 4.</p> <p data-bbox="219 1090 548 1114">8.7.3 Escalamiento de los resultados</p> <p data-bbox="219 1137 627 1340">Cuando el esfuerzo de corte lateral en los elementos estructurales, determinado utilizando ya sea el espectro de respuesta o el análisis de respuesta en el tiempo, es menor que el valor mínimo que se indica en 8.1 y 8.2, todos los parámetros de respuesta, incluyendo las fuerzas y momentos de los elementos se deben aumentar proporcionalmente.</p>		<p data-bbox="1234 252 1641 308">8.8 Límites de desplazamiento de entrepiso</p> <p data-bbox="1234 331 1641 475">El desplazamiento máximo de entrepiso correspondiente a la fuerza lateral de diseño, incluyendo el desplazamiento horizontal debido a la deformación vertical del sistema de aislación, no debe exceder los límites siguientes:</p> <ol data-bbox="1234 499 1641 1010" style="list-style-type: none"> <li data-bbox="1234 499 1641 643">1. El cociente máximo entre el desplazamiento de entrepiso de la estructura y la altura del piso por sobre el sistema de aislación, calculado mediante análisis de respuesta espectral, no debe exceder 0,002 5. <li data-bbox="1234 802 1641 1010">2. El cociente máximo entre el desplazamiento de entrepiso de la estructura y la altura de piso por sobre el sistema de aislación, calculado por análisis de respuesta en el tiempo considerando las características de fuerza-deformación de los elementos no-lineales del sistema resistente a las fuerzas laterales, no debe exceder de 0,003. <p data-bbox="1234 1034 1641 1225">Los efectos de segundo orden correspondientes al desplazamiento lateral del sismo máximo posible, Δ, de la estructura por sobre el sistema de aislación combinado con las fuerzas de gravedad se deben investigar cuando la razón entre el desplazamiento de entrepiso y la altura del piso exceda 0,004.</p>	<p data-bbox="1659 252 2074 308">C8.8 Límites de desplazamiento de entrepiso</p> <p data-bbox="1659 499 2078 778">La deformación de entrepiso para la superestructura es función del nivel de ductilidad provisto por su detallamiento sísmico. El valor escogido de deformación de entrepiso es consistente con el valor 0,002 de NCh433 y $R_1 = 2$, ya que $0,002 \cdot R_1 / 1,4 / (\phi = 0,9) \approx 0,002 5$, lo que implica que la superestructura permanecerá esencialmente elástica y con deformaciones de entrepiso considerablemente inferiores a las de su contraparte de base fija.</p> <p data-bbox="1659 802 2078 890">El mayor valor utilizado reconoce el beneficio de realizar una mejor estimación de la demanda a través de un análisis de respuesta en el tiempo.</p> <p data-bbox="1659 1034 2078 1161">El límite 0,003 para la deformación de entrepiso corresponde a aplicar a la deformación admisible de 0,002 5 el factor de magnificación M_M de 1,2 para el sismo máximo posible.</p>

NCh2745	Comentarios
<p>9 Carga lateral en elementos de estructuras y en los componentes no estructurales soportados por estructuras</p>	<p>C9 Carga lateral en elementos de estructuras y en los componentes no estructurales soportados por estructuras</p>
<p>9.1 Generalidades</p>	
<p>Las partes o secciones de una estructura aislada, los componentes permanentes no estructurales y sus fijaciones, y las fijaciones de equipos permanentes soportados por una estructura se deben diseñar para resistir fuerzas y desplazamientos sísmicos como lo indica esta cláusula y los requisitos correspondientes de 8.3 de NCh433.Of96.</p>	
<p>9.2 Fuerzas y desplazamientos</p>	
<p>9.2.1 Componentes en la interfaz de aislación o por sobre ella</p>	
<p>Los elementos de estructuras aisladas y sus componentes no estructurales, o partes de ambos, que están en la interfaz de aislación o sobre la misma, se deben diseñar para resistir una fuerza sísmica lateral total igual a la respuesta dinámica máxima del elemento considerado.</p>	
<p>ALTERNATIVA: Los elementos de estructuras aisladas y sus componentes no estructurales, o partes de ambos, se pueden diseñar para resistir la fuerza sísmica lateral total como lo indican las ecuaciones (8-1) a (8-4) de 8.3 de NCh433.Of96.</p>	
<p>9.2.2 Componentes que cruzan la interfaz de aislación</p>	<p>C9.2.2 Componentes que cruzan la interfaz de aislación</p>
<p>Los elementos de estructuras aisladas y los componentes no estructurales, o partes de ambos que cruzan la interfaz de aislación, se deben diseñar para acomodar el desplazamiento total máximo.</p>	<p>Para acomodar los movimientos diferentes entre la superestructura aislada y subestructura o el suelo circundante necesario proveer conexiones flexibles capaces de acomodar el desplazamiento impuesto por sismo máximo posible. Otras estructuras que cruzan la interfaz de aislación, tales como escaleras, ascensores, shafts, entre otros</p>

NCh2745	Comentarios
	<p>deben detallar de manera de permitir el movimiento diferencial entre la subestructura y la superestructura.</p>
<p>9.2.3 Componentes por debajo de la interfaz de aislación</p>	
<p>Los elementos de estructuras aisladas y los componentes no estructurales o partes de ambos que están por debajo de la interfaz de aislación se deben diseñar y construir de acuerdo con los requisitos de 8.3 de NCh433.Of96.</p>	
<p>10 Requisitos detallados de los sistemas</p>	<p>C10 Requisitos detallados de los sistemas</p>
<p>10.1 Generalidades</p>	
<p>El sistema de aislación y el sistema estructural deben cumplir con los requisitos de esta cláusula y con los requisitos de materiales descritos en NCh427, NCh430, NCh1928 y NCh2123 vigentes.</p>	
<p>10.2 Sistema de aislación</p>	
<p>10.2.1 Condiciones medioambientales</p>	<p>C10.2.1 Condiciones medioambientales</p>
<p>Además de los requisitos para cargas verticales y laterales producidas por el viento y los movimientos sísmicos, el sistema de aislación se debe diseñar teniendo en consideración otras condiciones medioambientales que incluyen los efectos de envejecimiento, deformación plástica, fatiga, temperatura de operación y exposición a la humedad o a sustancias dañinas.</p>	<p>Los aisladores elastoméricos de goma natural son sensibles a la radiación ultravioleta y el ozono, y es recomendable que no se encuentren expuestos directamente a la luz solar. Por esta razón estos aisladores deben estar protegidos por una lámina de sacrificio que retarde el proceso de envejecimiento. Similares precauciones con el polvo y la humedad se deben tener con los aisladores friccionales de modo de evitar agripamiento de las superficies como consecuencia del envejecimiento.</p>

NCh2745	Comentarios	NCh2745	Comentarios
<p>10.2.2 Fuerzas de viento</p> <p>Las estructuras aisladas deben resistir las cargas de diseño para viento en todos los niveles por encima de la interfaz de aislación de acuerdo con las disposiciones generales del diseño para viento según NCh432. En la interfaz de aislación, se debe contar con un sistema que limite en condiciones habituales de operación el desplazamiento lateral en el sistema de aislación a un valor igual al que se permite entre los pisos de la superestructura.</p> <p>10.2.3 Resistencia al fuego</p> <p>10.2.3.1 La resistencia al fuego del sistema de aislación debe cumplir con lo que se requiere para las columnas, muros u otros elementos estructurales de la edificación en el cual se encuentra instalado.</p> <p>10.2.3.2 Los sistemas de aislación que requieren una calificación de resistencia al fuego se deben proteger con materiales o con sistemas de construcción apropiados, diseñados para proporcionar el mismo grado de resistencia al fuego especificado para el elemento en el cual se encuentran instalados cuando se prueben de acuerdo con UBC 7-1, Sección 703.2.</p> <p>La protección del sistema de aislación debe tener la capacidad de retardar la transferencia de calor al aislador de manera que la capacidad requerida de transmisión de cargas por gravedad del aislador no sea impedida después de la exposición del sistema de protección a la curva de tiempo-temperatura correspondiente indicada por UBC 7-1, para una duración no menor que la requerida por la calificación de resistencia al fuego del elemento estructural en el cual esté instalado.</p> <p>La protección del sistema de aislación aplicada a los aisladores se debe diseñar apropiadamente e instalarse firmemente de</p>		<p>manera que no se afloje o se suelte, reciba daños o se afecte de alguna otra manera su capacidad de acomodar los movimientos sísmicos para el cual está diseñado el aislador y mantenga su integridad con el propósito de proporcionar la protección requerida de resistencia al fuego.</p> <p>10.2.4 Fuerza de restitución lateral</p> <p>El sistema de aislación se debe configurar para producir una fuerza de restitución tal que la fuerza lateral para el desplazamiento total de diseño sea por lo menos 0,025 W mayor que la fuerza lateral para el 50% del desplazamiento total de diseño.</p> <p>EXCEPCION: El sistema de aislación no necesita estar configurado para producir una fuerza de restitución, como se indica anteriormente, siempre que él tenga la capacidad de permanecer estable bajo la carga vertical completa y admita un desplazamiento máximo total igual a 3,0 veces el desplazamiento total de diseño.</p> <p>10.2.5 Restricción de desplazamiento</p> <p>El sistema de aislación se puede configurar incluyendo un dispositivo de restricción de desplazamiento que limite el desplazamiento lateral debido al sismo máximo posible a un máximo de 1,5 veces el desplazamiento total de diseño, siempre que la estructura aislada se diseñe de acuerdo con los criterios siguientes:</p> <p>1. La respuesta al sismo máximo posible se calcula de acuerdo con los requisitos</p>	<p>C10.2.4 Fuerza de restitución lateral</p> <p>Se entiende por carga vertical completa a la obtenida de las combinaciones siguientes:</p> <p>i) $1,2D+1,0L+ E _{m\acute{a}x.}$ (C.22)</p> <p>ii) $0,8D- E _{m\acute{i}n.}$</p> <p>en que:</p> <p>E = corresponde a la carga vertical máxima sobre los aisladores proveniente del volcamiento de la superestructura.</p> <p>En estas expresiones la carga viva se puede reducir por el concepto de área tributaria de acuerdo a lo estipulado en NCh1537.</p> <p>C10.2.5 Restricción de desplazamiento</p> <p>Se entiende que para el análisis espectral de la estructura aislada las características no-lineales</p>

NCh2745	Comentarios	NCh2745	Comentarios
<p>del análisis dinámico de 6.3 de NCh433.Of96, considerando explícitamente las características no-lineales del sistema de aislación y de la superestructura.</p> <p>2. La capacidad final del sistema de aislación y de los elementos estructurales bajo él exceda las demandas de resistencia y desplazamiento correspondientes al sismo máximo posible.</p> <p>3. La superestructura se ha verificado de acuerdo a las demandas de estabilidad y ductilidad correspondientes al sismo máximo posible.</p> <p>4. El dispositivo de restricción de desplazamiento no se llegue a activar para un desplazamiento menor a 0,75 veces el desplazamiento total de diseño a menos que se demuestre mediante un análisis que su activación a desplazamientos menores no se traduce en un diseño insatisfactorio.</p> <p>10.2.6 Estabilidad para cargas verticales</p> <p>Cada elemento del sistema de aislación se debe diseñar para permanecer estable bajo la carga vertical máxima, $1,2D + 1,0L + E _{\text{máx.}}$ y la vertical mínima, $0,8D - E _{\text{mín.}}$ a un desplazamiento horizontal igual al desplazamiento máximo total. La carga sísmica vertical en un aislador debido al volcamiento, $E _{\text{máx.}}$ y $E _{\text{mín.}}$, se debe basar en la respuesta extrema debida al movimiento sísmico máximo posible.</p> <p>10.2.7 Volcamiento global</p> <p>El factor de seguridad contra el volcamiento global de la estructura en la interfaz de aislación no debe ser menor que 1,0 para las combinaciones de carga requeridas. Se deben investigar todas las condiciones de</p>	<p>del sistema de aislación se pueden repres a través de las propiedades lin equivalentes de los dispositivos.</p> <p>C10.2.7 Volcamiento global</p>	<p>carga de gravedad y sismo. Las fuerzas sísmicas para el cálculo del volcamiento se deben basar en el movimiento sísmico máximo posible y se debe utilizar W para la fuerza vertical de restitución.</p> <p>Se permite el levantamiento local de los aisladores siempre que las deformaciones resultantes no causen un esfuerzo excesivo o inestabilidad en los aisladores u otros elementos de la edificación.</p> <p>10.2.8 Inspección y reemplazo</p> <p>1. Se debe contar con acceso para inspección y reemplazo de todos los componentes del sistema de aislación.</p> <p>2. El ingeniero civil responsable del proyecto o el profesional designado por él debe realizar una serie final de inspecciones u observaciones de las áreas de separación de la edificación y de los componentes que cruzan el sistema de aislación y dejar constancia de la aprobación en el Libro de Obra antes de emitir el certificado de uso para la edificación con aislación sísmica. Dichas inspecciones y observaciones deben mostrar que las condiciones reales de construcción permiten un desplazamiento libre y sin interferencias de la estructura hasta los niveles máximos de sollicitación y que todos los componentes que cruzan el sistema de aislación de acuerdo a su instalación definitiva puedan acomodar los desplazamientos estipulados.</p>	<p>El levantamiento de aisladores puede ocurrir en ciertas situaciones extremas especialmente en los dispositivos friccionales. La existencia de episodios de levantamiento en la respuesta de una estructura aislada requiere que el sistema de aislación sea modelado incorporando este efecto no-lineal. Del mismo modo se debe incluir con especial cuidado el impacto entre la estructura y la superficie de deslizamiento, el que puede ocasionar fuertes incrementos instantáneos de la fuerza de deslizamiento y el consecuente bloqueo horizontal de la estructura en algunos aisladores.</p> <p>C10.2.8 Inspección y reemplazo</p>

NCh2745	Comentarios
<p>3. Las edificaciones con aislación sísmica deben tener un programa de control, inspección y mantenimiento periódico para el sistema de aislación establecido por el profesional responsable del diseño del sistema. El objetivo de dicho programa debe ser asegurar que todos los elementos del sistema de aislación están en condiciones de cumplir con los niveles mínimos de diseño en todo momento.</p> <p>4. La modificación, reparación o reconstrucción en la zona de influencia del sistema de aislación, incluyendo la de los componentes que cruzan el sistema de aislación, se debe realizar bajo la dirección de un profesional con experiencia en el diseño y construcción de estructuras con aislación sísmica.</p> <p>5. Se recomienda instrumentar el edificio al menos al nivel del sistema de aislación con el propósito de registrar los desplazamientos relativos entre la base y la superestructura.</p>	<p>Es recomendable que dos aisladores de tipo y tamaño distinto, sometidos a una carga axial representativa de las cargas sobre aisladores de ese tipo y tamaño instalados en el edificio, permanezcan en la estructura una vez finalizada la construcción para servir al propósito de monitoreo de las propiedades mecánicas a lo largo del tiempo.</p>
<p>10.2.9 Control de calidad</p>	<p>C10.2.9 Control de calidad</p>
<p>El ingeniero responsable del diseño estructural debe establecer un programa de ensayos de control de calidad para los aisladores.</p>	<p>Se requiere un programa de ensayo e inspección tanto para la fabricación de los aisladores como para su instalación en obra. Debido a lo avanzado de esta tecnología es difícil referirse a estándares para el ensayo e inspección. Los procedimientos de inspección y control de calidad de los aisladores se deben desarrollar para cada proyecto. Estos procedimientos dependen del sistema de aislación utilizado.</p> <p>En el control de calidad de los aisladores el fabricante debe, como mínimo, velar por aspectos tales como calidad de los materiales utilizados, ensayos de los elastómeros, ensayos del nivel de fricción, adhesivos y acero, pinturas, pernos y anclajes utilizados, procedimientos de instalación, entre otros.</p>

NCh2745	Comentarios
	<p>En ausencia de normas chilenas y siempre que no contradigan otras disposiciones de la presente norma, se pueden considerar los documentos siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. American Society for Testing and Materials (ASTM): ASTM A 36 <i>Standard Specification for Structural Steel</i>. 2. ASTM A 108 <i>Standard Specification for Steel Bars, Carbon, Cold-Finished Standard Quality</i>. 3. ASTM A 325 <i>Standard Specification for High-Strength Bolts</i>. 4. ASTM A 570 <i>Standard Specification for Structural Sheet Metal</i>. 5. ASTM A 572 <i>Standard Specification for High Strength Low Alloy Columbium-Vanadium Steels of Structural Quality</i>. 6. ASTM B 29 <i>Standard Specification for Lead</i>. 7. ASTM D 395 <i>Standard Test Methods for Rubber Property-Compression</i>. 8. ASTM D 412 <i>Standard Test Methods for Rubber Properties in Tension</i>. 9. ASTM D 429 <i>Standard Test Methods for Rubber Property-Adhesion to Rigid Substrate</i>. 10. ASTM D 518 <i>Standard Test Method for Rubber Deterioration-Surface Cracking</i>. 11. ASTM D 573 <i>Test for Rubber Deterioration in Air Oven</i>. 12. ASTM D 624 <i>Test Method for Rubber Property-Tear Resistance</i>. 13. ASTM D 1149 <i>Standard Test Method for Rubber Deterioration-Surface Ozone</i>.

NCh2745	Comentarios	NCh2745	Comentarios
	<p><i>Cracking in a Chamber (Flat Specimens)</i></p> <p>14. ASTM D 1229 <i>Test Method for Rubber Property-Compression Set at Temperatures.</i></p> <p>15. ASTM D 1457 <i>Specification for Rubber Molding and Extrusion Materials.</i></p> <p>16. ASTM D 2137 <i>Test Method for Rubber Property-Brittleness Point.</i></p> <p>17. ASTM D 2240 <i>Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness.</i></p> <p>18. ASTM D 3183 <i>Standard Practice for Rubber-Preparation of Pieces for Purposes from Products.</i></p> <p>19. ASTM D 4014 <i>Standard Specification for Plain and Steel Laminated Elastomer Bearings for Bridges.</i></p> <p>20. ASTM E 4 <i>Standard Practices for Verification of Testing Machine.</i></p> <p>21. ASTM E 37 <i>Standard Chemical Method for the Analysis of Lead.</i></p> <p>22. <i>Steel Structures Painting Co. (SSPC)SP6-Commercial Blast Cleaning.</i></p> <p>23. <i>American Welding Society (AWS) D Structural Welding Code-Steel.</i></p>	<p>10.3.2 Separaciones entre edificaciones</p> <p>Las separaciones mínimas entre las edificaciones aisladas y los muros de contención u otras obstrucciones fijas circundantes no deben ser menores que el desplazamiento total máximo.</p> <p>11 Estructuras que no forman parte de edificaciones</p> <p>Las estructuras que no forman parte de edificaciones se deben diseñar utilizando los desplazamientos y las fuerzas de diseño calculados de acuerdo con cláusulas 7 u 8.</p> <p>12 Fundaciones</p> <p>Las fundaciones se deben diseñar y construir de acuerdo con los requisitos de NCh433, utilizando las fuerzas de diseño calculadas de acuerdo con cláusulas 7 u 8.</p>	<p>C10.3.2 Separaciones entre edificaciones</p> <p>En el caso de una estructura aislada contigua a una convencional la separación entre ambas debe ser como mínimo la suma de las deformaciones totales máximas de ambas.</p> <p>En el caso de existir dos estructuras contiguas que estén aisladas sísmicamente se pueden presentar dos situaciones dependiendo si la aislación es o no común a ambas estructuras. Si es común, la separación entre ellas se puede tomar igual que la separación entre estructuras convencionales. Si la aislación no es común, la separación debe ser como mínimo la suma de las deformaciones totales máximas de ambas estructuras.</p> <p>C11 Estructuras que no forman parte de edificaciones</p> <p>Se entiende por estructuras que no forman parte de edificaciones a todas aquellas que son autosoportantes, aparte de los edificios, que resisten cargas gravitacionales y que resisten los efectos de los movimientos sísmicos; un ejemplo característico son los estanques de agua. Para el diseño de estos elementos se recomienda utilizar un espectro de piso generado a partir del modelo estructural descrito en cláusula 8.</p> <p>C12 Fundaciones</p> <p>De acuerdo con la ecuación (7), las fuerzas de diseño para el sistema de fundaciones no se deben reducir por el factor R_f.</p>
<p>10.3 Sistema estructural</p> <p>10.3.1 Distribución horizontal de fuerzas</p> <p>Un diafragma horizontal u otros elementos estructurales deben proveer continuidad por encima del sistema de aislación y deben tener suficiente resistencia y ductilidad para transmitir las fuerzas (debidas a los movimientos no uniformes del suelo) entre distintas partes de la edificación.</p>	<p>C10.3 Sistema estructural</p>		

NCh2745	Comentarios	NCh2745	Comentarios
<p>13 Revisión de diseño y construcción</p> <p>13.1 Generalidades</p> <p>Se debe realizar una revisión del diseño del sistema de aislación y de los programas de ensayos relacionados por un grupo de ingeniería independiente que incluye personas autorizadas en las disciplinas apropiadas, con experiencia en los métodos de análisis sísmico y en la teoría y aplicación de la aislación sísmica.</p> <p>13.2 Sistema de aislación</p> <p>13.2.1 La revisión del diseño del sistema de aislación debe incluir, sin estar limitado a, lo siguiente:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Revisión de los criterios sísmicos específicos del lugar, incluyendo el desarrollo de espectros y registros de movimientos del suelo específicos del lugar y todos los otros criterios de diseño desarrollados específicamente para el proyecto. 2. Revisión del diseño preliminar, incluyendo la determinación del desplazamiento total 	<p>C13 Revisión de diseño y construcción</p> <p>C13.1 Generalidades</p> <p>Esta norma exige la revisión del diseño, análisis del sistema de aislación, y la revisión del programa de ensayos de los aisladores. Razón de esto es que la tecnología de aislación sísmica está evolucionando rápidamente basada en ideas y conceptos que son familiares para muchos profesionales.</p> <p>El equipo de revisión debe incluir individuos con especial conocimiento en uno o más aspectos del diseño, análisis, e implementación de sistemas de aislación. El equipo revisor debe ser independiente del equipo de diseño y construcción del proyecto. El equipo revisor debe tener acceso completo a la información pertinente y la cooperación del equipo de diseño y gerencia del proyecto.</p> <p>Otros aspectos a considerar en la revisión estructural son:</p> <ol style="list-style-type: none"> a) la interacción entre el proyecto estructural, instalaciones, y arquitectura; b) las especificaciones técnicas. 	<p>de diseño del sistema de aislación, desplazamiento de diseño y nivel de las fuerzas laterales de diseño.</p> <ol style="list-style-type: none"> 3. Supervisión y observación de los ensayos de los prototipos (ver cláusula 14). 4. Revisión del diseño final del sistema estructural completo y de todos los análisis de apoyo. 5. Revisión del programa de ensayo de control de calidad del sistema de aislación (ver 10.2.9). <p>13.2.2 El ingeniero calculista debe presentar con los planos y los cálculos un informe de los alcances y resultados del proceso de revisión.</p> <p>14 Ensayos requeridos para el sistema de aislación</p> <p>14.1 Generalidades</p> <p>14.1.1 Las características de la relación constitutiva de fuerza-deformación y los valores de amortiguamiento del sistema de aislación utilizados en el diseño y análisis de estructuras con aislación sísmica se deben basar en los ensayos siguientes de una muestra seleccionada de los componentes, previo a su uso en la construcción.</p> <p>14.1.2 Los componentes del sistema de aislación a ensayar deben incluir al sistema de restricción de los efectos del viento cuando dichos sistemas se utilizan en el diseño.</p> <p>14.1.3 Los ensayos especificados en esta cláusula son para establecer y validar las propiedades mecánicas para el diseño del sistema de aislación y no se deben considerar como reemplazo de los ensayos de control de</p>	<p>C14 Ensayos requeridos para el sistema de aislación</p>

NCh2745	Comentarios	NCh2745	Comentarios
<p>calidad de manufactura de 10.2.9.</p> <p>14.2 Ensayos de los prototipos</p> <p>14.2.1 Generalidades</p> <p>Los ensayos de prototipos se deben realizar separadamente en dos probetas o juegos de probetas de tamaño real, según sea apropiado, de cada tipo y tamaño distinto de aislador. Las probetas de ensayo deben incluir los aisladores individuales y el sistema de restricción de los efectos del viento cuando dichos sistemas se utilizan en el diseño. Las probetas ensayadas no se pueden utilizar en la construcción.</p> <p>14.2.2 Registro</p> <p>Para cada ciclo de ensayos se debe registrar el comportamiento fuerza-deformación de la probeta ensayada.</p> <p>14.2.3 Secuencias y ciclos</p> <p>Las secuencias siguientes de ensayos se deben realizar para el número de ciclos que se indican y bajo una carga vertical igual al promedio $D + 0,5L$ en todos los aisladores de un mismo tipo y tamaño:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Veinte ciclos completos con inversión de carga para una fuerza lateral correspondiente a la fuerza lateral de diseño para viento. 2. Tres ciclos completos con inversión de carga en cada uno de los desplazamientos siguientes: $0,2 D_D$, $0,5 D_D$ y $1,0 D_D$, $1,0 D_M$. 3. Tres ciclos completos con inversión de carga al desplazamiento máximo total, $1,0 D_{TM}$. 	<p>C14.2 Ensayos de los prototipos</p> <p>C14.2.1 Generalidades</p> <p>Los requisitos de ensayo que se presenta esta norma son mínimos y es probable que modifiquen en el futuro en la medida que capacidad de los equipos de ensayo conocimiento en el tema evolucione.</p> <p>En general, los ensayos de aisladores: realizan en parejas de modo de ϵ excentricidades y momentos flect indeseables en el marco de carga.</p>	<p>4. No menos de diez ciclos completos con inversión de carga a 1,0 vez el desplazamiento total de diseño, $1,0 D_{TD}$.</p> <p>Si el aislador forma parte del sistema de transmisión de cargas verticales de la estructura, el ítem 2 de la secuencia de ensayos cíclicos especificado anteriormente se debe realizar para dos casos adicionales de carga vertical:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) $1,2 D + 0,5 L + E$ 2) $0,8 D - E$ <p>en que los valores de D y L a considerar se definen en NCh433. La carga de ensayo vertical en un aislador debe incluir el incremento de carga axial debido al momento volcante inducido por el sismo E y debe ser mayor o igual a la fuerza vertical máxima correspondiente al desplazamiento de ensayo que se está evaluando. En estos ensayos las cargas verticales combinadas se deben considerar como la fuerza de compresión más representativa en todos los aisladores de un mismo tipo y tamaño.</p> <p>14.2.4 Aisladores dependientes de la velocidad de carga</p> <p>Si las propiedades fuerza-deformación de los aisladores dependen de la velocidad de carga, cada uno de los conjuntos de ensayos especificados en 14.2.3 se deberá realizar dinámicamente a una frecuencia igual al inverso del período efectivo (rigidez secante), T_D, de la estructura aislada.</p> <p>Si se utilizan probetas a escala reducida para cuantificar las propiedades de los aisladores que dependen de la velocidad de carga, éstas deben ser del mismo tipo y material y se deben fabricar con los mismos procesos y calidad que los prototipos de tamaño natural</p>	<p>Esto implica que si el aislador está sujeto a cargas verticales importantes se debe someter a ocho ensayos adicionales de tres ciclos completos cada uno.</p> <p>C14.2.4 Aisladores dependientes de la velocidad de carga</p> <p>Los prototipos a escala deben ser tales que la relación constitutiva sea la misma que la del prototipo a escala natural.</p>

NCh2745

y se deben probar a una frecuencia que represente aquella que correspondería al ensayo a escala natural del prototipo.

Las propiedades de fuerza-deformación de un aislador se deben considerar dependientes de la velocidad de carga cuando la rigidez efectiva correspondiente al desplazamiento de diseño y a una frecuencia igual al inverso de su período, T_D , muestra una variación mayor a un 10% al compararla con la obtenida para cualquier frecuencia en el rango de 0,1 a 2 veces el inverso del período efectivo, T_D .

14.2.5 Aisladores que dependen de cargas bidireccionales

Si las propiedades de fuerza-deformación de los aisladores dependen de cargas bidireccionales, los ensayos especificados en 14.2.3 y 14.2.4 se deben incrementar para incluir simultáneamente las siguientes combinaciones bidireccionales del desplazamiento total de diseño: (0,25 y 1,0) D_{TD} , (0,5 y 1,0) D_{TD} , (0,75 y 1,0) D_{TD} , y (1,0 y 1,0) D_{TD} .

NOTA - Cuando las probetas a escala del prototipo se utilizan para cuantificar propiedades dependientes de cargas bidireccionales, dichas probetas deben ser del mismo tipo y material y fabricarse con el mismo proceso y calidad que los prototipos de tamaño natural.

Las propiedades de la relación constitutiva fuerza-deformación de un aislador se deben considerar dependientes de cargas bidireccionales cuando la rigidez efectiva

Comentarios

Es decir, el aislador tiene propiedades mecánicas que no dependen de la velocidad de carga cuando la rigidez efectiva medida por el rango de frecuencias $0,1/T_D$ a $2/T_D$ dentro del rango siguiente:

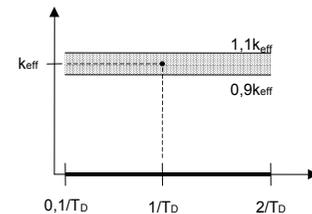


Figura C.20 - Definición de la zona de independencia de la velocidad de carga para un aislador

C14.2.5 Aisladores que dependen de cargas bidireccionales

Cualquier aislador con propiedades isotrópicas como lo son el aislador circular elastomérico o el péndulo friccional, no caen dentro de esta categoría.

NCh2745

correspondiente al desplazamiento de diseño para el caso bidireccional y unidireccional muestran una diferencia mayor al 10%.

14.2.6 Cargas verticales máximas y mínimas

Los aisladores que forman parte del sistema de transmisión de cargas verticales se deben ensayar estáticamente para la carga vertical máxima y mínima y para el desplazamiento máximo total. En estos ensayos la carga vertical combinada $1,2D + 1,0L + |E|_{\max}$ se debe considerar como la carga vertical máxima y la carga vertical combinada $0,80D + |E|_{\min}$ como la mínima fuerza vertical en cualquier aislador de un mismo tipo y tamaño. La carga vertical de un aislador individual debe incluir los incrementos de carga debido al volteo sísmico, $|E|_{\max}$ y $|E|_{\min}$, y se debe basar en la respuesta máxima debida al sismo máximo posible.

14.2.7 Sistema de sacrificio de protección contra el viento

En caso que se utilice un sistema de sacrificio de protección contra el viento, su resistencia final se debe establecer por medio de ensayos.

14.2.8 Ensayo de unidades similares

El comité revisor puede decidir que no se requieren ensayos de prototipos cuando un aislador tiene dimensiones similares y es del mismo tipo y material que el aislador prototipo, el cual se ha probado previamente utilizando la secuencia especificada de ensayos.

Comentarios

C14.2.8 Ensayo de unidades similares

Todos los ensayos de prototipo se deben observar e informar por un laboratorio calificado. Tanto el ingeniero responsable del diseño como los miembros del equipo de revisión deben revisar la información no procesada de los ensayos. En caso de que ensayos idénticos se hayan realizado a dispositivos de dimensiones y materiales iguales, y los dispositivos hayan sido fabricados usando el mismo proceso, el equipo revisor puede determinar que los ensayos anteriores son aceptables. Sin embargo, se

NCh2745	Comentarios
<p>14.3 Determinación de las características fuerza-deformación</p> <p>Las características fuerza-deformación del sistema de aislación se deben basar en los ensayos de carga cíclica de los prototipos especificados en 14.2.3.</p> <p>La rigidez efectiva de un aislador se debe calcular para cada ciclo de carga mediante la ecuación:</p> $k_{ef} = \frac{ F^+ + F^- }{ \Delta^+ + \Delta^- } \quad (11)$ <p>en que F^+ y F^- son las fuerzas positiva y negativa correspondientes a Δ^+ y Δ^-, respectivamente.</p> <p>El amortiguamiento efectivo (β_{ef}) de un aislador se debe calcular para un ciclo de carga mediante la ecuación:</p> $\beta_{ef} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{E_{ciclo}}{k_{ef} (\Delta^+ ^2 + \Delta^- ^2)} \right] \quad (12)$ <p>en que la energía disipada por ciclo de carga, E_{ciclo}, y la rigidez efectiva, k_{ef}, se deben calcular para los desplazamientos Δ^+ y Δ^- del ensayo.</p>	<p>excluye de esto a cualquier dispositivo presente un cambio de propiedad del material o factor que altere su relación.</p> <p>C14.3 Determinación de las características fuerza-deformación</p> <p>El uso de esta expresión de la rigidez secante permite corregir los sesgos introducidos en la definición del punto de carga nula. importante reconocer que esta expresión de rigidez secante difiere conceptualmente de la rigidez equivalente del sistema.</p> <p>La expresión de β_{ef} proviene directamente de la conocida relación de equivalencia entre el trabajo disipado por el sistema y aquel disipado en resonancia por un sistema viscoelástico equivalente:</p> $\beta_{ef} = \frac{E_{ciclo}}{\pi k_{ef} (\Delta^+ ^2 + \Delta^- ^2)} \quad (13)$

NCh2745	Comentarios
<p>14.4 Aprobación del sistema</p> <p>El desempeño de las probetas ensayadas se considerará adecuado si se satisfacen las condiciones siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Los gráficos de fuerza-deformación en todos los ensayos especificados en 14.2 tienen un incremento positivo de su capacidad de carga. 2. Para cada incremento del desplazamiento de ensayo especificado en 14.2.3, ítem 2, y para cada caso de carga vertical especificado en 14.2.3: <ol style="list-style-type: none"> 2.1 No existe una diferencia mayor al 10% entre la rigidez efectiva en cada uno de los tres ciclos de ensayo y el valor promedio de la rigidez efectiva para cada pareja de ensayo. 2.2 No existe más de un 10% de diferencia en el valor promedio de la rigidez efectiva de la pareja ensayada de un mismo tipo y tamaño durante los tres ciclos de ensayos requeridos. 3. Para cada pareja no hay un cambio en la rigidez inicial efectiva mayor al 20% para un número de ciclos no menor a 10 (según 14.2.3, ítem 4). 4. Para cada pareja no hay una reducción en el amortiguamiento inicial efectivo mayor al 20% para un número de ciclos no menor a 10 (según 14.2.3, ítem 4). 5. Todas las probetas de elementos sujetas a cargas verticales del sistema de aislación permanecen estables para el desplazamiento máximo total y la carga estática, como se indica en 14.2.6. 	<p>C14.4 Aprobación del sistema</p> <p>El ensayo de aisladores sísmicos se realiza comúnmente en parejas para evitar la generación de excentricidades en el corte aplicado que implicarían un diseño muy robusto del marco de carga.</p>

NCh2745

14.5 Propiedades para el diseño del sistema de aislación

14.5.1 Rigidez efectiva máxima y mínima

Para el desplazamiento de diseño D_D , la rigidez efectiva máxima y mínima del sistema de aislación, $k_{D\text{máx.}}$ y $k_{D\text{mín.}}$, se deberá basar en los ensayos cíclicos de 14.2.3 y calcular mediante las ecuaciones siguientes:

$$k_{D\text{máx.}} = \frac{\sum |F_D^+|_{\text{máx.}} + \sum |F_D^-|_{\text{máx.}}}{2D_D} \quad (13)$$

$$k_{D\text{mín.}} = \frac{\sum |F_D^+|_{\text{mín.}} + \sum |F_D^-|_{\text{mín.}}}{2D_D} \quad (14)$$

Para el desplazamiento máximo D_M , la rigidez efectiva máxima y mínima del sistema de aislación, $k_{M\text{máx.}}$ y $k_{M\text{mín.}}$, se debe basar en los ensayos cíclicos de 14.2.3 y calcular mediante las ecuaciones siguientes:

Comentarios

C14.5 Propiedades para el diseño del sistema de aislación

C14.5.1 Rigidez efectiva máxima y mínima

La Figura C.21 incluye un ejemplo para la determinación de la rigidez efectiva máxima y mínima para una pareja de aisladores elastoméricos.

En estas ecuaciones las sumatorias se efectúan sobre el número total de aisladores

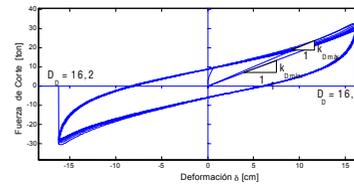


Figura C.21 - Cálculo de la rigidez efectiva (sección máxima y mínima para una pareja de aisladores elastoméricos)

Tabla C.5 - Resumen de propiedades mecánicas de una pareja de aisladores de Figura C.21 para $\gamma = 100$ (columnas 3 a 6)

Ciclo	$2F_D^{(+)}$ ton	$D^{(+)}$ cm	$2F_D^{(-)}$ ton	$D^{(-)}$ cm	k_p t/cm	G kg/cm ²	W_D t-cm	I
1	32,8	16,2	-30,6	-16,2	0,98	5,4	241,0	0
2	31,5	16,2	-29,6	-16,2	0,94	5,2	234,0	0
3	30,7	16,2	-28,8	-16,2	0,92	5,1	229,8	0
4	30,1	16,2	-28,3	-16,2	0,90	5,0	226,4	0
5	29,7	16,2	-27,9	-16,2	0,89	4,9	224,0	0
6	29,3	16,2	-27,4	-16,2	0,88	4,9	224,5	0

NCh2745

$$k_{M\text{máx.}} = \frac{\sum |F_M^+|_{\text{máx.}} + \sum |F_M^-|_{\text{máx.}}}{2D_M} \quad (15)$$

$$k_{M\text{mín.}} = \frac{\sum |F_M^+|_{\text{mín.}} + \sum |F_M^-|_{\text{mín.}}}{2D_M} \quad (16)$$

Para los aisladores en que los ensayos de 14.2.3, 14.2.4 y 14.2.5, hayan indicado que tienen características fuerza-deformación que varíen con la carga vertical, la velocidad de carga o con la carga bidireccional, respectivamente, los valores de $k_{D\text{máx.}}$ y $k_{M\text{máx.}}$ se deberán incrementar y los valores de $k_{D\text{mín.}}$ y $k_{M\text{mín.}}$ se deben reducir, según sea necesario, para acotar los efectos de variaciones en la rigidez efectiva.

14.5.2 Amortiguamiento efectivo

Para el desplazamiento de diseño, el amortiguamiento efectivo del sistema de aislación β_D , se debe basar en los ensayos cíclicos de 14.2.3 y calcular mediante la ecuación:

Comentarios

Las sumatorias se deben calcular nuevamente sobre el número total de aisladores.

El efecto de la carga axial sobre la relación constitutiva fuerza-deformación de un aislador friccional es muy significativo. La Figura C.22 muestra la constitutiva medida de un aislador FPS sometido a un movimiento sísmico en donde se observa el aumento y disminución de la carga máxima como resultado del momento volcane. Los valores de $k_{D\text{máx.}}$, $k_{D\text{mín.}}$, $k_{M\text{máx.}}$ y $k_{M\text{mín.}}$ se deben calcular para los valores extremos del ciclo fuerza-deformación indicado.

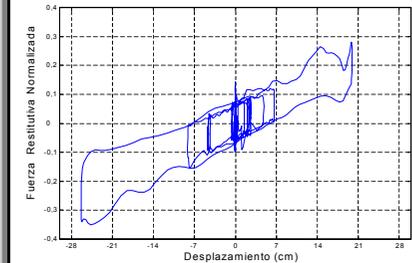


Figura C.22 - Efecto de la carga axial sobre la curva fuerza-deformación medida en un aislador FPS

C14.5.2 Amortiguamiento efectivo

NCh2745	Comentarios
$\beta_D = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\sum E_D}{k_{D\text{máx.}} D_D^2} \right] \quad (17)$	<p>La sumatoria se debe efectuar sobre el número total de elementos de aislación.</p>
<p>En la ecuación (17) la energía total disipada en el sistema de aislación por ciclo de respuesta para el desplazamiento de diseño, $\sum E_D$, se debe considerar como la suma de la energía disipada por ciclo en todos los aisladores, determinada de los ensayos para el desplazamiento, Δ^+ y Δ^-, iguales en magnitud al desplazamiento de diseño, D_D.</p>	<p>Para el ejemplo de Figura C.21, la razón amortiguamiento efectivo resulta de expresión</p> $\beta_{ef} = \frac{W_D}{4\pi W_S} = \frac{230,0}{4\pi \cdot 120,7} = 0,152 \quad (C)$ <p>en que el trabajo disipado promedio $W_D = 230,0$ t-cm y el trabajo elástico promedio es $W_S = 0,92 \cdot 16,2^2 / 2 = 120,7$ (ver Tabla C.4).</p>
<p>Para el desplazamiento máximo, el amortiguamiento efectivo del sistema de aislación, β_M, se debe basar en los ensayos cíclicos de 14.2.3 y calcular mediante la ecuación siguiente:</p>	
$\beta_M = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\sum E_M}{k_{M\text{máx.}} D_M^2} \right] \quad (18)$	
<p>En la ecuación (18) la energía total disipada en el sistema de aislación por ciclo de respuesta para el desplazamiento máximo, $\sum E_M$, se debe considerar como la suma de la energía disipada por ciclo en todos los aisladores, determinada de los ensayos para el desplazamiento, Δ^+ y Δ^-, iguales en magnitud al desplazamiento máximo, D_M.</p>	

Tabla 1 - Coeficiente de destino de la estructura

Categoría del edificio	Destino o funciones de la estructura	Valor del coeficiente ¹⁾
A	Edificios gubernamentales, municipales, de servicios públicos o de utilidad pública (como cuarteles de policía, centrales eléctricas y telefónicas, correos y telégrafos, radioemisoras, canales de televisión, plantas de agua potable y de bombeo, entre otros), y aquellos cuyo uso es de especial importancia en caso de catástrofe (como hospitales, postas de primeros auxilios, cuarteles de bomberos, garages para vehículos de emergencia, estaciones terminales, entre otros).	1,0
B	Edificios cuyo contenido es de gran valor (como bibliotecas, museos, entre otros), y aquellos donde existe frecuentemente aglomeración de personas. Entre estos últimos se incluyen los edificios siguientes: <ul style="list-style-type: none"> - salas destinadas a asambleas para 100 o más personas; - estadios y graderías al aire libre para 2 000 o más personas; - escuelas, parvularios y recintos universitarios; - cárceles y lugares de detención; - locales comerciales con una superficie mayor o igual que 500 m² por piso, o de altura superior a 12 m; - centros comerciales con pasillos cubiertos, con un área total superior a 3 000 m² sin considerar la superficie de estacionamientos. 	1,0
C	Edificios destinados a la habitación privada o al uso público que no pertenecen a ninguna de las categorías A o B, y construcciones de cualquier tipo cuya falla puede poner en peligro otras construcciones de las categorías A, B o C.	1,0
D	Construcciones no destinadas a habitación ni clasificables en ninguna de las categorías anteriores.	1,0

1) Dado que las fuerzas de diseño corresponden a los valores reales observados de demanda elástica sobre la estructura, es consecuente utilizar un factor de importancia idéntico para todas las categorías.

Tabla 2 - Factores de modificación de respuesta por amortiguamiento, B_D y B_M

Amortiguamiento efectivo, β_D o β_M (porcentaje del valor crítico)	Factor B_D o B_M ($T_D > 2s$) Suelos I, II y III
≤ 2	0,65
5	1,00
10	1,37
15	1,67
20	1,94
25	2,17
30	2,38
≥ 50	3,02

Tabla 3 - Factor de amplificación para el sismo máximo posible (Probabilidad de excedencia del PGA igual a 10% en 100 años)

Zona sísmica	M_M
1	1,2
2	1,2
3	1,2

Tabla 4 - Factor de reducción para el diseño de la superestructura

Sistemas estructural básico	Descripción de los sistemas resistentes a las fuerzas laterales	R_f	$h_{máx.}^1$ m ¹⁾
Pórticos	Acero estructural	2,0	35
	Hormigón armado	2,0	35
Muros de corte	Acero estructural	2,0	50
	Hormigón armado	2,0	50
	Albañilería confinada	2,0	15
	Albañilería armada	1,6	12
Sistemas arriostrados	Concéntricos	1,6	35
	Excéntricos	2,0	50
Estructuras en voladizo		1,4	10

1) Estos límites de altura son recomendados; sin embargo, si existen estructuras de mayor altura que no satisfacen este requerimiento de altura, pero cumplen con el código propuesto, ellas se pueden diseñar utilizando aislación sísmica siempre que se realice un análisis dinámico de la estructura y se demuestre que el uso de aislación sísmica no es perjudicial para el comportamiento sísmico de la estructura.

Tabla 5 - Factor que depende de la zonificación sísmica definida en NCh433

Zona sísmica	Z
1	$3/4$
2	1
3	$5/4$

Tabla 6 - Definición del espectro de diseño, SDI

Suelo	T_a , s	T_b , s	T_c , s	T_d , s	T_e , s	T_f , s	$\alpha_A A$, cm/s ²	$\alpha_V V$, cm/s	$\alpha_D D$, cm
I	0,03	0,11	0,29	2,51	10	33	1 085	50	20
II	0,03	0,20	0,54	2,00	10	33	1 100	94	30
III	0,03	0,375	0,68	1,58	10	33	1 212	131	33

Anexo A (Informativo)

Bibliografía

- [1] Almazán, J. L., De la Llera, J. C., and Inaudi, J. A., 1998, *Modeling Aspects of Structures Isolated with the Frictional Pendulum System*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 27, pp. 845-867.
- [2] De la Llera, J. C., and Chopra, A. K., 1994, *Using accidental eccentricity in code-specified static and dynamic analysis of buildings*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 120, p.p. 947-967.
- [3] De la Llera, J. C., Lüders, C. y Leigh, P., 2002, *Design, Testing and Implementation of Seismic Isolation in Chile*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Enviado para publicación Diciembre 2002.
- [4] De la Llera, J. C., and Inaudi, J. A., 1995, *Evaluating the Earthquake Performance of Base Isolated Buildings Using Recorded Motions*, Proceedings of the International Post-Smirt Conference, p.p. 79-105, Santiago, Chile.
- [5] FEMA-273, 1997, *NEHRP Guidelines for Seismic Rehabilitation of Buildings*, Federal Emergency Management Agency, Building Seismic Safety Council, Washington, D.C.
- [6] Fresard, M. y G.R. Saragoni, *Análisis de los Acelerogramas y de los Daños de los Sismos de 1981 en la Zona Central de Chile*. Capítulo IV. pp. F93 - F111, 4tas. Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Abril 1986, Viña del Mar, Chile.
- [7] Garrido J., 2001, *Proposición de Norma para el Diseño Sísmico de Edificios Aislados en la Base*, Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- [8] Holmes, W., and Somers, P., 1996, *Northridge Earthquake of January 17, 1994 Reconnaissance Report*, Earthquake Spectra, Earthquake Engineering and Research Institute, Supplement C to Volume 11, Vol. 1.
- [9] ICBO, 1991, *Division III - Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures*, Chapter 23, *Uniform Building Code*, 1991 Edition, International Conference of Building Officials, Whittier, California.
- [10] ICBO, 1994, *Division III - Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures*, Chapter 16, *Uniform Building Code*, 1991 Edition, International Conference of Building Officials, Whittier, California.

- [11] ICBO, 1995, SEAOC *Seismology Committee Code Change Proposal* for Chapter 16, Division III (Isolation Provisions) of the 1997 UBC, International Conference of Building Officials Whittier, California.
- [12] ICBO, 1997, *Division IV - Earthquake Regulations for Seismic-Isolated Structures*, Chapter 16, *Uniform Building Code*, 1997 Edition, International Conference of Building Officials, Whittier, California.
- [13] Kelly, J. M., 1993, *Earthquake Resistant Design with Rubber*, Springer-Verlag, London, United Kingdom.
- [14] Martín, A., *Hacia una Nueva Regionalización y Cálculo del Peligro Sísmico en Chile*, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 1990.
- [15] Moroni, Sarrazín, Boroschek, 1998, *Experiments on a base-isolated building in Santiago, Chile*, Engineering Structures, Vol. 20, No. 8, p.p. 720-725.
- [16] Naeim, F., and Kelly, J., 1999, *Design of Seismic Isolated Structures: From Theory to Practice*, John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [17] Newmark, N. M. and Hall, W. J., 1982, *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.
- [18] Pan, T., and Kelly, J. M., 1994, *Seismic Response of Torsio, Coupled Base Isolated Structures*, Earthquake Engineering Structural Dynamics, Vol. II, 749-770.
- [19] Reinhorn, A. M., Nagarajaiah, Constantinou, M. C., Tsopelas and Li, R., 1994, *3D-BASIS-7 (Version 2.0): Computer Program for Nonlinear Dynamic Analysis of Three-Dimensional Base Isolated Structures*, Report No. NCEER 0018, National Center Earthquake Engineering Research State University of New York Buffalo, New York.
- [20] Riddell, R., 1995, *Inelastic Dynamic Spectra Accounting for Nonlinear Conditions*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 23, p.p. 1491-1510.
- [21] SEAOC, 1986, *Tentative Seismic Isolation Design Requirements*, Structural Engineers Association of California, San Francisco, California.
- [22] SEAOC, 1990, *Recommended Lateral Force Requirements Commentary*, Fifth Edition, Seismology Committee, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California.
- [23] SEAOC, 1996, *Recommended Lateral Force Requirements Commentary*, Sixth Edition, Seismology Committee, Structural Engineers Association of California, Sacramento, California.
- [24] Schaad, C. y G. R. Saragoni, *Formulas de Atenuación Considerando el Terremoto de Chile de 1985*, Vol. I. pp. 379-388, 5tas. Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Agosto 1989, Santiago, Chile.
- [25] Stagno, P., Frerk, J., Stagno, D., Rendic, P., Iturriaga, W., De la Llera, J.C., Lüders, C., Sady, H., Guendelman, T., Guendelman, M., Lindenberg, J., Astudillo, M. y Boroschek, R., 2002, *Análisis y Diseño del Hospital Militar*, 8vas. Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Valparaíso, Chile, Abril 2002.
- [26] Soong, T. T., and Constantinou, M. C., 1994, *Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*, Springer-Verlag, Wien-New York.
- [27] Zayas, V. A., Low, S. S., and Mahin, S. A., 1987, *The FPS Earthquake Resisting System: Experimental Report*, Report No. UCB/EERC-87/01, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California.