

COMPORTAMIENTO DE COMPONENTES NO ESTRUCTURALES ANTE DIFERENTES ESCENARIOS SÍSMICOS

Hugón Juárez García¹, Carlos E. Ventura², Alonso Gómez Bernal¹ y Elsa Pelcastre Pérez³

RESUMEN

En sismos recientes ha quedado claro que las fallas en Componentes No Estructurales (CNE) involucran impactos económico y de operación severos en los sistemas de infraestructura. En un estudio reciente, acerca del riesgo sísmico, se incluyó el estudio del comportamiento de los CNEs. En este estudio se utilizaron espectros de piso, derivados de escenarios sísmicos, en donde se utilizaron parámetros de desplazamiento, velocidad y aceleración, con el fin de entender las demandas a las que podrían estar sujetas los CNEs. Se utilizaron además algunas técnicas para determinar las propiedades dinámicas de algunos CNEs considerados como importantes para el funcionamiento de un edificio de servicios.

Palabras clave: Comportamiento sísmico, componentes no estructurales, espectro de piso, características dinámicas libres y forzadas, escenarios sísmicos.

ABSTRACT

In recent earthquakes it has become clear that, in addition to the safety related aspects of the seismic performance of Non Structural Components (NSC), the economic impact of the poor or marginal performance of them can be very severe. In this paper, a seismic risk assessment study conducted as part of a major project included the evaluation of the performance of NSCs. The response spectra from the earthquake scenarios are used to compute floor response spectra (acceleration, velocity and displacement) in order to gain a better understanding of the demands experienced by NSCs.

Keywords: Seismic performance, non structural components, floor spectra, free and forced dynamic characteristics, seismic scenarios.

RESUMO

Fica claro que em sismos recentes, as falhas em Componentes Não Estruturais (CNE) envolvem impactos econômicos e de operações severas nos sistemas de infraestrutura. Em um estudo recente, acerca do risco sísmico, incluiu-se o estudo do comportamento dos CNEs. Neste estudo foi utilizado espectros de piso, derivados de cenários sísmicos, utilizando parâmetros de deslocamento, velocidade e aceleração, com a finalidade de entender as demandas que os CNEs poderiam estar sujeitos. Além do mais, foram utilizadas algumas técnicas para determinar as propriedades dinâmicas de alguns CNEs considerados como importantes para o funcionamento de um edifício de serviços.

Palavras-chave: Comportamento sísmico, componentes não estruturais, espectro de piso, características dinâmicas livres e forçadas, cenários sísmicos.

INTRODUCCIÓN

En sismos recientes se ha observado que las condiciones de vida de una región pueden cambiar por completo, como en el sismo de Tohoku, Japón del 11 de marzo de 2011. La cifra de muertos alcanzada fue de 25,000 personas, el tsunami desplazó a 320,000 personas, y la extensión de la pérdida económica se estima en 122 mil millones de dólares, <http://www.webcitation.org/5xLOSexvL>. La problemática es cómo reforzar y recuperar rápidamente los sistemas de infraestructura; este es un problema en el que varios países están trabajando para resolverlo de la manera más conven-

⁽¹⁾ Profesor, Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Edificio P4, 2º Piso, Área de Estructuras. Departamento de Materiales. Av San Pablo 180, Col. Reynosa-Tamps. Del. Azcapotzalco. C.P. 02200. México, D.F. México. Tel: +52 55 5318 9457.

E-mail: hujg@correo.azc.uam.mx, agb@correo.azc.uam.mx, hujg@correo.azc.uam.mx

⁽²⁾ Profesor, University of British Columbia, Civil and Mechanical Engineering Building, Room 2018. 2002 - 6250 Applied Science Lane. Vancouver, B.C. Canada V6T 1Z4. E-mail: ventura@civil.ubc.ca

⁽³⁾ Ingeniero Estructurista, Consultor Independiente. E-mail: ppelsa@hotmail.com

niente posible. El objetivo para cualquier país debería ser elaborar un plan de acción para guiar la identificación de riesgos, implementar medidas de prevención, y cómo responder y reactivar la operación en sistemas de infraestructura, de manera inmediata, sin perjuicio de los usuarios, después de eventos naturales de gran escala.

El daño en los elementos no estructurales dentro de un edificio puede ocasionar efectos adversos en la población afectada por un sismo, y ocasionar que las condiciones de supervivencia disminuyan dramáticamente. Es por esta razón que la evaluación de los CNEs dentro de edificios de servicios se vuelve una acción muy importante para las autoridades locales. Sin embargo, las instalaciones de servicios, como hospitales o subestaciones eléctricas, tienen una gran cantidad de estos elementos (equipos de cómputo, tuberías, relevadores, racks, servidores, etc); y es indispensable proponer metodologías rápidas, efectivas, y económicas, que permitan estimar el riesgo de los CNEs ante sismos u otros eventos naturales. En este trabajo se presenta una metodología para calcular el comportamiento de los CNEs ante sismos.

Los componentes estructurales son los elementos básicos que están diseñados y construidos para soportar y transferir todas las cargas hacia el suelo sobre el cual se desplanta la estructura. Los componentes no estructurales pueden contribuir a la integridad estructural del edificio, dependiendo de su localización dentro de él, su tipo de construcción, y forma de sujeción; pero, estos no son considerados elementos estructurales, (Canadian Standards Association, S832-06). En este trabajo los Componentes No Estructurales (CNEs) se definen como componentes de servicio, operación y funcionalidad (equipo mecánico, de bombeo, componentes eléctricos y de telecomunicación), y contenidos (componentes comunes y especializados).

Este trabajo describe una metodología para evaluar la demanda en CNEs para tres escenarios de sismo. También, se describe el comportamiento sísmico a través de resultados obtenidos en pruebas de mesa vibratoria y de pruebas ambientales de vibración. Se utilizaron tres tópicos en la metodología: (1) evaluación del riesgo sísmico; (2) determinación de características dinámicas y de comportamiento sísmico de CNEs a través de pruebas experimentales (en mesa vibratoria y de vibración ambiental o forzada) y (3) Espectros de piso. La intención de este trabajo es presentar una metodología completa para la determinación de las demandas sísmicas en los CNEs.

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGO SÍSMICO DE CNES

La evaluación del riesgo sísmico de infraestructura incluye la evaluación de sistemas de servicio vitales para cualquier población; en esta evaluación se incluyen a los CNEs que se encuentran dentro de los edificios o instalaciones de servicios. En este trabajo se realizaron cuatro acciones para poder determinar el comportamiento sísmico de los CNEs:

1. Definición del peligro sísmico y los sismos de diseño, a través de escenarios sísmicos.
2. Un inventario de CNEs considerados como importantes, para la operación y funcionamiento del sistema de infraestructura. Además se realizaron las siguientes actividades:
 - Pruebas forzadas y en operación de CNEs.
 - Revisión de pruebas experimentales en mesas vibratorias de CNEs.
 - Procesamiento de datos y caracterización de las propiedades dinámicas y uso de modelos matemáticos adecuados.
3. Obtención de las propiedades dinámicas relevantes de los CNEs considerados como los más importantes.
4. Obtención de la respuesta sísmica de los CNEs a través de calcular espectros de piso para los diferentes escenarios sísmicos.

ESCENARIOS SÍSMICOS

Se seleccionaron tres escenarios sísmicos para la ciudad de Vancouver, en Canadá, y con la determinación del peligro sísmico de la región de estudio (PG-UBC). Estos escenarios están caracterizados por una intensidad instrumental VIII, IX y X, Thibert, (2008) y Juárez García (2010). Las relaciones entre intensidad y respuesta espectral se calcularon con (Cook, 2000; NBCC, 2005 y Wald, 1999), Tabla 1.

Se seleccionaron tres acelerogramas, con las características y recomendaciones del peligro sísmico para PG-UBC propuestas por (Clague, 2001), Tabla 2.

En este trabajo no se consideró el sismo de subducción para la región de Vancouver, ya que el propósito de este estudio fue proponer una metodología para la evaluación de demanda de los CNEs. Una vez que se han definido los escenarios sísmicos, se utilizó un procedimiento para escalar los registros con “wavelets”, en el dominio del tiempo. En este procedimiento el acelerograma se ajusta iterativamente, para hacerlo compatible con el espectro de respuesta

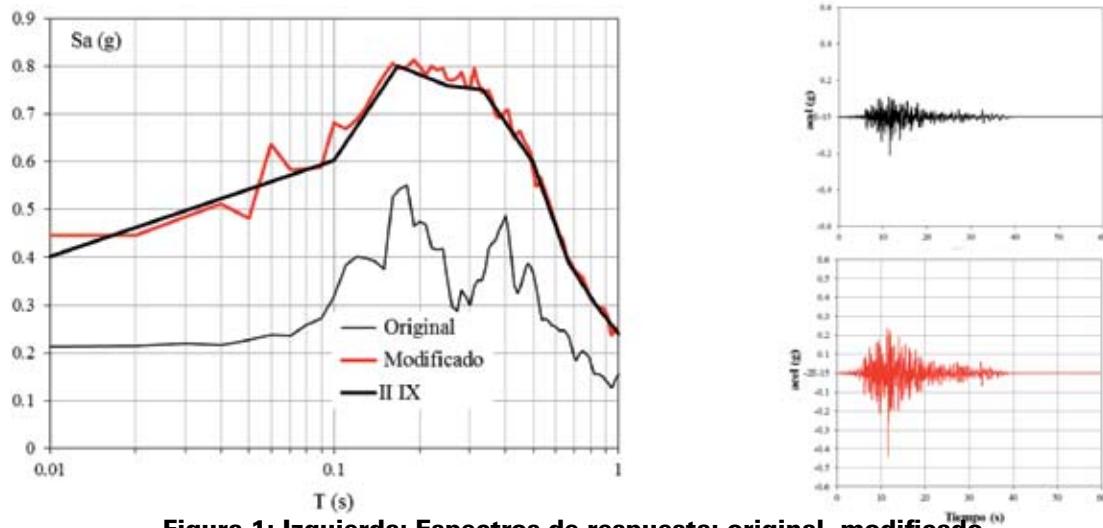
Tabla 1: Valores del espectro de Respuesta para Intensidades Instrumentales VIII, IX y X.

T (seg)	PGA	0.17	0.25	0.33	0.5	0.67	0.83	1	1.17	1.33	1.5	1.67	1.83	2
VIII	0.25	0.5	0.51	0.52	0.41	0.3	0.21	0.19	0.18	0.16	0.13	0.1	0.08	0.07
IX	0.38	0.8	0.76	0.75	0.6	0.39	0.3	0.24	0.21	0.19	0.18	0.17	0.17	0.14
X	0.5	1.04	1	1.02	0.69	0.48	0.38	0.29	0.26	0.24	0.24	0.25	0.24	0.19

Tabla 2: Sismos de diseño de acuerdo con el peligro sísmico.

No	Sismo	Fecha	Magnitud (M _w)	Tipo	Prof (km)	Hipocentro (km)	Duración (seg)	PGA (g)
1	Northridge	17/Ene/1994	6.7	Cortical	18	45	40	0.21
2	Loma Prieta	18/Oct/1989	6.9	Cortical	18	65	40	0.16
3	Cabo Mendocino	1992/Apr/25	7.1	Cortical	10	54	44	0.18

objetivo, añade ondas con intervalos específicos de periodo, (Abrahamson, 1992). A continuación se presenta el espectro correspondiente a una intensidad de IX, y los acelerogramas de Northridge, el original y el modificado, Fig. 1. En este trabajo no se incluirán los espectros para VIII y X, ni los correspondientes acelerogramas de Northridge, Loma Prieta y Cabo Mendocino, originales y modificados.



**Figura 1: Izquierda: Espectros de respuesta: original, modificado y el correspondiente a una intensidad de IX.
Derecha: Acelerogramas: original (negro) y modificado (rojo).**

CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE CNES

Se realizaron 67 mediciones con equipo especializado de vibración, se usó una configuración de 6 sensores con diferentes especificaciones, un martillo y una laptop; los detalles de estas mediciones se pueden encontrar en (EERF 07-08). Se realizaron dos tipos de prueba: una operacional (OP) con los equipos “encendidos”, y otra de vibración forzada (F).

Los equipos mecánicos y eléctricos se probaron en dos condiciones: apagados (off) y encendidos (on). Las tuberías

se probaron con un martillo y un sensor triaxial, en la Fig. 2 se muestra un generador eléctrico y una tubería con las pruebas realizadas.



Figura 2: Configuración de pruebas de vibración en operación y forzadas para distintos CNEs.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN CNES

Las señales que se grabaron fueron procesadas para remover frecuencias altas y bajas, también se removieron tendencias lineales de los registros. Para todos los registros se calcularon los espectros de potencia (PSD), que se documentaron para cada lugar y orientación en los CNEs. Por ejemplo, la Tabla 3 muestra las condiciones de la prueba en dos CNEs, para una muestra en operación y otra forzada; asimismo la Fig. 3 muestra los PSD para el generador eléctrico de la Figura 2.

Tabla 3: Información relevante de la prueba en dos CNEs.

CNE (condición)	ID de la prueba	Muestras por segundo	Duración (segundos)	Condiciones de la prueba
Generador Eléctrico (off)	Res14; Res 22	1600	180	Sensor Triaxial 10G sobre el generador,
	Res 23; Res 24			Sensor Vertical 5G en el piso
	Res 25; Res 26			
	Res 27			
Tubería de aire médico	Res 34	1600	180	Sensor Triaxial 10G en la tubería,
	Res 35			x10 prueba de martillo (forzado),
				3 golpes a: 30", 90", 150"

Se hicieron análisis complementarios utilizando el software del programa ARTeMIS Extractor (2008). Se utilizó el método de descomposición en el dominio de la frecuencia (EFDD), para estimar las frecuencias naturales y el amortiguamiento en algunos de los CNEs, (Brincker *et al.*; 2000 y Brincker *et al.*; 2001). Se obtuvieron tres frecuencias (longitudinal, transversal y vertical); en la Tabla 4 se muestran los valores encontrados utilizando estos procedimientos, (EERF 07-08).

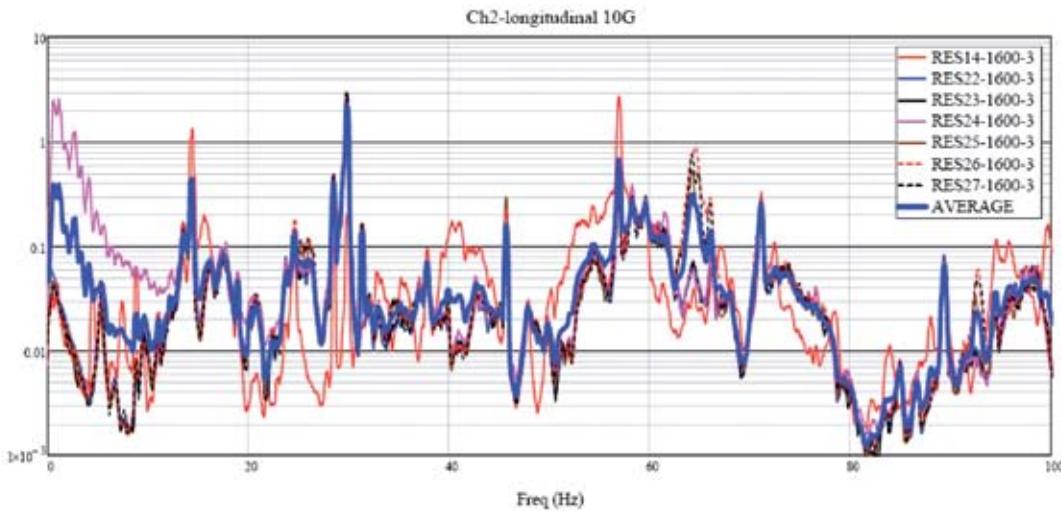


Figura 3: Promedio y resultados de todas las muestras tomadas de la componente longitudinal en el Generador Eléctrico.

Asimismo, se llevó a cabo un estudio de vibración ambiental para tres edificios de servicios, dos hospitales HF-1 y HF-2 y una estación de servicio denominado PH, se obtuvieron frecuencias y períodos de vibración. Estos resultados se muestran en la Tabla 5.

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN MESA VIBRATORIA DE CONTENIDOS

En la Universidad de la Columbia Británica se llevaron a cabo una serie de pruebas, en mesa vibratoria, de contenidos, que fueron probados ante varios movimientos sísmicos. Algunos de estos eventos sísmicos fueron registrados en entrepisos de edificios reales, esta información puede ser consultada en los reportes (EERL 96-002 y EERL 98-006).

En estos proyectos se obtuvieron las frecuencias y el comportamiento de dos repisas utilizadas en la industria eléctrica, (repisas de relevadores, RR), con una especificación de 19" y la otra de 23"; asimismo, se obtuvieron desplazamientos y aceleraciones máximas y mínimas registradas en estos elementos durante diferentes movimientos sísmicos, no se observaron daños en los equipos RR. Los resultados se pueden observar en la Tabla 6 y Tabla 7.

También se probó otro grupo de contenidos con diversos movimientos sísmicos, las características de los componentes se pueden observar en la Tabla 8; y finalmente los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 9.

METODOLOGÍA DE ESPECTROS DE PISO

La metodología de espectros de piso se utilizó en este trabajo para calcular la respuesta de los CNEs y los contenidos que pudieran encontrarse en cualquier punto dentro de un edificio de servicios. Las características dinámicas de un edificio, de CNEs y contenidos se calcularon en este trabajo con las metodologías descritas anteriormente; se utilizaron los acelerogramas modificados que corresponden a los espectros de respuesta de los escenarios sísmicos. Se utilizaron dos sistemas de un grado de libertad para un edificio, cuyo comportamiento se idealizó como elástico y elasto-plástico perfecto, de tal forma que se modeló el posible comportamiento no-lineal del edificio de servicios. Para los tres escenarios sísmicos (Intensidades: VIII, IX y X), se obtuvieron 9 acelerogramas modificados, y se calculó un conjunto de espectros de piso lineales y no-lineales. Los espectros de piso corresponden a espectros de azotea; ya que en un edificio de hospital los componentes no estructurales y contenidos importantes se encuentran ubicados en la azotea o en los sótanos. En el caso de las instalaciones consideradas en este estudio la estación de servicio del hospital se encontraba en la azotea.

Es evidente que para cualquier movimiento sísmico, la respuesta en cualquier piso del edificio será diferente del movimiento del terreno. Con un modelo computacional, y con los acelerogramas, se puede desarrollar un espectro de respuesta en cualquier punto del edificio, y por lo tanto, se puede obtener un espectro de respuesta pico o promedio para todos los acelerogramas considerados.

Tabla 4: Valores de frecuencias y amortiguamiento en CNEs.

Modo	Frecuencia [Hz]	Amortiguamiento [%]	Dirección	CNE
1	4.6	5.6	Transversal	Generador Eléctrico
2	9.0	1.6	Vertical	
3	29.7	0.4	Longitudinal	
1	6.2	3.6	Transversal	Boiler I
2	23.5	0.3	Vertical	
3	29.7	0.3	Longitudinal	
1	3.5	6.0	Longitudinal	Boiler III
2	59.4	No Identificado (NI)	Transversal	
3	NI	NI	NI	
1	5.0	10.0	Transversal	Bomba (diesel)
2	21.7	2.9	Vertical	
3	94.7	0.4	Longitudinal	
1	2.5	NI	Longitudinal	Bomba 3
2	4.3	5	Vertical	
Alto	58.2	0.8	Transversal	
1	1.9	NI	Lateral	Bomba 7
2	3.1	NI	Vertical	
3	10.0	NI	Longitudinal	
1	9.6	NI	Transversal (1)	Tubería de aire médico
2	14.6	NI	Longitudinal	
3	17.9	NI	Transversal (2)	
1	14.4	NI	Transversal (Vertical)	Tubería de gas
2	23.8	NI	Transversal (Lateral)	
3	29.8	NI	Longitudinal	
1	16.0	NI	Canal 1 (Vertical)	Tubería de vapor
2	20.0	NI	Canal 3 (Transversal)	
3	77.0	NI	Canal 2 (Longitudinal)	
1	23.1	NI	Transversal (Lateral)	Tubería de glycol
2	27.5	NI	Transversal (Vertical)	
3	34.7	NI	Longitudinal	

Tabla 5: Frecuencias obtenidas de vibración ambiental en tres edificios importantes.

Edificio	Frecuencia (Hz)	Período (seg)
HF-1	2.2	0.45
PH	7.3	0.14
HF-2	4	0.25

Tabla 6: Propiedades dinámicas y tamaño de dos repisas de relevadores (RR).

Contenido	Tamaño	Frecuencia (Hz) X	Frecuencia (Hz) Y
Repisa de relevador	19"	6.2	13.2
Repisa de relevador	23"	6.9	14.3

Tabla 7: Comportamiento sísmico de los dos RR ante diferentes movimientos sísmicos.

No	Sobrecarga (kg)	Sujetadores	Ac máx (g)		Ac mín (g)		Desp máx (cm)		Desp mín (cm)	
			19"	23"	19"	23"	19"	23"	19"	23"
4	150	Sí (4)	6.02	6.69	-8.07	-6.93	5.2	5.1	-5.3	-4.5
8	150	No	3.27	5.99	-3.45	-6.95	5.2	3.0	-5.0	-2.6
9	227	No	4.21	3.71	-3.75	-5.28	2.9	3.8	-3.0	-3.4
13	227	Sí	1.81	2.53	-1.45	-1.57	1.1	1.0	-0.8	-0.8
17	Equipo	No	6.48	3.59	-5.38	-3.49	2.8	1.7	-2.0	-1.5

Tabla 8: Contenidos ensayados y sus características.

Contenido	Tamaño	Contenido
Archivero	83" (H) x 18" (W) x 36" (L)	Lfc
Archivero	62 x 18 x 36	Sfc
Librero	72 x 12 x 33	Lbs
Librero	47 x 12 x 36	Sbs
Estación de trabajo con repisas		WS
Equipo para WS	3 monitores, 2 charolas de teclado, 2 CPU's de escritorio, 5 CPU's grandes, 2 stands para monitor, una silla de escritorio	
Repisa de internet	33 x 64 x 90	LR
Repisa de comunicación	24 x 31 x 85	CR
Motor de control central	40 x 20 x 91.5	MCC
Librero de 76"	36 x 18 x 76	LLS
Librero de 66"	36 x 26 x 66	SLS
Fotocopiadora con ruedas	48 x 30 x 48	Ph

En muchos casos, la obtención de acelerogramas para un sitio determinado puede ser difícil de estimar, y tal vez sólo se cuente con espectros de diseño o espectros de peligro uniforme de los reglamentos anti-sísmicos. Sin embargo, con los acelerogramas modificados y con el modelo del edificio es posible generar un espectro de piso en cualquier punto; se considera que en ese punto del edificio se ubican una serie de sistemas de un grado de libertad (1GdL) con masas pequeñas, que no afectan el comportamiento global del edificio. Entonces se hace un análisis convencional de espectros de respuesta de todo el edificio, y finalmente se grafica el comportamiento de cada uno de los sistemas de 1GdL.

Tabla 9: Comportamiento de los contenidos ante diferentes sismos.

No	Sismo	Ac (g)	δ arriba (cm)
103	4o piso Hospital de Sylmar (Northridge, 1994, 6.7)	Mesa vibratoria (ST) -1	ST 6
			Lfc -11
			Sfc 12.5
104	Kobe, 1995, 7.2	ST -1	ST -5
			Lfc -7.5
			Sfc 5
304	7o piso Hotel en Van Nuys (Northridge, 1994, 6.7)	ST 0.8	ST -6
		WS 2.8	
305	Kobe, 1995, 7.2	ST -1	ST 8
		WS -2	
306	13º piso edificio en Sherman Oaks (Northridge, 1994, 6.7)	ST -1	ST -5.8
		WS 1.5	
306A	VERTEQ	ST 2.1	ST 8
		WS -4	
404	VERTEQ	ST 2.5	ST 8
		LR 0.8	

ESPECTROS DE PISO PARA LOS ESCENARIOS SÍSMICOS

El procedimiento para obtener el espectro de piso se describe a continuación:

1. Se eligen los espectros de respuesta de diseño (de reglamento, de sitio, de peligro uniforme, etc), en este caso se seleccionaron tres espectros de respuesta que corresponden a intensidades: VIII, IX y X.
2. Se seleccionaron tres acelerogramas de sismos con las mismas características de las zonas sismogénicas, en este caso: Northridge, Loma Prieta y Cabo Mendocino.
3. El edificio o la instalación de interés se modeló como un sistema 1GdL, se consideraron comportamientos lineal y no-lineal; es decir, comportamiento elástico y elasto-plástico perfecto, los detalles se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10: Comportamiento elástico y elasto-plástico perfecto del 1GdL.

Comportamiento del sistema de 1GdL	Peso (W)	Period (T)	Amortiguamiento (ξ)	Cortante basal (Vb)
Elástico	49,000 kN	0.45 seg	5 %	NA
				0.6 x W

Se seleccionó un ancho de frecuencias de 1 a 100 Hz para realizar el ajuste de los espectros, se utilizó RSPMATCH para producir los nuevos acelerogramas.

Se produjeron un total de 9 acelerogramas. Por ejemplo: el acelerograma de Northridge se utilizó para modificarlo, y obtener otro utilizando el espectro de respuesta correspondiente a una intensidad de VIII, el mismo procedimiento se hizo para los acelerogramas de Loma Prieta y Cabo Mendocino.

Los 9 acelerogramas generados se utilizaron para aplicarlos en el edificio o instalación de interés, modelado como un sistema de 1GdL. De esta forma se obtuvieron 18 espectros de piso (en la azotea del edificio): 9 con comportamiento lineal y 9 con comportamiento no-lineal

RESULTADOS DE LOS ESPECTROS DE PISO

En la Figura 4, izquierda, se muestran los resultados de los espectros de piso, considerando el comportamiento del edificio de servicios como lineal; en el intervalo de frecuencias de 2 a 4 Hz se observan picos de aceleración de hasta 8.5 g. Los espectros de piso se calcularon con un amortiguamiento del 2 %, ya que muchos de los equipos y contenidos están apoyados en soportes de acero. Sin embargo, en algunos casos los apoyos en los CNEs son apoyos mecánicos especiales que alcanzan hasta 10 % de amortiguamiento. En la Figura 4, derecha, se muestran los espectros de piso para el edificio de servicios modelado como un sistema 1GdL con comportamiento elasto-plástico perfecto, los acelerogramas que se obtuvieron para intensidades IX y X, en el caso de Loma Prieta, fueron los únicos que provocaron comportamiento no-lineal.

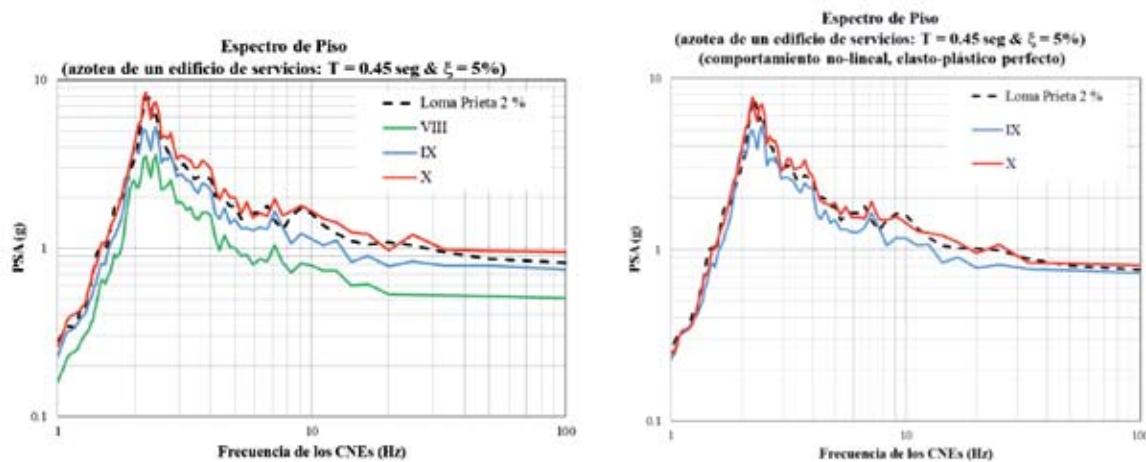


Figura 4: Espectros de piso para la azotea de un edificio de servicios.
Izquierda: lineal. Derecha: no-lineal.

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE CNEs

El comportamiento sísmico de los CNEs deberá caracterizarse con sus propiedades dinámicas y con los Espectros de Piso. Para estos resultados, no se consideró el daño que pudieran sufrir los CNEs asociados a los altos niveles de aceleración. En el caso de las repisas de relevadores no se apreciaron daños, a pesar de que alcanzaron niveles de aceleración por arriba de los 8 g's, en pruebas de mesa vibratoria. Los valores obtenidos en la Tabla 11 están basados en equipo especializado de hospitales, con relativamente masas grandes, apoyos especializados con resortes y almohadillas de vibración.

La Tabla 12 muestra el comportamiento sísmico, al menos en el límite inferior, para una colección de contenidos; estos valores forman parte de pruebas en mesas vibratorias. Los valores de aceleración que se obtuvieron en este estudio corresponden a: 0.45 g (VIII); 0.60 g (IX) y 0.80 g (X). Es importante considerar que el comportamiento de los contenidos también depende de sus propiedades dinámicas; los valores obtenidos se determinaron en contenidos que no tenían anclajes especiales, y corresponden a muebles y artículos convencionales que se pueden encontrar en cualquier tipo de oficina.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El edificio HF-1 es un hospital de 4 niveles y una superficie de más de 1000 m² por nivel. Alberga una unidad de emergencias en la planta baja, y pisos de especialidades y salas de operación. En la zona en la que se encuentra se considera que será un edificio de apoyo ante emergencias naturales, como es el caso de un sismo. La población en esta zona es consciente que ante contingencias naturales, el hospital HF-1 es un lugar donde pueden encontrar servicios de cocina y baños. El edificio cuenta con CNEs que son vitales para su funcionamiento. En la Planta baja, afuera de las instalaciones del edificio, se encuentra un tanque de almacenamiento de agua, dos bombas, y un tanque de diésel para operar las bombas de emergencia.

Tabla 11: Nivel de aceleración en g's para varios CNEs con tres intensidades sísmicas.

CNEs	Frec (Hz)	ξ (%)	VIII ac (g)		IX ac (g)		X ac (g)		Acelerograma modificado
			Lineal	No-Lineal	Lineal	No-Lineal	Lineal	No-Lineal	
Generador Eléctrico	4.6	5.6	0.79	0.79	1.18	1.17	0.154	1.53	Northridge
				1.20	1.73	1.7	2.26	1.86	Loma Prieta
				2.97		4.56	5.48	1.65	Cabo Mendocino
Boiler I	6.2	3.6		0.83		1.32	1.63	1.6	Northridge
				0.86	1.34	1.25	1.63	1.54	Loma Prieta
				1.55		2.15	2.89	1.48	Cabo Mendocino
Bomba 7	1.9	NA	2.87	2.87	4.35	4.28	5.52	5.27	Northridge
				2.23	3.24	3.2	3.12	2.95	Loma Prieta
				0.19		0.17	0.21	5.18	Cabo Mendocino
Bomba (PB)	5	10		0.52		0.8		1.05	Northridge
				0.50		0.78		1.02	Loma Prieta
				0.51		0.76		1.01	Cabo Mendocino
Tubería glycol	23	NA		0.58	0.87	0.84	1.07	0.95	Northridge
				0.53	0.83	0.81	1.2	1.07	Loma Prieta
				0.59		0.77	1.05	0.75	Cabo Mendocino
Tubería aire médico	9.6	NA		0.81	1.17	1.08	1.45	1.27	Northridge
				0.79	1.14	1.16	1.66	1.43	Loma Prieta
				1.12		1.67	2.13	0.92	Cabo Mendocino
Repisa de relevador	6.5	NA		0.79	1.31	1.27	1.69	1.6	Northridge
				0.83	1.30	1.35	1.56	1.51	Loma Prieta
				1.43		2.10	2.77	1.41	Cabo Mendocino

Tabla 12: Comportamiento sísmico de contenidos.

Contenido	Comportamiento sísmico	Ac de piso (g)	δ de piso (cm)
Librero grande	Se volteará a:	1	6
CPU	Se volteará a:		
Monitores	Se volteará a:	2+	8
Libros	Se caerá del librero a:		
Repisa LAN	Se moverá en diferentes direcciones a:	2.5	8

Asimismo cuenta con un gran número de CNEs en la azotea, en lo que se conoce como planta de respaldo. Allí se encuentran 2 generadores eléctricos de respaldo, un tanque de diésel para operar los generadores de respaldo, tinacos de agua, boilers para agua caliente y generadores de vapor, tuberías médicas especializadas y bombas de agua y de diésel; además de un gran número de tuberías especializadas que transportan agua, vapor, aire médico, etcétera. Se consideró que la parte más importante del edificio era la azotea donde se albergaban un buen número de CNEs, como los que se describen en este trabajo. La falla de uno o varios de ellos podría ocasionar la pérdida de funcionalidad del hospital.

De acuerdo con (Restrepo y Rodríguez, 2012), en su propuesta para evaluar fuerzas sísmicas máximas en diafragmas y apéndices rígidos de edificios, en donde se consideran los efectos de los modos superiores; proponen el uso de las siguientes fórmulas para el cálculo de aceleraciones máximas en losas y apéndices rígidos:

$$\Omega_n = \frac{F_i}{(W_n a_o)} \quad (1)$$

$$\Omega_i = 1 + \frac{h_i}{H} (\Omega_n - 1) \quad (2)$$

En estas ecuaciones la nomenclatura es:

Ω_i factor de amplificación de aceleraciones del nivel i

m_i masa del nivel i

a_o valor de aceleración del terreno que corresponde a $T = 0$

h_i altura, sobre el terreno, de la masa i para la que se calcula una fuerza horizontal

H altura total del edificio

Ω_n factor de amplificación de aceleraciones del nivel n

Este procedimiento se aplicó directamente al edificio HF-1, y se encontraron los siguientes valores, utilizando $H = 20$ m; a_o corresponde a la aceleración pico del terreno, Tabla 13.

Tabla 13: Aceleraciones máximas en la azotea del edificio HF-1.

Obtenidos de fórmulas (1) y (2)					Obtenidos de espectros de piso, para CNEs % g						
Nivel	h_i/H	Ω_n	Ω_i	% g	I = VIII		I = IX		I = X		
					PGA = 0.25	a _{máx} 2.9	a _{mín} 0.2	a _{máx} 4.6	a _{mín} 0.2	a _{máx} 5.5	a _{mín} 0.2
4	1	1.6	1.6	2.6							
3	0.75	1.2	1.2	1.4							
2	0.5	0.8	0.9	0.7							
1	0.25	0.4	0.9	0.3							

Es claro que el desarrollo de espectros de piso permite utilizar acelerogramas adecuados al sitio en cuestión, y obtener demandas de aceleración a las que estarían sujetos los CNEs; así, en la Tabla 13, se muestra que las aceleraciones máximas en la losa o en apéndices rígidos alcanzaría unos 2.6 g; mientras que utilizando historias de tiempo y espectros de piso adecuados, se observan aceleraciones máximas de 2.9 g (I = VIII), 4.6 g (I=IX) y 5.5 g (I = X). En pruebas de laboratorio, utilizando las aceleraciones registradas en edificios reales y mesas vibratorias, se pudieron obtener aceleraciones en CNEs de hasta 8 g.

Para cálculo de aceleraciones en pisos y diafragmas rígidos la fórmula de (Restrepo y Rodríguez, 2012) es una propuesta razonable; ya que para el caso de la Ciudad de México supone un aceleración máxima de 2.6 g para cualquier CNE que estuviera anclado sobre la azotea del edificio HF-1. Cabe señalar que esa propuesta está basada para la Ciudad de México, donde las características del terreno, y del tipo de sismos que ocurren, hacen que las aceleraciones máximas, no sean tan grandes como en el caso de la Ciudad de Vancouver, Canadá. Sin embargo, la metodología podría usarse para derivar expresiones como las que se proponen en (Restrepo y Rodríguez, 2012), para el caso de Vancouver, o cualquier otra parte del mundo.

Por otro lado, el uso de los espectros de piso, y acelerogramas escalados, para determinar las demandas a las que podrían estar sujetos los CNEs están justificados. Porque estos sólo se aplicarían a edificios especializados, que son parte de un sistema de infraestructura crítica, como lo son las redes de hospitales. En resumen, deberían prepararse expresiones del tipo que proponen (Restrepo y Rodríguez, 2012), para todo tipo de edificios (Tipo B, de acuerdo a las NTC), y además el uso de espectros de piso y análisis más refinados para el caso de estructuras esenciales (Tipo A, de acuerdo a las NTC).

Las demandas sísmicas en los CNEs que se encuentran en los edificios de servicios pueden ser muy diferentes de las demandas sísmicas de los elementos estructurales, en algunas ocasiones las demandas pueden ser mucho más grandes. Es por esto, que es muy importante evaluar las demandas sísmicas en los CNEs y en los contenidos de edificios e instalaciones de servicios de infraestructura. Por ejemplo, considere la estación de bombeo de agua potable, como parte del sistema global de agua potable, y aquellas bombas de agua que provén agua presurizada a un hospital. En este ejemplo, si las bombas se dañan debido al nivel de movimiento sísmico, el sistema de agua quedará inoperable, y por lo tanto algunos sectores de la ciudad quedarán sin suministro de agua, y el hospital no podrá atender a los heridos por causa del terremoto.

De alguna forma este estudio muestra el valor de las pruebas experimentales de campo y laboratorio para evaluar el riesgo sísmico de los CNEs y los contenidos; así, es importante conocer las propiedades de estos elementos. El problema es que hay una gran cantidad de este tipo de elementos en un edificio o instalación de servicios, y se hace necesario desarrollar una metodología que permita evaluarlos de una manera rápida, económica y confiable.

En muchos países se han desarrollado metodologías para evaluar este tipo de elementos; sólo por mencionar algunos trabajos desarrollados en EUA podemos citar a (Miranda y Taghavi, 2003) que desarrollaron una base de datos de CNEs y contenidos de edificios comerciales con información de su desempeño sísmico; asimismo, el ATC-58 toma en cuenta el comportamiento de los CNEs en la estimación global de desempeño sísmico de los edificios. Esto es sólo un ejemplo de los trabajos que se han desarrollado en EUA, pero hay muchos investigadores a nivel internacional que han trabajado en el comportamiento de CNEs y contenidos de edificios.

El espectro de piso es un buen concepto y herramienta para estimar aceleraciones, velocidades o desplazamientos que podrían presentarse en diversos CNEs. Sin embargo, debemos estar conscientes de las limitaciones de estos procedimientos para predecir el comportamiento sísmico de los edificios, los Componentes No Estructurales y, en general, de los sistemas de infraestructura. A continuación se presentan algunas observaciones y comentarios:

COMPORTAMIENTO DE LOS EDIFICIOS

Para edificios medianos y altos, debe hacerse un estudio de efectos P-Δ, con el fin de investigar los posibles efectos en la respuesta de los edificios.

Las condiciones del suelo también afecta el comportamiento de los edificios, y por consiguiente la respuesta de los CNEs.

ESPECTROS DE PISO

1. La selección del ancho de frecuencias para el ajuste de los espectros de diseño es muy importante. En este trabajo el ancho de banda de frecuencias seleccionado fue de 1 a 100 Hz, de tal forma que se buscó cubrir toda la población de CNEs dentro de un edificio
2. El ajuste de espectro debe realizarse considerando el comportamiento elástico del edificio, así como su posible comportamiento no-lineal, y por tanto los cambios que pudiera presentar el edificio en su periodo.

AGRADECIMIENTO

Los autores desean agradecer a los revisores por sus comentarios y sugerencias que ayudaron a enriquecer este trabajo.

REFERENCIAS

Abrahamson, N.A. (1992). "Non-stationary Spectral Matching," *Seismological Research Letters*, Vol. 63, No. 1, 1992, pp. 30.

Abrahamson, N.A. (2008). "Spectral Matching Using RSPMATCH," *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV*, Geotechnical Special Publication No. 181, ASCE-Geo-Institute, Sacramento, Calif.

Artemis Extractor Pro (2008). Release 4.1 Software, *Structural Vibration Solutions, Inc.*, ©1999-2007.

ATC (2007). "Guidelines for Seismic Performance Assessment of Buildings", ATC-58 (draft), Applied Technology Council, Redwood City, CA, pp. 262.

Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P. (2000). "Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition", *18th International Modal Analysis Conference*, San Antonio, Texas, USA.

Brincker, R., Ventura, C.E., and Andersen, P. (2001). "Modal Damping by Frequency Domain Decomposition" *Procs. of the XIX International Modal Analysis Conference*, Orlando, Florida, USA.

Clague, John J. (2001). "The Earthquake Threat in Southwestern British Columbia", *Office of Critical Infrastructure Protection and Emergency Preparedness*, Government of Canada, Ottawa, Ontario, Canada.

Cook, S. E. (1999). "Evaluation of non-structural earthquake damage to buildings in Southwestern BC.", *MSc. Thesis*, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC.

Earthquake Engineering Research Facility, Technical Report no. 07-08 (2008). "Dynamic Characteristics of Non-Structural Components in Critical Infrastructure in UBC", University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Earthquake Engineering Research Lab, Technical Report no. 96-002 (1996). "BC Tel Seismic Rated Relay Rack Testing", University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Earthquake Engineering Research Lab, Technical Report no. 98-006 (1998). "Shake Table Testing of functional and Operational Components of Buildings", University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Earthquake Engineering Research Facility, Technical Report no. 00-04 (2000). "Evaluation of Non-Structural Earthquake Damage to Buildings in Southwestern BC", University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Earthquake Engineering Research Facility, Technical Report no. EERF 08-02, (2008), "Seismic performance of two isolation systems", University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Juárez García, H. (2010). "Multi-Hazard Risk Assessment for Critical Infrastructures: An Interdependency Approach.", *Ph.D. Thesis* submitted to Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Canada.

Juárez García H. and Ventura C. E. (2008). "Seismic performance of Operational and Functional components (OFCs): Field Observations and Shake Table Testing", *Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering*, S20-015, Beijing, China.

Juárez García H. and Ventura C. E. (2010). "Improving the dynamic performance of OFCs during extreme vibration conditions", *Proceedings of the 9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Toronto, Ontario, Canada, Artículo No. 744.

Miranda, E and Taghavi, S. (2003). "Response Assessment of Nonstructural Building Elements", *Pacific Earthquake Engineering Research Center*, University of California Berkeley, California, USA.

NRC (2005). "National Building Code of Canada, 2005" (NBCC 2005), National Research Council of Canada, Ottawa, Ontario, Canada.

Restrepo, J.I. y Rodríguez, M.E. (2012). "Prácticas y Diseño Sísmico de Edificios en México – Cambios Necesarios", *Revista Ingeniería Sísmica*, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, 2012, No. 86, pp. 89-117.

S832-06 (2006). "Seismic Risk reduction of Operational and Functional Components (OFCs) of Buildings", Canadian Standards Association. Mississauga, Ontario, Canada.

The Response Spectrum (2007). “A Technical Seminar on the Development and Application of the Response Spectrum Method for Seismic Design of Structures. Lecture 7: Floor Response Spectrum”, Canadian Society of Civil Engineering-Vancouver Section, Vancouver, Canada.

Thibert, K. M. (2008). “A Methodology for Assessing the Seismic Risk of Buildings”, *MSc. Thesis*, Department of Civil Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada.

Wald, D.J., Quitoriano, V., Heaton, T.H. and Kanamori H. (1999). “Relationship between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California”, *Earthquake Spectra*, Volume 15, No. 3, August, USA.