

EVALUACIÓN SISMORRESISTENTE DE EDIFICIOS ESCOLARES EN VENEZUELA

OSCAR A. LÓPEZ¹, ÁNGELO MARINILLI¹, RICARDO BONILLA¹, NORBERTO FERNÁNDEZ¹, JEAN DOMÍNGUEZ²,
GUSTAVO CORONEL D.¹, TRINO BALOA¹ Y RAMÓN VIELMA³

¹ Universidad Central de Venezuela, IMME, Facultad de Ingeniería,

² FUNVISIS (Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas), MPPCyT

³ FEDE, Ministerio del Poder Popular para la Educación

RESUMEN

Este trabajo describe la metodología seguida y los resultados obtenidos hasta la fecha en un proyecto que tiene como finalidad evaluar y reducir el riesgo sísmico de las escuelas existentes en Venezuela. El 70% de alrededor de 28.000 planteles escolares en Venezuela están en áreas de elevada amenaza sísmica. Aproximadamente el 46% de 18.685 planteles identificados e incorporados dentro de un sistema de información geográfica, fueron construidos con normas antiguas que no satisfacen los requerimientos sismorresistentes exigidos en las normas vigentes. Un edificio construido con la norma de 1955 resistiría en término medio movimientos sísmicos aproximadamente tres veces menos intensos que uno construido con las normas modernas. Un total de 586 edificios escolares pertenecen a tres tipologías estructurales de elevada vulnerabilidad; de estos, 479 son edificios similares o idénticos a los derrumbados en Cariaco durante el terremoto de 1997. Se desarrolló un instrumento de inspección rápida y evaluación de la vulnerabilidad de escuelas y se aplicó a 131 edificios escolares. Se seleccionaron 10 edificios para proyectos piloto de adecuación y reforzamiento sismorresistente. Se propone el diseño de estructuras auxiliares que soporten la mayor parte de las cargas sísmicas, conectadas con los diafragmas de la edificación existente y apoyadas sobre nuevas fundaciones. Se midieron las propiedades dinámicas de las escuelas piloto mediante técnicas de vibración ambiental, que serán repetidas después del refuerzo sismorresistente; cuatro escuelas del Estado Sucre fueron seleccionadas para la instalación permanente de sensores que midan su respuesta ante sismos futuros.

Palabras clave: Escuelas, Edificios escolares, Vulnerabilidad sísmica, Adecuación estructural, Reducción de riesgo

SEISMIC EVALUATION OF SCHOOL BUILDINGS IN VENEZUELA

ABSTRACT

This paper describes the methodology and results obtained so far in a program aiming to evaluate and reduce the risk of existing schools in Venezuela. 70% of the about 28,000 Venezuelan schools are in high seismic hazard regions. About 46% of the 18,685 schools identified and incorporated into a geographical information system, were built with old codes that do not satisfy the seismic requirements implied in current codes. A building built according to the 1955 code would resist in the average a seismic motion that is about three times less intense than one built with modern codes. A total of 586 school buildings belong to three structural types of high vulnerability; 479 of these are similar or equal to the ones collapsed in Cariaco during the 1997 earthquake. An instrument for the rapid inspection and evaluation of the vulnerability of schools was developed and applied to 131 buildings. Ten schools were selected as pilot projects for seismic retrofitting. Auxiliary structures are proposed to support most of the seismic loads, connected to the existing building by the floor slabs acting as diaphragms and supported by new foundations; drift demands are kept below 0.7% to protect the capacity of the existing structure to support gravity loads. The dynamic properties of the selected schools were determined from ambient vibration tests, which will be repeated after retrofitting; four schools in the Sucre State were selected for the permanent installation of sensors to record its response to future earthquakes.

Keywords: Schools, School buildings, Seismic vulnerability, Structural retrofitting, Risk reduction.

ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

Edificios escolares se han derrumbado frecuentemente durante terremotos recientes. Unos pocos ejemplos son el terremoto de Bhuj de 2001 (Mw = 7,7) en India, donde murieron 971 estudiantes y 31 maestros (Jain 2004), el terremoto de Kashmir de 2005 (Mw = 7,6) en Pakistán donde murieron cerca de 19.000 niños, la mayoría de ellos en el derrumbe de edificios escolares que fueron afectados

en una proporción mucho mayor que otros edificios (EERI 2006), y el terremoto de Sichuan en 2008, China, (Mw = 7,9) que destruyó por lo menos 6.898 escuelas matando miles de alumnos y maestros; el Ministerio de la Vivienda y Desarrollo Rural de China ha ordenado a las autoridades locales que investiguen los colapsos (EERI 2008).

De siete edificios de concreto reforzado que se derrumbaron durante el terremoto (Mw = 6,9) de Cariaco de 1997 en el Estado Sucre, cuatro fueron edificios escolares. Los edificios derrumbados son representativos

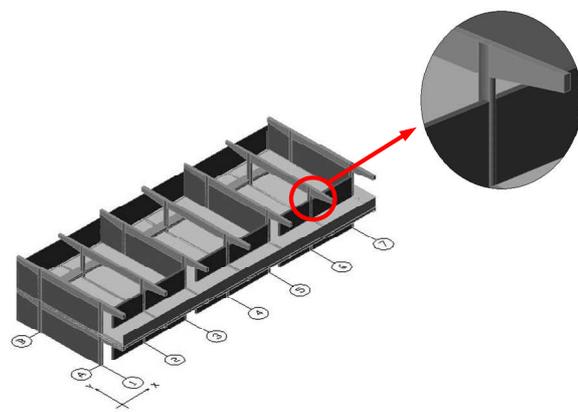
de dos tipos de escuelas construidos hace varias décadas: El tipo Antiguo I y el tipo Cajetón. Las fallas fueron principalmente el resultado de deficiencias estructurales que son comunes en estructuras construidas con las normas antiguas: poca resistencia, rigidez y capacidad de disipación de energía, y columnas cortas creadas por paredes de relleno que potencian los modos de falla frágil (IMME, 1998; López et al. 2007). Cuatro edificios escolares del tipo Antiguo I ya habían mostrado daños en columnas cortas durante otros eventos sísmicos, algunos de magnitud moderada, en 1974 ($M_s=6,1$) en Carúpano, Estado Sucre; en 1981 ($m_b=5,5$) en San Antonio del Táchira, Estado Táchira; en 1986 ($M_s=6,1$) en El Pilar, Estado Sucre; y en 1991 ($m_b=5,3$) en Arenales, Estado Lara (López 2008). En la figura 1 se muestra la fotografía y un esquema de la estructura de un edificio del tipo Antiguo I que es prácticamente idéntico al que colapsó en Cariaco; allí se puede apreciar en la dirección larga del edificio la ausencia de vigas y la presencia de columnas cortas. Se estima que hay en el país varios centenares de edificios escolares pertenecientes a los mismos tipos que colapsaron en Cariaco. Adicionalmente, la mayoría de los aproximadamente 28.000 planteles escolares del país están constituidos por edificios que fueron construidos hace varias décadas, usando normas antiguas de diseño estructural que hoy son reconocidas como insuficientes para suministrar una protección confiable contra movimientos sísmicos. Con esta motivación se inició un proyecto de alcance nacional para la reducción del riesgo sísmico en

edificios escolares existentes en Venezuela. El proyecto de tres años de duración cuenta con la participación del IMME (Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela), FEDE (Ministerio del Poder Popular para la Educación) y FUNVISIS (Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas) con el apoyo financiero del FONACIT (Ministerio del Poder Popular para la Ciencia y la Tecnología). El proyecto constituye un esfuerzo para proteger las vidas de niños, jóvenes y maestros y garantizar la seguridad de los espacios educativos de las comunidades. La Fundación de Edificaciones y Dotaciones Educativas (FEDE) en su rol de organismo a cargo de la planta física de las instituciones educativas de la nación, planifica el fortalecimiento de los edificios escolares para garantizar la estabilidad estructural y la seguridad de sus ocupantes. Algunos objetivos específicos del proyecto son identificar las características estructurales de los edificios escolares existentes en el país, generar mapas de daños y pérdidas esperadas en eventos futuros, desarrollar soluciones óptimas de adecuación estructural en 10 planteles piloto, instrumentar edificios escolares a fin de registrar su respuesta ante eventos futuros, y preparar a las comunidades educativas ante estos eventos. El Proyecto se desarrolla con personal de las tres instituciones descritas y con estudiantes de pregrado y postgrado que desarrollan sus trabajos de grado en actividades específicas, poniendo la academia al servicio de las necesidades inmediatas del país.

En este artículo se presenta la metodología y los resultados obtenidos hasta la fecha en el Proyecto.



a) Fachada lateral



b) Esquema estructural (López et al. 2007)
(No se muestra el techo)

Figura 1. Escuela tipo Antiguo I, similar a la derrumbada en Cariaco en 1997.

COMPILACIÓN DE INFORMACIÓN BÁSICA DE EDIFICIOS ESCOLARES

Los puntos mostrados sobre el mapa de Venezuela de la figura 2 muestran la localización de los 18.685 planteles escolares que han sido incorporados dentro de un Sistema de Información Geográfica (SIG); en la misma figura se muestran las siete zonas sísmicas del país, que van desde la Zona 0 donde no se considera

amenaza sísmica hasta la Zona 7 de máxima amenaza (COVENIN 2001). Aproximadamente el 70 % de los planteles están ubicados en zonas de alta amenaza sísmica, con aceleraciones del terreno que varían entre 0,25g a 0,40g para períodos de retorno de 475 años.

Aún cuando en la base de datos del Ministerio de Educación existe abundante información relativa a los aspectos educativos de cada plantel, no se dispone sin embargo de la información necesaria para poder cuantificar

los aspectos sismorresistentes de los edificios escolares. Es obvio que las características a compilar pudieran obtenerse de los planos estructurales y arquitectónicos de cada edificio, si estuvieran disponibles para los diversos tipos de escuelas construidos en el país. Sin embargo, estos planos sólo se han encontrado para unos pocos tipos constructivos. Es necesario por tanto identificar los tipos de construcción, especialmente los más antiguos, y compilar información básica en relación con las características estructurales que influyen en el desempeño sismorresistente, para cada uno de los edificios escolares en el país. Esta información permitiría desarrollar un catálogo estructural a escala nacional de los edificios escolares, sobre una plataforma de información geográfica. Con esta

finalidad se decidió desarrollar la estrategia de búsqueda de información que se describe a continuación. En una primera etapa los tres tipos escolares más antiguos y vulnerables y de carácter repetitivo, fueron identificados a través de las oficinas locales de FEDE que están ubicadas en cada uno de los 24 estados del país. Se enviaron fotografías e imágenes digitales de estos tres tipos, que incluían a los que fallaron catastróficamente en Cariaco en 1997. Esto produjo una base inicial de datos de 586 edificios escolares, con información relacionada con nombre, ubicación, tipo de construcción, población escolar y zona sísmica. Se identificaron 103 del tipo Antiguo I (figura 1), 376 del tipo Cajetón (figura 7b), éstos son los tipos derrumbados en Cariaco, y 107 del tipo Antiguo II construidos en las décadas de 1950 y 1960.

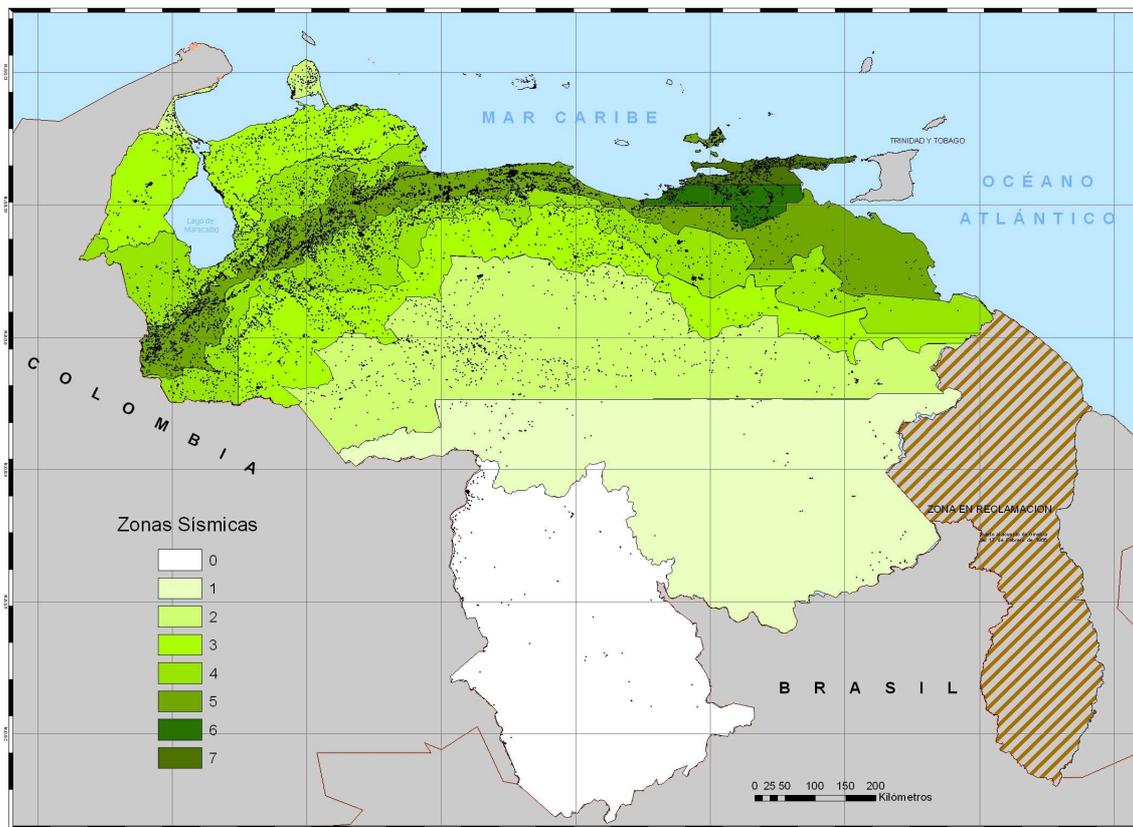


Figura 2. Localización de planteles escolares sobre el mapa de zonificación sísmica de Venezuela.

En una segunda etapa se utilizó el Censo Escolar Nacional del año 2006-2007 llevado a cabo por el Ministerio del Poder Popular para la Educación, para recolectar información relativa a la vulnerabilidad sísmica (figura 3); la información fue recolectada por 4.000 estudiantes de secundaria apropiadamente instruidos con la intención de compilar información educacional así como cierta información estructural básica, para todas las escuelas en el país: Año de construcción, número de pisos, ubicación, población escolar y tipo de construcción; la última se identifica con la ayuda de dibujos y fotografías que describen

los tipos de construcción erigidos en el siglo XX. En las imágenes de la figura 3 se puede notar que los Tipos 7, 10 y 11 son los denominados Antiguo I, Cajetón y Antiguo II, respectivamente. El Censo de 2007-2008 que produjo información similar se ha completado usando *Internet*. La información recopilada se incorpora dentro del SIG, desarrollado originalmente por FEDE, actualizado y mejorado, para representar mapas temáticos. El SIG está ideado para generar una herramienta integrada que simule la ocurrencia de terremotos y estime daños y pérdidas para los aproximadamente 28.000 planteles escolares del país.

De los 18.685 planteles escolares identificados hasta la fecha, un 46% fueron construidos antes de 1982, con normas de diseño sismorresistente considerablemente menos exigentes que las normas modernas.

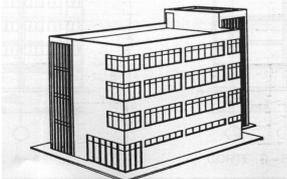
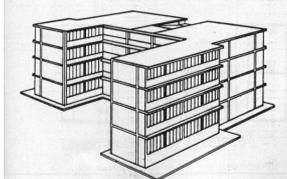
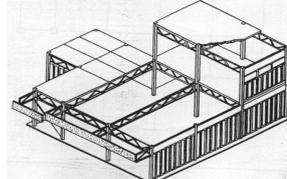
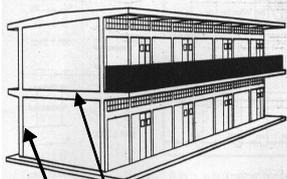
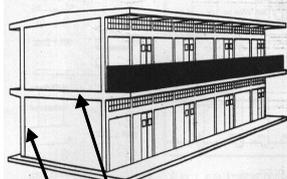
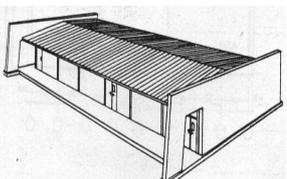
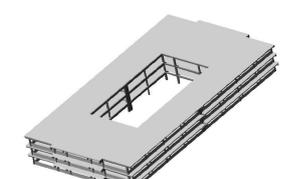
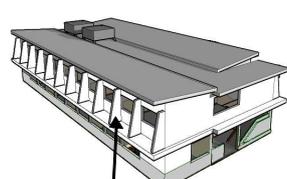
22. NÚMERO DE EDIFICIOS				
Número de edificios: _____				
23. NÚMERO DE PISOS DE CADA EDIFICIO				
Edificio 1: _____	Edificio 2: _____	Edificio 3: _____	Edificio 4: _____	
Edificio 5: _____	Edificio 6: _____	Edificio 7: _____	Edificio 8: _____	
24. ESTIME EL AÑO DE CONSTRUCCIÓN DE CADA EDIFICIO				
Edificio 1: _____	Edificio 2: _____	Edificio 3: _____	Edificio 4: _____	
Edificio 5: _____	Edificio 6: _____	Edificio 7: _____	Edificio 8: _____	
25. TIPO DE CONSTRUCCIÓN DE CADA EDIFICIO				
Edificio 1: _____	Edificio 2: _____	Edificio 3: _____	Edificio 4: _____	
Edificio 5: _____	Edificio 6: _____	Edificio 7: _____	Edificio 8: _____	
 <p>Tipo 1</p>	 <p>Tipo 2</p>	 <p>Tipo 3</p>		
 <p>Tipo 4 (Columnas y Vigas de Concreto)</p>	 <p>Tipo 5 (Columnas y Vigas metálicas)</p>	 <p>Tipo 6 (concreto, metal)</p>		
 <p>Tipo 7</p>	 <p>Tipo 8</p>	 <p>Tipo 9</p>		
 <p>Tipo 10</p>	 <p>Tipo 11 (Parasoles)</p>	 <p>Tipo 12 (Rural)</p>		
 <p>Tipo 13 (Rural modificado)</p>	<p>Tipo 14 (Otros)</p>			

Figura 3. Hoja incluida en el Censo Escolar Nacional con la finalidad de identificar los tipos constructivos, el año de construcción y el número de pisos de cada edificio escolar en el país.

MÉTODO PARA LA ESTIMACIÓN DE DAÑOS

La información básica recopilada para los edificios escolares en el país es utilizada para estimar daños y pérdidas esperadas en eventos sísmicos futuros. Esto facilitará la toma de decisiones de las autoridades nacionales, regionales y locales, para el desarrollo de planes de prevención, reducción de riesgo y atención de emergencias.

Se determinan índices de riesgo en cada plantel a partir de un escenario sísmico prefijado y de la vulnerabilidad del edificio escolar, la cual se caracteriza mediante curvas de fragilidad aproximadas. La aceleración horizontal máxima en cada lugar donde hay una escuela se determina para un evento sísmico prefijado el cual es descrito por una magnitud dada y una ubicación específica, usando relaciones de atenuación apropiadas. La determinación de la vulnerabilidad del edificio se basa en el conocimiento de la edad de la construcción y por ende de la norma de proyecto estructural

vigente en esa época, bajo la hipótesis de que el edificio escolar se analizó, diseñó y construyó en cumplimiento de dicha normativa, independientemente del lugar de ubicación y de la fecha de ejecución.

Conocida la norma empleada y el número de pisos se estiman el valor medio de la fuerza cortante basal resistente dividida por el peso del edificio, el cual incluye la sobrerresistencia, el período efectivo de vibración y la capacidad de deformación plástica la cual se expresa en términos de un factor de ductilidad última. Con estos parámetros y adoptando una relación bilineal entre la fuerza cortante y el desplazamiento en el techo (u), se determinan el desplazamiento cedente (u_y) y el desplazamiento último (u_u). Se definen cuatro estados de daño: Leve, Moderado, Severo y Colapso, en función del desplazamiento (figura 4). El desplazamiento cedente se corresponde con el inicio del estado de daño moderado y el desplazamiento último con la ruina del edificio; los estados leve y severo se definen por los valores de desplazamiento indicados en la figura 4.

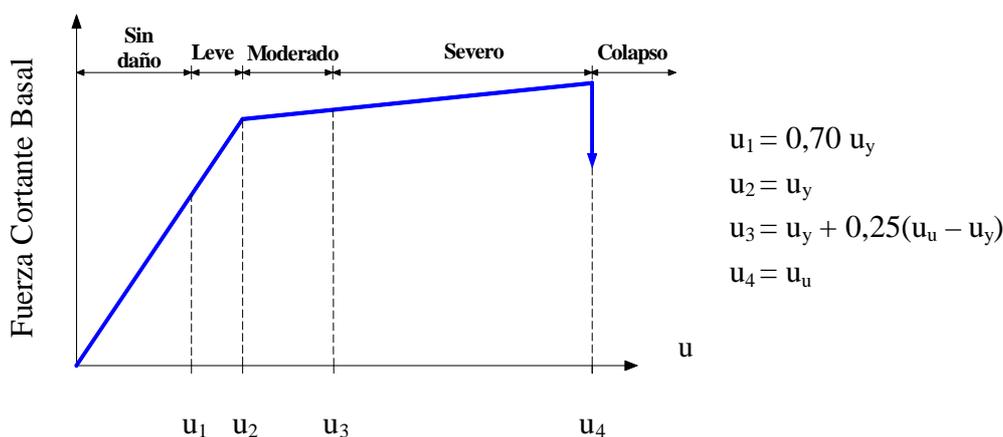


Figura 4. Definición de los estados de daños sobre una representación bilineal de una curva de capacidad.

Para caracterizar la vulnerabilidad sísmica de los edificios escolares se adopta una distribución lognormal para describir la curva de fragilidad. La probabilidad de excedencia de un estado de daño prefijado se calcula para cada valor de la aceleración horizontal máxima (A_0) del terreno. Mediante métodos aproximados para calcular la demanda de desplazamiento se determinan los valores medios de A_0 asociados al inicio de cada estado de daño. La desviación estándar del $\ln(A_0)$ para cada estado de

daño se estima a partir de la experiencia nacional e internacional (Kircher et al. 1997; Bonett 2003; FEMA-NIBS 2003; Barbat et al. 2008; Marinilli 2008). Como un ejemplo de aplicación del procedimiento se muestran en la figura 5 las curvas de fragilidad estimadas para una edificación escolar de dos pisos localizada en Cumaná y proyectada con las normas de 1955 y 2001; la escuela diseñada con la norma 2001 resiste en promedio un sismo que es entre 2 y 4 veces más intenso que la diseñada en 1955, para los cuatro estados de daño indicados.

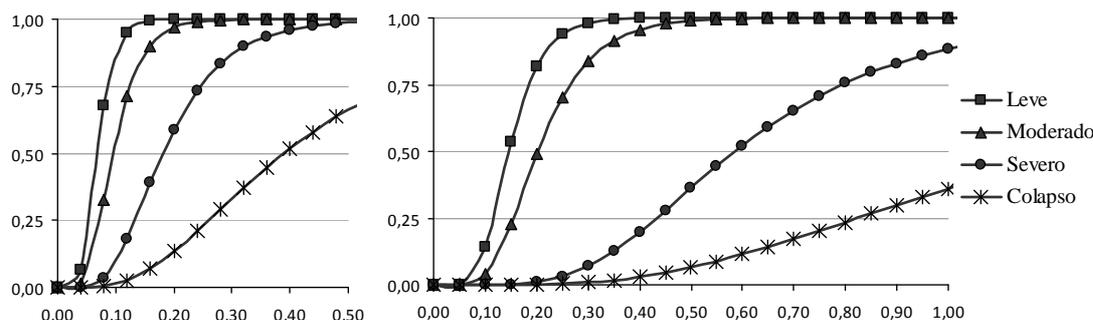


Figura 5. Curvas de fragilidad para cada estado de daño. Edificio escolar de dos pisos, ubicada en Cumaná sobre un suelo tipo S2: a) Diseñado con la norma MOP 1955; b) Diseñado con la norma COVENIN 2001.

Los resultados preliminares mostrados en la figura 5 sirven para ilustrar el procedimiento propuesto; resultados definitivos serán obtenidos luego de evaluar y calibrar los parámetros del sistema, utilizando para ello la información recopilada sobre la observación de los efectos del sismo de Cariaco sobre un total de 100 planteles del Estado Sucre, con distintos niveles de daño.

La probabilidad de excedencia de un estado de daño prefijado se obtiene de la curva de fragilidad. El Factor de Daño medio de la Escuela se obtiene ponderando las probabilidades de los estados de daño con los factores de daño definidos en (Hwang y Lin 2002; Blondet et al. 2005). Para estimar los efectos sobre los ocupantes se supone que el evento sísmico tiene lugar en horas de actividad escolar, y las víctimas se calculan en función del factor de afectación de los ocupantes asociado con cada estado de daño (ATC 1985). Finalmente se obtiene un factor de costo como el producto del factor de daño de la escuela por el valor de las instalaciones según su nivel educacional y su importancia social. Para estimar el riesgo sísmico, debe determinarse el rango de daño asociado con la probabilidad de excedencia anual (Safina 2003).

INSPECCIÓN VISUAL DE ESCUELAS SELECCIONADAS

Se realizaron inspecciones visuales de relativa corta duración en 131 edificios escolares ubicados en zonas de amenaza sísmica calificada de media a alta. Se prestó atención especial a los tipos constructivos más antiguos, especialmente aquellos que han mostrado un comportamiento inadecuado durante sismos pasados. El objetivo de esta fase es recopilar información básica en sitio que facilite la toma de decisiones técnicas y administrativas para la mitigación del riesgo sísmico en los edificios escolares del país. Las inspecciones fueron ejecutadas por el Centro de Estudios Integrales del Ambiente (CENAMB 2008).

Se diseñó una planilla de recolección de datos para recoger información considerando las características típicas de los edificios escolares en Venezuela (figura 6). El diseño de la planilla de recolección de datos se basó tanto en experiencia local como en experiencia internacional (FEMA 2002; Meneses y Aguilar 2004). La información incluye año de construcción, número de estudiantes, coordenadas GPS, planos esquemáticos horizontales y verticales de los edificios, configuración estructural, detalles estructurales y no-estructurales, estado de mantenimiento y un detallado informe fotográfico. La información está directamente relacionada con los requisitos exigidos en la normativa venezolana (COVENIN 1985; COVENIN 1998; COVENIN 2001).

Las inspecciones visuales fueron realizadas por inspectores con instrucción básica sobre estructuras y terremotos, tales como estudiantes de ingeniería y arquitectura y bomberos. Se preparó un detallado manual de instrucción para facilitar el desarrollo de sus actividades. Se entrenó a los inspectores mediante un taller de tres días de duración para que recolectaran la información requerida y llenaran la planilla de recolección de datos con especial atención a los detalles estructurales y no-estructurales que influyen en el desempeño sísmico. El primer día del taller incluyó la presentación y descripción de la planilla, una detallada explicación sobre la información a ser recolectada en sitio y su colocación en la planilla, y concluyó con la presentación y discusión de un ejemplo preparado por el facilitador del Taller. Las actividades para el segundo y el tercer día del taller incluyeron una práctica de campo en dos edificios escolares y una discusión de los resultados obtenidos.

La información recolectada en la inspección visual es usada para estimar un índice de vulnerabilidad sísmica para cada edificio escolar. Dicho índice se determina asignándole un peso a ciertas características estructurales y no-estructurales del edificio que puedan incidir en un comportamiento inadecuado ante un sismo; en particular se presta atención especial a la antigüedad de la construcción, al tipo constructivo, a la presencia de columnas cortas, carencia de vigas, existencia de entrepisos blandos, forma de la planta, existencia de discontinuidad vertical en el

PROYECTO UCV - FUNVISIS - FEDE - FONACIT N° 2005000188										1.- No. 1/4													
INSPECCIÓN OCULAR										2.- FECHA: 19/02/07													
3.- NOMBRE DEL PLANTEL (O PLANTELES): <u>IMME - FACULTAD DE INGENIERÍA - UCV (EDIF. SUR)</u>																							
4.- CÓDIGO DE A:		5.- DIRECCIÓN: <u>AV. LOS ESTADIOS, CIUDAD UNIVERSITARIA DE CARACAS</u>																					
6.- CIUDAD: <u>CARACAS</u>			7.- MUNICIPIO: <u>LIBERTADOR</u>			8.- ESTADO: <u>DTTO. CAPITAL</u>																	
9.- PERSONA ENTREVISTADA: <u>Prof. OSCAR LÓPEZ</u> 10.- CARGO: <u>INVESTIGADOR</u> 11.- TELÉFONO: <u>(0212) 605.3136</u>																							
12.- AÑO DE PROYECTO: <u>1950</u>		13.- AÑO DE CONSTRUCCIÓN: <u>1960</u>		14.- NUM. DE EDIFICIOS: <u>4</u>		15.- EDIFICIO No.: <u>1</u>																	
16.- NUM. DE PISOS: <u>2</u>		17.- GPS No.: <u>80210</u>		COORD. UTM		18.- NORTE: <u>1.160.226</u>		19.- ESTE: <u>731.150</u>															
20.- INSPECTOR: <u>Prof. ANGELO MARINILLI</u>																							
21.- CROQUIS (USE PÁGINAS ADICIONALES SI ES NECESARIO)																							
PLANO DE UBICACIÓN 			EDIFICIO 1 																				
22.- MODALIDAD		23.- MATRÍCULA			24.- ZONA SISMICA					25.- FORMA DE LA PLANTA				26.- JUNTAS									
7		X			0 1 2 3 4 5 6 7					H L U T				SI NO									
27.- TIPO DE ESTRUCTURA												28.- SISTEMA CONSTRUCTIVO TÍPICO											
PC25 PC15 PC10 MC PA1 PA2 PA3 MM MIX PRE OTRO												T1 T2 T3 T4 T5 T6 T7 T8 T9 T10 T11 T12 T13											
X																							
29.- SISTEMA RESISTENTE A SISMO EN LAS DOS DIRECCIONES												DETALLES DE LA ESTRUCTURA											
DIRECCIONES PRINCIPALES EN PLANTA				CORTA		LARGA		42.- CONSTRUIDO EN LADERA				NO											
30.- DIMENSIONES TÍPICAS DE ELEMENTOS (cm)				COLUMNAS		30		25		43.- CERCANÍA A TALUD				NO									
				VIGAS		NO		25x52		44.- CONCENTRACIÓN DE MASA EN PISOS SUPERIORES				NO									
				MUROS		NO		NO		45.- TABIQUERÍA EMPLEADA				BLOQUE CONCRETO NO									
31.- NÚMERO DE VANOS				2		8						BLOQUE ARCILLA SI											
32.- LUCES DE VANOS TÍPICAS (cm)				800		500						LADRILLO NO											
33.- ALTURA DE ENTREPISO TÍPICA (cm)				265								FRISADA SI											
34.- PRESENCIA DE VOLADIZOS (dimensión típica en cm)				100		NO		INDICADORES DE DETERIORO DE LA ESTRUCTURA				LOCALES: GENERAL:											
35.- PRESENCIA DE ENTRANTES (dimensión típica en cm)				NO		NO		46.- AGRIETAMIENTO EN ELEMENTOS ESTRUCTURALES				NO NO											
36.- PRESENCIA DE SALIENTES (dimensión típica en cm)				NO		NO		47.- AGRIETAMIENTO EN TABIQUERÍA				NO NO											
37.- ENTREPISO BLANDO				NO		NO		48.- ACERO DE REFUERZO EXPUESTO				NO NO											
38.- DISCONTINUIDAD VERTICAL SISTEMA RESISTENTE A SISMOS				NO		NO		49.- CORROSIÓN EN EL ACERO				NO NO											
39.- COLUMNA CORTA				No. DE COLUMNAS EN FACHADA		NO		8		50.- DEFLEXIONES EXCESIVAS				NO NO									
				No. DE COLUMNAS INTERNAS		NO		NO		51.- DETERIORO EN UNIONES				NO NO									
				ALTURAS LIBRES TÍPICAS (cm)		NO		90		52.- ASENTAMIENTO DE LAS FUNDACIONES				NO NO									
40.- POSIBILIDAD DE GOLPETEO ENTRE EDIFICIOS:				LOSAS A IGUAL COTA		NO		SI		53.- ESTADO GENERAL DE MANTENIMIENTO				BUENO SI									
				LOSAS A DIFERENTES COTAS		NO		NO						REGULAR NO									
														MALO NO									
41.- TIPO DE ENTREPISO Y TECHO				LIVIANO		NO		NO		54.- EVIDENCIA DE REPARACIONES				NO NO									
				PESADO		SI		SI		55.- EVIDENCIA DE REFUERZO DE LA ESTRUCTURA				NO NO									
				NERVADA DE CONCRETO		SI		SI															
				MACIZA DE CONCRETO		NO		NO															
				TIPO LOSA ACERO		NO		NO															
				TABERONES		NO		NO															
56.- OTRO (ESPECIFIQUE):																							
57.- COMENTARIOS (USE EL REVERSO DE LA PÁGINA O PÁGINAS ADICIONALES SI ES NECESARIO):																							

Figura 6. Planilla de recolección de datos en la inspección de escuelas.

sistema resistente a sismos, posibilidad de choque con edificios adyacentes, evidencia de asentamientos del terreno, existencia de grietas en paredes y elementos estructurales y presencia de corrosión, cercanía a taludes, y otras. Los pesos relativos asignados a cada

característica son calibrados utilizando experiencias del comportamiento de escuelas en sismos pasados, tales como el sismo de Cariaco. El índice de vulnerabilidad se combina luego con índices de amenaza y de pérdidas potenciales para definir un índice de riesgo para cada

edificio. El índice de amenaza se establece según el mapa de amenaza sísmica de la Norma COVENIN 2001. Finalmente, el estimado de pérdidas es función del tamaño de la población estudiantil de la escuela. El índice de riesgo permite establecer valores relativos de riesgo entre los edificios inspeccionados, y se usará para priorizar y seleccionar aquellos edificios que requieran pasar a la siguiente fase de estudios detallados.

EVALUACIÓN SÍSMICA DETALLADA DE ESCUELAS

Se seleccionaron diez escuelas como proyectos piloto para una evaluación sísmica detallada. Éstas pertenecen a tipos escolares que se construyeron con frecuencia entre 1939 y 1980, por lo que existen numerosos edificios escolares similares o iguales a los considerados como proyectos piloto. El estudio incluye ensayos dinámicos en sitio para determinar

las propiedades de los primeros modos de vibración, evaluación de materiales, exploraciones de suelo y fundaciones, y el desarrollo de proyectos optimizados de adecuación sismorresistente con base en las normas vigentes en el país y a la experiencia internacional. El objetivo de cada proyecto es minimizar tanto los costos del refuerzo estructural como la interrupción de la operación de la escuela. Cada escuela es evaluada para los movimientos sísmicos especificados en la norma COVENIN 1756 en donde la aceleración horizontal del terreno varía de 0,10g a 0,40g para las siete zonas sísmicas del país (figura 2) y está asociada a períodos de retorno de 475 años. Estos valores son multiplicados en la Norma por 1,3 (Factor de Importancia) para el caso de edificios escolares, lo que equivale a tener aceleraciones del terreno con períodos de retorno de aproximadamente 1000 años. La figura 7(a) muestra los espectros elásticos de aceleraciones en cada zona sísmica, para escuelas sobre suelo firme (perfil S2, $\phi=0,95$).

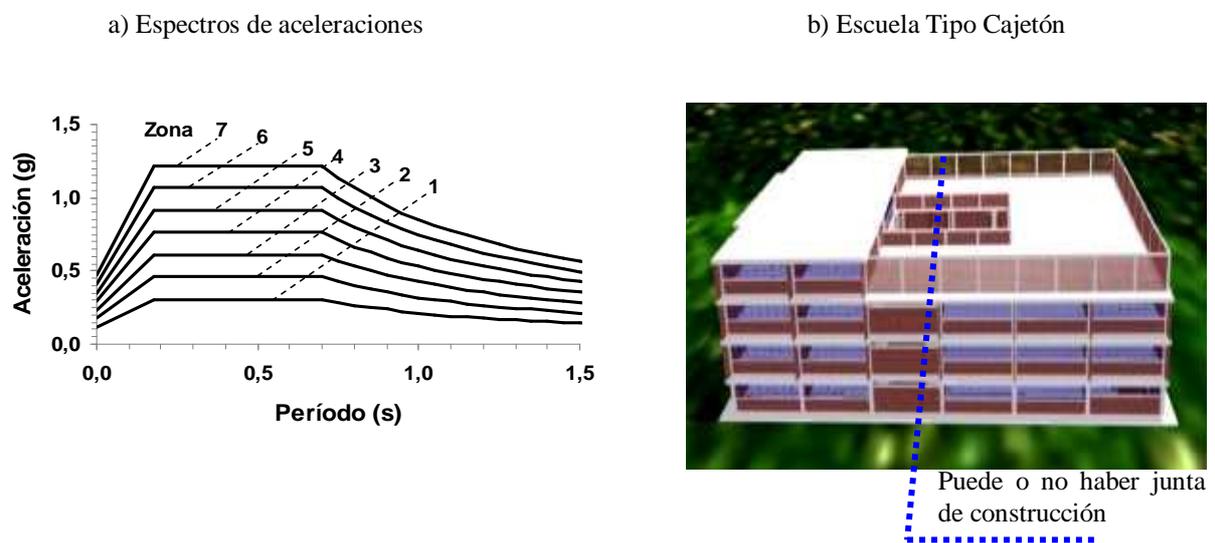


Figura 7. (a) Espectro de aceleraciones para suelo firme en cada zona sísmica del país; (b) Idealización de una Escuela tipo Cajetón (Taboada & Sosa, 2007).

Los 10 proyectos piloto corresponden a los siguientes tipos escolares: a) Dos escuelas del tipo Antiguo I (figura 1), localizados en Carúpano, Estado Sucre. Éstas son prácticamente idénticas a la escuela Valentín Valiente derrumbada en Cariaco; b) Dos escuelas del tipo Cajetón (figura 7b), localizada una en Cumaná y otra en Caracas, similares al Liceo Raimundo Martínez Centeno derrumbado en Cariaco; c) Dos escuelas del tipo Antiguo II, una en Carúpano y otra en Caracas, que son construcciones de la década de 1950; d) Una escuela del tipo Stac, en Carúpano, construida en la década de 1980; e) Una escuela del tipo Módulo Base, en Caracas, construida en 1980; f) Una escuela tipo R o sistema rural, en Caracas; g) Una escuela del tipo Patrimonial localizada en Caracas, construida en 1939. Debido a la ausencia de planos de la edificación, se hicieron levantamientos geométricos y exploraciones con detectores de metales a fin de determinar las

características y propiedades de los elementos estructurales y no estructurales, a partir de los cuales se desarrollaron planos de arquitectura y estructura y animaciones digitales en 3D (Abou & Lee 2005; Taboada & Sosa 2007; Sucre & Olivo 2007; Jaramillo & Al Jarrouj 2008; Borrego & Paredes 2007; Goncalvez & Ynfante 2008; Ebres & Olivo 2008; Gascón & Lárez 2008; Azancot 2009). Las edificaciones escolares son evaluadas mediante las técnicas de análisis dinámico lineal especificadas en las normas nacionales vigentes y también con técnicas de análisis estático no-lineal especificadas en documentos internacionales recientes. Resultados de los análisis efectuados ponen de manifiesto la necesidad de reforzar las escuelas a fin de satisfacer los requerimientos normativos vigentes.

Como ejemplo se presenta el caso de dos edificios escolares que pertenecen a escuelas del tipo Cajetón, construidas en los años 1970-1980. La figura 7(b) muestra

una idealización de una escuela de cuatro pisos de este tipo, que se caracteriza por poseer un patio interior descubierto. La estructura está constituida por pórticos de concreto armado y paredes de relleno con bloques de arcilla o de concreto, que generan numerosas columnas cortas. Hay dos tipos de estos edificios: el tipo Cajetón Cerrado y el tipo Cajetón Abierto; el último tiene una junta de construcción que da lugar a dos edificios similares pero independientes, cada uno con una planta en forma de C, similar al Liceo Raimundo Martínez Centeno derrumbado en Cariaco en 1997. Por otro lado, el tipo Cajetón Cerrado suele poseer vigas planas, del mismo espesor de la losa, orientadas en la dirección más corta del edificio. Las demandas de deriva se estimaron en cada zona sísmica usando el método de los coeficientes (FEMA 2000; FEMA 2005) para cada edificio. La deriva normalizada es el cociente

entre el desplazamiento en el techo y la altura del edificio. La figura 8 muestra la demanda de deriva normalizada en el techo para edificios de tipo Cajetón Cerrado y Cajetón Abierto, calculada para los movimientos sísmicos dados por los espectros de la figura 7a. Los valores de deriva última son tomados de los resultados de un análisis estático no-lineal y están asociados al inicio del estado límite de daño estructural severo; estos valores fueron obtenidos de un Cajetón Abierto localizado en la Zona Sísmica 7 y un Cajetón Cerrado en la Zona Sísmica 5. Suponiendo que estos valores pudiesen ser extrapolados a otras zonas del país, se aprecia en la figura 8 que la deriva última es excedida en las zonas de alta amenaza para los edificios de tipo Cajetón Abierto y en la mayoría de las zonas para los de tipo Cajetón Cerrado debido a la ausencia de vigas altas, señalando la necesidad de una adecuación estructural sismorresistente.

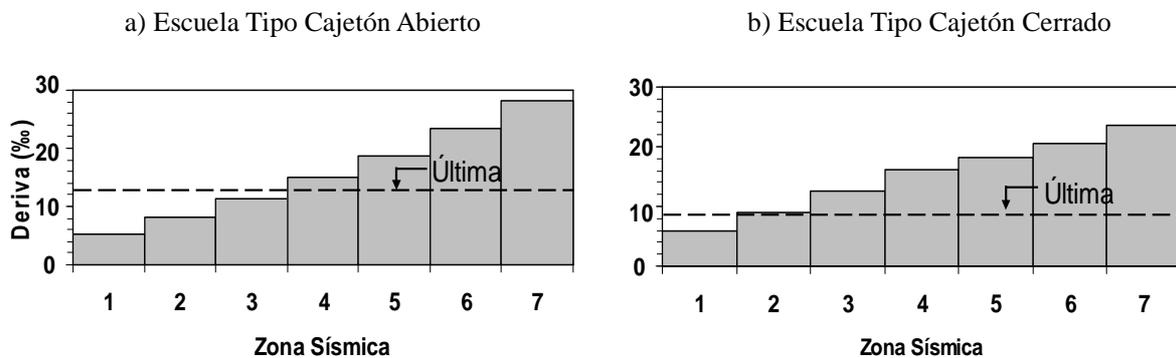


Figura 8. Demanda de deriva normalizada en el techo y deriva última en cada zona sísmica para dos tipos escolares.

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE PROPIEDADES DINÁMICAS

Los periodos naturales, las formas modales y los coeficientes de amortiguamiento de los primeros modos de vibración fueron determinados para los 10 edificios escolares seleccionados como proyectos piloto, usando técnicas de respuesta dinámica ante vibración ambiental. El procedimiento consiste en la instalación de un arreglo previamente configurado de sismómetros ubicados en lugares seleccionados de la estructura, y un sistema de adquisición de datos (Figura 9). Los datos se procesan posteriormente para determinar valores de interés. La respuesta de cada sensor va a un convertidor A/D (Iotech, 2002) con una tasa de muestreo de 200 Hz; las frecuencias de interés raramente sobrepasan los 100 Hz. Para cada registro, los espectros de potencia fueron calculados usando el método de (Welch, 1967) con un 60% de superposición y un número de puntos de 16.384, permitiendo un rango suficiente de períodos hasta 82,9s y una tolerancia de frecuencia de $\pm 0,003$ Hz.

Los modos de vibración fueron calculados del análisis de correlación cruzada de dos registros simultáneos,

en los cuales las frecuencias comunes y los ángulos de fase son de interés especial (figura 9). Los modos de vibración fueron determinados para los ángulos de fase de 0° o 180° , en las frecuencias comunes de los diferentes registros. Una vez calculado el ángulo de fase, se estableció la posición de cada punto con respecto a la posición de equilibrio. Y con la amplitud de vibración estimada para cada frecuencia en cada punto, fue posible estimar un modo de vibración aproximado para la estructura completa. El amortiguamiento modal fue calculado del espectro de potencia por el método del ancho de banda, suponiendo que el amortiguamiento es pequeño. (Craig, 1981; Cunha et al., 2006, El-Borgi et al., 2004; López et al., 1989), encontrándose valores entre 2 y 10%. Las frecuencias del primer modo varían entre 5,4 y 7,9 Hz, valores relativamente altos debido a la contribución de los componentes no-estructurales.

Una vez que se complete el refuerzo estructural de cada edificio, se procederá a repetir las mediciones de sus propiedades dinámicas. Adicionalmente, se seleccionaron cuatro escuelas del Estado Sucre para instalar acelerómetros permanentes a fin de registrar sus respuestas ante futuros eventos sísmicos.

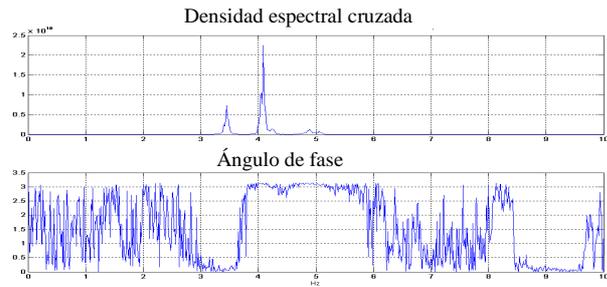


Figura 9. Sistema de adquisición de datos y ejemplo de curvas de amplitud y fase para cada frecuencia.

ADECUACIÓN ESTRUCTURAL

Se estudian varias opciones de adecuación estructural para cada proyecto piloto con el fin de optimizar la relación entre el desempeño esperado y el costo, y tomando en consideración la experiencia internacional al respecto (FEMA, 2000; FEMA, 2005; Perbix & Burke, 1989; Pincheira, 1993; Roeder et al., 1996; Sasani et al., 1999). Se toma en consideración las propiedades de la estructura existente, principalmente su resistencia, rigidez y ductilidad con énfasis en las irregularidades y debilidades tales como la presencia de columnas cortas. En una opción común, se añaden estructuras auxiliares que están proyectadas para soportar la mayor parte de las cargas sísmicas, conectadas con los diafragmas de las estructuras existentes y apoyadas sobre nuevas fundaciones. Se da atención especial a la compatibilidad de deformación entre la estructura auxiliar y la estructura existente; como requerimiento de diseño de la estructura auxiliar, las derivas se mantienen por debajo de los niveles que pudieran originar daños en la estructura existente y poner en riesgo su capacidad de soportar las cargas de gravedad. De los resultados de análisis estáticos no-lineales se ha puesto de manifiesto la necesidad de no permitir derivas en exceso del 0,7% de la altura del entrepiso, valor este que es aproximadamente la mitad

del valor permitido en la norma vigente para nuevas escuelas.

La figura 10 muestra una estructura adecuada (Hernández, 2004) para edificios escolares de Tipo Antiguo I ubicados en la Zona 5 ($A_0=0,30$, figura 2), zona de elevada amenaza, cuya estructura está constituida por pórticos de concreto reforzado (figura 1). Pórticos de acero con diagonales concéntricas forman la estructura auxiliar, la cual absorbe prácticamente todas las cargas laterales. En la dirección longitudinal, estos pórticos de acero están conectados con nuevos elementos colectores, garantizando un comportamiento de diafragma rígido; en la dirección transversal, se conectan con las vigas existentes.

Un anillo de fundaciones reforzado apoya los cuatro pórticos de acero para mejorar la capacidad de soporte y restringir el levantamiento de las fundaciones. El límite de deriva de 0,7 % fue impuesto para proteger la estructura existente, la cual soporta las cargas gravitacionales. El proyecto incluyó un riguroso detalle de las conexiones, agregando factores de sobrerresistencia, los cuales compensan el pequeño sistema de redundancia. Las paredes de mampostería se separan de las columnas donde se pueda desarrollar una columna corta, y se anclan apropiadamente para evitar una falla fuera de su plano. Esta solución causa molestias menores en la operación de la escuela.

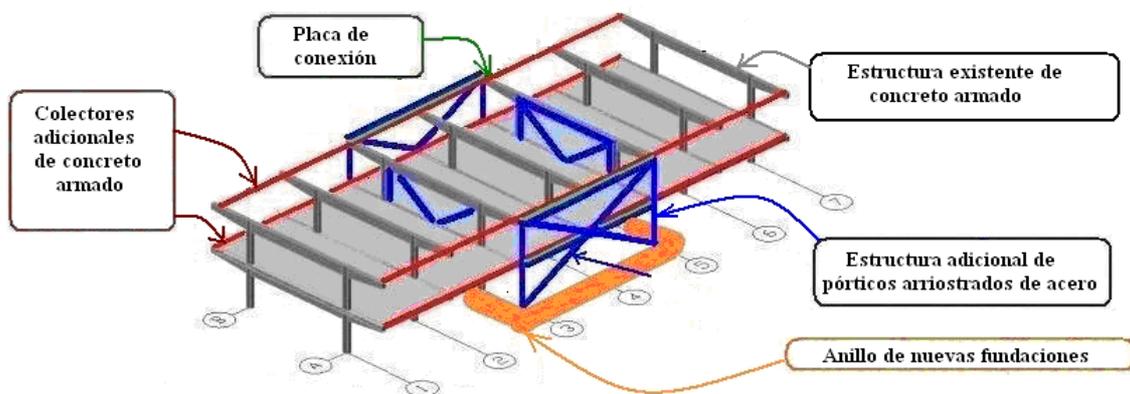


Figura 10. Estructura adicional para el refuerzo de una escuela del tipo Antiguo I (Hernández 2004). No se muestra el techo.

VULNERABILIDAD NO-ESTRUCTURAL

La vulnerabilidad de edificios escolares puede generarse o aumentarse por la combinación o la acumulación de componentes no-estructurales (FEMA 2004). Hay tres tipos de riesgo asociados con daño sísmico atribuido a componentes no-estructurales: gente herida o muerta por objetos que caen, pérdidas económicas y dificultad o imposibilidad de llevar a cabo las operaciones de emergencia post-terremoto. La figura 11a muestra el volcamiento de una pared interior en el G. E. Matías Parra Alcalá durante el terremoto de Cariaco de 1997, el cual es un edificio escolar del Tipo R. La estructura de acero del edificio no fue dañada. Esta situación es común en edificios escolares rurales donde las

paredes interiores no están conectadas apropiadamente con la estructura. Se llevaron a cabo varios análisis dinámicos para evaluar los efectos de las conexiones y se desarrolló un anclaje apropiado de la estructura. La figura 11b muestra el volcamiento de estantes durante el terremoto de Cariaco de 1997 en un edificio de oficinas, poniendo de manifiesto la necesidad de identificar y anclar adecuadamente todos aquellos componente susceptibles de desplazarse o volcarse durante sismos. Con esta finalidad se desarrolla una guía para la reducción de riesgos generados por componentes no estructurales. Los componentes de mayor amenaza son identificados por inspecciones visuales de varios edificios escolares. Los componentes son clasificados según su sensibilidad al desplazamiento y/o la aceleración. La guía consiste en un grupo de recomendaciones e ilustraciones dirigidos a los administradores y los usuarios del edificio escolar para reducir la vulnerabilidad a sismos.



Figura 11. (a) Volcamiento de paredes y (b) volcamiento de mobiliario (MIDAS, 1997) durante el sismo de Cariaco de 1997.

CONCLUSIONES

Las principales conclusiones en esta etapa de esta investigación que se orienta a la reducción del riesgo sísmico en los edificios escolares de Venezuela son las siguientes:

1.- El 70% de alrededor de aproximadamente 28.000 planteles escolares de Venezuela están en áreas de elevada amenaza sísmica. Aproximadamente el 46% de 18.685 planteles identificados e incorporados dentro de un sistema de información geográfica, fueron construidos con normas antiguas que no satisfacen los requerimientos sismorresistentes exigidos en las normas vigentes. Se identificaron un total de 586 edificios escolares pertenecientes a tres tipologías identificadas como críticas, de gran antigüedad y elevada vulnerabilidad, que se encuentran distribuidos en todo el país. De estos, 103 edificios son del tipo Antiguo I y 376 del tipo Cajetón, los tipos derrumbados en Cariaco en 1997, y 107 edificios son del tipo Antiguo II construidos en las décadas de 1950 y 1960.

2.- La estimación de daños potenciales durante eventos sísmicos futuros se fundamenta en suponer que el edificio escolar se proyectó y construyó en cumplimiento de la norma vigente en la época de su construcción, independientemente del lugar de ubicación. Se definen cuatro estados de daño: leve, moderado, severo y colapso. Resultados preliminares indican que la escuela diseñada con la norma 2001 resiste en promedio un sismo que es entre 2 y 4 veces más intenso que una diseñada en 1955.

3.- Por medio de una planilla de recolección de datos especialmente diseñada para calificar la vulnerabilidad sísmica de edificaciones escolares, se inspeccionaron 131 edificios distribuidos en todo el país, priorizando aquellos de mayor antigüedad que están localizados en las zonas de mayor amenaza sísmica, y que pudiesen ser iguales o similares a los derrumbados en Cariaco en 1997. El índice de vulnerabilidad, obtenido del procesamiento de la información recabada en la planilla de inspección, es luego combinado con un índice de amenaza y otro de pérdidas potenciales a fin de definir un índice de riesgo que permita ordenar y seleccionar aquellos edificios que pasarán posteriormente a la fase de estudios detallados.

4.- Se definieron diez proyectos piloto para estudios detallados y eventual reforzamiento de edificios escolares. Los 10 proyectos piloto corresponden a los tipos constructivos más antiguos y más vulnerables, cinco ubicados en el Estado Sucre y cinco en el área metropolitana de Caracas. Las edificaciones escolares fueron evaluadas mediante las técnicas de análisis dinámico lineal especificadas en las normas nacionales vigentes y también con técnicas de análisis estático no-lineal especificadas en documentos internacionales recientes. Resultados de los análisis efectuados ponen de manifiesto la necesidad de reforzar todos estos edificios a fin de satisfacer los requerimientos normativos vigentes.

5.- Los periodos naturales, las formas modales y los coeficientes de amortiguamiento de los primeros modos de vibración fueron determinados para los 10 edificios escolares seleccionados como proyectos piloto, usando técnicas de respuesta dinámica ante vibración ambiental. Se encontraron valores de amortiguamiento entre 2 y 10%. Las frecuencias del primer modo varían entre 5,4 y 7,9 Hz, valores relativamente altos debido a la contribución de los componentes no-estructurales. Luego de que sean reforzados los edificios, se procederá a repetir las mediciones de sus propiedades dinámicas. Se seleccionaron cuatro escuelas del Estado Sucre para instalar acelerómetros permanentes fin de registrar sus respuestas ante futuros eventos sísmicos.

6.- En una opción común de estrategia de refuerzo se proponen estructuras auxiliares que están diseñadas para soportar la mayor parte de las cargas sísmicas, conectadas con los diafragmas de las estructuras existentes y apoyadas sobre nuevas fundaciones. Se da atención especial a la compatibilidad de deformación entre la estructura auxiliar y la estructura existente; como requerimiento de diseño de la estructura auxiliar, las derivas se mantienen por debajo de 0,7 % para no poner en riesgo la capacidad de soportar cargas de gravedad de la estructura existente. Este valor es aproximadamente la mitad del valor permitido en la norma sismorresistente vigente para nuevas construcciones.

AGRADECIMIENTO

Esta investigación fue financiada por el FONACIT del Ministerio del Poder Popular para la Ciencia y la Tecnología (MPPCyT), bajo los Proyectos No 2005000188 y 2001003499. Agradecemos el apoyo del IMME de la Facultad de Ingeniería de la UCV, de FUNVISIS del MPPCyT y de FEDE del Ministerio del Poder Popular para la Educación y el aporte de los revisores del trabajo.

REFERENCIAS

ABOU, F. & LEE, C. (2005). Evaluación del Riesgo Sísmico en Escuelas Tipo Antiguo II. Trabajo

Especial de Grado Para Optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad Central de Venezuela. Tutor O. A. López. Caracas, Noviembre 2005.

ATC (1985). Earthquake Damage Evaluation Data for California. ATC-13, Redwood City, California.

AZANCOT, R. (2009). Vulnerabilidad Sísmica en las Escuelas Tipo R y Elementos No Estructurales. Trabajo Especial de Grado Para Optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad Central de Venezuela. Tutor R. Bonilla. Caracas, marzo 2009.

BARBAT, A. H., PUJADES, L.G., & LANTADA, N. (2008). Seismic Damage evaluation in Urban areas using the Capacity Spectrum Method: Application to Barcelona. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 28 (2008), pp. 851–865.

BLONDET, M., MUÑOZ, A., VELÁSQUEZ, J. & LEÓN, H. (2005). Estimación de Pérdidas Sísmicas en Edificaciones Educativas Peruanas. IX Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Concepción, Chile, 16-19 de Noviembre, 2005.

BONETT, R. (2003). Vulnerabilidad y Riesgo Sísmico de Edificios. Aplicación a Entornos Urbanos en Zonas de Amenaza Alta y Moderada. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña UPC, Barcelona.

BORREGO, R. & PAREDES, D. (2007) Evaluación sismorresistente de la U. E. N. Escuela Experimental Venezuela (edificio oeste). Trabajo Especial de Grado Para Optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad Central de Venezuela. Tutor A. Marinilli. Caracas, 2007.

CENAMB (2008). Inspección de Edificios Escolares. Estudio para el Proyecto FONACIT No 20005000188 Reducción del Riesgo Sísmico en Edificios Escolares. CENAMB, Universidad Central de Venezuela.

COVENIN (1985). Estructuras de Concreto Armado para Edificaciones. Análisis y Diseño. COVENIN MINDUR 1753, Caracas.

COVENIN (1998). Estructuras de Acero para Edificaciones. Método de los Estados Límites. COVENIN MINDUR 1618, Caracas.

COVENIN (2001). Edificaciones Sismorresistentes. COVENIN MINDUR 1756, Caracas.

CRAIG, R.R. (1981). Structural Dynamics. John Wiley & Sons, New York. USA.

CUNHA, A., CAETANO, E., MAGALHÃES, F., & MOUTINHO, C. (2006). From Input-Output to Output-Only Modal Identification of Civil Engineering Structures. SAMCO Final Report 2006. www.samco.org. 2008.

- EBRES, E. & OLIVO, M. (2008). Evaluación del Riesgo Sísmico en Escuelas Tipo Antiguo I, especialmente la U. E. Luis Alejandro Alvarado, ubicada en Cagua, Estado Aragua. Trabajo Especial de Grado Para Optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad Central de Venezuela. Tutor N. Fernández. Caracas, mayo 2008.
- EERI (2006). The Kashmir Earthquake of October 8, 2005: Impacts in Pakistan. EERI Special Earthquake Report, EERI Newsletter, February 2006, Vol. 40, Number 2.
- EERI (2008). May 12, 2008, M7.9 Sichuan, China, Earthquake. EERI Newsletter, June 2008, Vol. 42, No 8.
- EL-BORGI, S., SMAOUI, H., CHERIF, F., BAHLOUS, S., & GHRAIRI, A. (2004). Modal Identification and Finite Element Model Updating of a Reinforced Concrete Bridge. *Emirates Journal of Engineering Research*, 9(2), 29-34.
- FEMA (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA 356, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- FEMA (2002). Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards. Federal Emergency Management Agency, FEMA 154, Washington.
- FEMA-NIBS (2003). Multi-hazard Loss Estimation Methodology Earthquake Model HAZUS-MH MR1. Advance Engineering Building Module, Technical and User's Manual. Federal Emergency Management Agency (FEMA) and National Institute of Building Sciences (NIBS), Washington D.C.
- FEMA (2004). Design Guide for Improving School Safety in Earthquakes, Floods, and High Winds. FEMA 424, Federal Emergency Management Agency, Washington D.C.
- FEMA (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. FEMA 440, ATC-55 Project, Washington D.C.
- GAZCÓN, J. & LÁREZ, M. (2008). Evaluación sismorresistente de la U. E. N. Corazón de Jesús –Cumaná Estado Sucre. Trabajo Especial de Grado Para Optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad Central de Venezuela. Tutor A. Marinilli. Caracas, 2008.
- GONCALVEZ, Z. & YNFAnte M. (2008). Evaluación del Riesgo Sísmico en Edificaciones Escolares Tipo Antiguo I, ubicadas en la Población de Carúpano, Estado Sucre. Trabajo Especial de Grado Para Optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad Central de Venezuela. Tutor N. Fernández. Caracas, octubre 2008.
- HERNÁNDEZ, J.J. (2004). Anexo 3: Proyecto de Refuerzo Estructural. Adecuación de la Escuela Básica Cristóbal Rojas, Informe Técnico IMME No. 81-04, Caracas.
- HWANG, H. AND & LIN, W. (2002). Seismic Loss Assessment of Memphis City School Buildings. Proceedings of The Seventh U. S. National Conference on Earthquake Engineering, Boston.
- IMME (1998). Evaluación Sismorresistente de las Edificaciones derrumbadas durante el Sismo de Cariaco del 09-07-1.997. Informe N° 209209. IMME, Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela.
- Iotech, INC (2002). DaqBook User's Manual. Copyright 2002. Cleveland. USA
- JAIN, S. K. (2004). Implementing School Seismic Safety Programmes in Developing Countries. Ad Hoc Expert's Group Meeting on Earthquake Safety in Schools, OECD, Paris.
- JARAMILLO, O. & AL JARROUI, Y. (2008). Evaluación sismorresistente de la U. E. N. Escuela Experimental Venezuela (edificio este). Trabajo Especial de Grado Para Optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad Central de Venezuela. Tutor A. Marinilli. Caracas, 2008.
- KIRCHER, CHARLES A., ALADDIN, A. NASSAR, ONDER, KUSTU & HOLMES, WILLIAM T., 1997. Development of Building Damage Functions for Earthquake Loss Estimation. *Earthquake Spectra*, Vol. 13, No. 4, (Oakland, California: Earthquake Engineering Research Institute).
- LÓPEZ, O. A., HERNÁNDEZ, J. J., DEL RE, G., PUIG, J., & ESPINOSA, L. F. (2007). Reducing Seismic Risk of School Buildings in Venezuela. *Earthquake Spectra*, Vol. 23, No 4, P771-790, November 2007.
- LÓPEZ, O.A., GENATIOS, C., CASCANTE, G. (1989). Determinación de Propiedades Dinámicas de Estructuras mediante Técnicas Experimentales. *Boletín Técnico IMME Vol 24 N° 77*, 31-68.
- LÓPEZ, O. A. (2008). Protección de Escuelas contra los Terremotos. Trabajo de Incorporación Académica. Academia Nacional de Ingeniería y del Hábitat. Caracas, Julio 2008.
- MARINILLI, A. (2008). Simplified Stochastic Analysis of Reinforced Concrete Frames under Seismic Loads. The 14th World Conference on Earthquake Engineering October 12-17, 2008, Beijing, China.

- MENESES, J., AGUILAR, Z. (2004). Seismic Vulnerability of School Buildings in Lima, Peru. Proceeding of the 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Paper No. 1683.
- MIDAS (1997). Fotos del Terremoto de Cariaco, Venezuela del 9 de Julio de 1997. Middle America Seismograph Consortium, Jamaica, 1997.
<http://midas.upr.clu.edu/19970709/fotos.html>
- PERBIX, T.W. & BURKE P. (1989). Toward a Philosophy for Seismic Retrofit: The Seattle Experience. *Earthquake Spectra*, 5, Pp. 557-569.
- PINCHEIRA, J.A. (1993). Design Strategies for the Seismic Retrofit of Reinforced Concrete Frames. *Earthquake Spectra* 9, 817-842.
- ROEDER, C.W., BANERJEE, S., JUNG, D.R. & SMITH, S.K. (1996). The Role Of Building Foundations in Seismic Retrofit. *Earthquake Spectra*, 12, pp. 925-942.
- SAFINA, S. (2003). Vulnerabilidad Sísmica de Edificaciones Esenciales. Análisis de su Contribución al Riesgo Sísmico. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cataluña UPC, Barcelona, España.
- SASANI, M., BERTERO, V. & ANDERSON, J. (1999). Rehabilitation of Nonductile RC Frame Building using Encasement Plates and Energy-Dissipating Devices. PEER 1999/12, California.
- SUCRE, M. & OLIVO, M. (2007). Evaluación Sismorresistente de Edificaciones Escolares Tipo Módulo Base. Trabajo Especial de Grado Para Optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad Central de Venezuela. Tutor O. A. López. Caracas, octubre 2007.
- TABOADA, A. & SOSA, M. (2007). Evaluación Sismorresistente de Edificaciones Escolares Tipo Cajetón Cerrado. Trabajo Especial de Grado Para Optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad Central de Venezuela. Tutor O. A. López. Caracas, Noviembre 2007.
- WELCH, P. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: A method based on time averaging over short, modified periodograms. IBM Watson Research Center. Yorktown Heights, N.Y.