

INDICADORES DE RIESGO SÍSMICO EN EDIFICIOS ESCOLARES DE VENEZUELA

Oscar A. López

¹ *Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME), Facultad de Ingeniería,
Universidad Central (Venezuela)*

RESUMEN

Una revisión de los efectos de 26 terremotos ocurridos en el planeta desde 1933 pone en evidencia la elevada vulnerabilidad de las edificaciones escolares que han provocado la pérdida de miles de vidas. En el caso de Venezuela se identificaron 16 sismos ocurridos en el siglo XX que ocasionaron algún tipo de daño en escuelas. Varios edificios estructuralmente idénticos y pertenecientes a las escuelas tipo denominadas Antiguo I que fueron construidos en la década de 1950 en diversos lugares del país, fueron dañados por los sismos de Carúpano (1.974), del Táchira (1.981), del Pilar (1.986) y de Curarigua (1.991). En particular dos de estos edificios y otros dos pertenecientes al tipo denominado Cajetón que fueron construidos en la década de 1.970-1.980, se derrumbaron durante el sismo de Cariaco de 1.997 causando pérdidas de vidas. El mal comportamiento de estos edificios es atribuido a deficiencias sismorresistentes propias de aquellas edificaciones construidas con las normas de 1.939, 1.947, 1.955 y 1.967, a saber, poca rigidez y resistencia a carga lateral, poca capacidad de disipación de energía y la presencia de columnas cortas que precipitan modos de falla frágil.

Se propone una metodología para la determinación de indicadores de riesgo y daño en una población de edificaciones escolares existentes sujeta a movimientos sísmicos. El indicador de riesgo y de daño se cuantifica en términos del cociente demanda/capacidad de desplazamiento, utilizando como información básica la edad y la localización del edificio. El procedimiento presupone que el edificio fue diseñado y construido cumpliendo con la normativa vigente en el momento de su construcción. Al no requerir de planos ni de inspecciones, esta fase puede ser aplicada a una población completa de edificios lo que permitiría posteriormente ordenarlos y seleccionar los de mayor riesgo que pasarían a la siguiente fase de evaluación que sí involucraría una inspección visual. En la metodología propuesta se requiere únicamente conocer tres parámetros de la estructura a efectos de estimar el índice de riesgo y el estado de daño producido; estos parámetros son el período efectivo, la fuerza cortante resistente expresada en forma adimensional como una fracción del peso del edificio y el factor de capacidad dúctil. Se presentan expresiones que permiten estimar la fuerza cortante resistente para un edificio escolar diseñado según las diferentes normas que han tenido vigencia en el país desde el año de 1.939. Se propone también un procedimiento para estimar la aceleración del terreno necesaria para alcanzar cada estado de daño. Un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta en un edificio escolar típico pone de manifiesto el riesgo elevado de aquellas escuelas construidas según las normas sismorresistentes más antiguas.

Palabras Claves: Escuelas, riesgo sísmico, vulnerabilidad, edificios escolares, indicador de riesgo, índice de riesgo, indicador de daño.

INDICATORS OF SEISMIC RISK IN SCHOOL BUILDINGS IN VENEZUELA

ABSTRACT

A revision of the effects of 26 earthquakes that took place in the planet from 1933 points out the high vulnerability of school buildings that have caused the loss of thousands of lives. In the case of Venezuela, 16 earthquakes that took place in the XX century and caused damage in schools were identified. Several buildings that belong to the denominated Old-Type I schools that were constructed in

the decade of 1950 in several places of the country, were damaged by the Carúpano (1974), Táchira (1981), El Pilar (1.986) and Curarigua (1991) earthquakes. In particular, two of these buildings and other two that belongs to the denominated Box-Type schools that were constructed in the decade of 1970-1980, collapsed during the Cariaco 1997 earthquake causing loss of lives. The poor behavior of these structures is attributed to earthquake-resistant deficiencies that were typical of buildings constructed with the codes of 1939, 1947, 1955 and 1967, that is to say, low stiffness and resistance to lateral load, low energy dissipation capacity and the presence of short columns that precipitate brittle failure modes.

A methodology for the determination of risk and damage indicators in a population of existing school buildings subjected to seismic motion is proposed. The damage and risk indicators are quantified in terms of the ratio between the displacement demand and the displacement capacity, using the age and the location of the building as basic information. The procedure assumes that the building was designed and constructed fulfilling the building code at the moment of its construction. Since this methodology do not require structural planes nor of inspection at the site, it can be applied to a complete population of buildings which would later allow selecting those of greater risk index that would go to the following phase of evaluation involving a visual inspection. In the proposed methodology it is only required to know three parameters in order to determine the risk index and the state of damage; these parameters are the effective period, the resisting base shear force expressed in non-dimensional form as a fraction of the weight of the building, and the factor of ductile capacity. Expressions to estimate the resisting base shear force for school buildings designed according to the different codes that have been in use in the country from the year of 1939, is presented. A procedure to estimate the peak ground acceleration necessary to reach each damage state is proposed. An example of application of the propose methodology in a typical school building shows the elevated risk of those schools constructed according to the older seismic codes.

Keywords: Schools, seismic risk, vulnerability, educational buildings, risk indicators, risk index, damage indicator

1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS

La elevada vulnerabilidad de las edificaciones escolares ha sido puesta de manifiesto durante los últimos terremotos ocurridos en el planeta. Escuelas oficiales en las cuales se exige la asistencia obligatoria de niños y jóvenes, se han derrumbado causando miles de víctimas, mayoritariamente en los países en vías de desarrollo. Es evidente que muchos de estos derrumbes se pudiesen haber evitado si el conocimiento y la tecnología existente en ingeniería sismorresistente hubiesen sido aplicados. Muchas escuelas con estructuras de concreto armado, construidas con las normas de diseño que estaban vigentes décadas atrás, se han dañado o derrumbado durante terremotos poniendo en evidencia que aún el cumplimiento con una norma del pasado no es garantía de tener una edificación segura. Debido al crecimiento acelerado de la teoría y la práctica de la ingeniería sismorresistente en los últimos 50 años, las normas modernas contienen requisitos de análisis, diseño y construcción bastante más exigentes que las antiguas; se desprende entonces que una edificación antigua posee una confiabilidad para resistir terremotos significativamente menor a la de una moderna. Ésta es una realidad aquí en Venezuela y en otros países expuestos a la amenaza de los terremotos.

Partiendo de la premisa que la seguridad de los niños en las escuelas debe ser entendida como un derecho humano fundamental se hace imperiosa la necesidad de evaluar los niveles de riesgo a que están expuestos los edificios escolares como paso previo a la toma de las decisiones de intervención y refuerzo estructural. Éste trabajo tiene como objetivos los siguientes: i) Presentar la experiencia de sismos ocurridos en el planeta y en el país en cuanto a sus efectos en edificios escolares y ii) Proponer el cálculo de indicadores de riesgo sísmico en edificaciones escolares. Buena parte de este artículo fue desarrollado por el autor durante la preparación de su Trabajo de incorporación a la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat [López, 2.008].

2. EFECTOS DE LOS TERREMOTOS Y ACCIONES DE MITIGACIÓN

2.1 Terremotos ocurridos en el Planeta

En la Tabla 2.1 se resumen daños a edificios escolares observados en 26 terremotos ocurridos en el planeta en los últimos 75 años. Un evento histórico que provocó un cambio sustancial en el diseño y construcción de escuelas en California, ocurrió en Long Beach en 1.933 con el sismo que destruyó 70 escuelas; afortunadamente el evento ocurrió después de finalizadas las clases con lo que se salvaron centenares de vidas. Otro caso notable ocurrió durante el terremoto de Skopje (Macedonia) de 1.963 el cual ocasionó la destrucción del 57% de las escuelas de la ciudad provocando una interrupción masiva del proceso educacional en la ciudad y en el país. Por ocurrir temprano en la mañana todos los edificios estaban desocupados por lo que se salvaron miles de vidas. La mayoría de los estudiantes tuvieron que ser trasladados a escuelas temporales mientras se construían nuevas escuelas y reforzaban otras; ni el gobierno ni las escuelas tenían planes para atender esa emergencia. En 1.980 el 70% de las escuelas de la ciudad de El-Asnam en Argelia resultaron con daños extensos o derrumbadas durante un terremoto, en una proporción sustancialmente mayor que el resto de las construcciones de la ciudad. Los elevados riesgos asociados a las edificaciones escolares quedaron dramáticamente ilustrados en el terremoto de Spitak, Armenia, de 1.988 en donde el 24% de las 25.000 muertes fueron estudiantes y maestros de instituciones educativas. El terremoto de Kobe de 1.995 causó extenso daño estructural y no estructural a aproximadamente 4.500 planteles y un total de 54 edificios tuvieron que ser demolidos y reconstruidos. En el terremoto de Chi-Chi, Taiwán, de 1.999 el daño a edificios escolares excedió al de otras construcciones, estimándose un costo de 1,3 millardos de dólares para la reconstrucción y reparación de edificios escolares: En el Condado Nantou el 74% de las 189 escuelas tuvieron que ser clausuradas impidiendo su uso como centros de respuesta a la emergencia.

Tabla 2.1. Efectos en Edificios Escolares de algunos Terremotos ocurridos en el Planeta.

Terremoto	Lugar	Fecha	Magnitud	Efectos en Escuelas	Observaciones	Referencia
Long Beach	California, USA	10/03/1933	6,3	70 destruidas, 120 con daños severos y 300 con daños menores	Evento ocurrió a las 5:54pm después de finalizadas las clases	Steinbrugge, 1970
Olympia	USA	13/04/1949	7,1	10 escuelas colapsadas y 30 escuelas dañadas.	Solo 2 niños murieron por que era día de receso escolar	COGSS, 2006
Kern County	California, USA	21/07/1952	7,7	Una escuela colapsó, 15 sufrieron daño severo y 15 daño moderado, entre las 58 escuelas de la región	Solo una escuela sufrió daño moderado entre las 15 escuelas construidas después de la <i>Ley Field</i>	Steinbrugge, 1970; COGSS, 2006
Skopje	Macedonia	26/07/1963	6,1	44 escuelas destruidas, de un total de 77 escuelas de la ciudad	Tuvo lugar a las 5:17 am por lo que se salvaron miles de vida	Milutinovic y Massué, 2004
Perú	Perú	31/05/1970	7,7	6730 aulas colapsaron, cientos de escuelas seriamente dañadas	Aún cuando este evento provocó unas 70000 muertes no hubo víctimas en las escuelas debido a la hora de ocurrencia	Meneses y Aguilar, 2004
Tangshan	China	27/07/1976	8,2	La mayoría de las escuelas en Tangshan colapsaron. Murieron 2000 estudiantes en los dormitorios de una universidad.	Ocurrió en la madrugada y las escuelas estaban vacías.	COGSS, 2006
El-Asnam	Argelia	10/10/1980	7,3	70% de las escuelas de El-Asnam fueron destruidas	Expertos reportaron el nivel desproporcionado de daños a escuelas. Baja pérdida de vidas debido a la hora de ocurrencia	Bendimerad, 2004

**Tabla 2.1. Efectos en Edificios Escolares de algunos Terremotos ocurridos en el Planeta.
(continuación)**

Terremoto	Lugar	Fecha	Magnitud	Efectos en Escuelas	Observaciones	Referencia
Xinjiang	China	24/02/2003	6,3	900 salones de clases se derrumbaron.	Los estudiantes estaban fuera de las aulas, en clases de educación física y sólo murieron 20 estudiantes.	COGSS, 2006
Bingol	Turquía	01/05/2003	6,4	Se derrumbaron 3 escuelas y un dormitorio, 10 tuvieron daños severos y 12 daño moderado de un total de 28 planteles.	El 60% de las 168 víctimas del sismo estaban en las escuelas	Milutinovic y Massué, 2004
Bourmedes	Argelia	21/05/2003	6,8	564 escuelas de un total de 1800 tuvieron serios daños.	55% de las escuelas en el área experimentaron algún tipo de daño.	Bendimerad, 2004
Puerto Plata	República Dominicana	22/09/2003	6,5	127 Escuelas dañadas.	Miles de estudiantes quedaron sin clases.	COGSS, 2006
Sureste de Asia	Sureste de Asia	26/12/2004	9,3	750 escuelas destruidas en Indonesia. 55 escuelas destruidas en Sri Lanka. 44 escuelas destruidas en Maldives. 30 escuelas destruidas en Tailandia.	Terremoto y tsunami; uno de las más grandes magnitudes registradas.	COGSS, 2006
Cachemira	Pakistán	08/10/2005	7,6	Derrumbe generalizado de mas 17000 escuelas provoco que unos 19000 niños muriesen	Los edificios escolares fueron afectados en mayor proporción que otros edificios	EERI, 2006
Sichuan	China	12/05/2008	7,9	Destrucción de al menos 6898 edificios escolares	12% de las aproximadamente 80.000 muertes fueron estudiantes y maestros	EERI, 2008; GHDN, 2008
México	México	24/11/1987	6,6	59 centros educativos dañados y 24 colapsaron o sufrieron daños significativos	Los sistemas estructurales basados en losas planas de concreto tuvieron un comportamiento pobre	Meneses y Aguilar, 2004
Spitak	Armenia	07/12/1988	6,9	6000 muertos entre estudiantes y maestros	De las 25000 muertes, el 25% estaba en las escuelas derrumbadas	Milutinovic y Massué, 2004
Kobe	Japón	17/01/1995	6,9	4500 planteles con extenso daño estructural y no-estructural	Ocurrió muy temprano en la mañana y no se registraron víctimas	Nakano, 2004
Nazca	Perú	12/11/1996	7,5	93 escuelas seriamente dañadas.	No hubo víctimas por estar las escuelas en receso.	COGSS, 2006
Chi-chi	Taiwán	21/09/1999	7,6	786 escuelas dañadas y 51 sufrieron colapso total.	En el condado de Nantou 139 escuelas sufrieron daño severo, de un total de 189	Soong et al., 2004
El Salvador	El Salvador	13/01/2001	7,6	85 escuelas tuvieron que ser demolidas y otras 279 sufrieron daños serios.	50% de las víctimas fatales fueron niños.	COGSS, 2006
El Salvador	El Salvador	13/02/2001	6,6	25 niños y una maestra fallecieron.	Este evento se considera una réplica del evento del mes anterior	COGSS, 2006
Bhuj	India	26/01/2001	7,7	971 estudiantes y 31 maestros fallecieron	Por ocurrir en un día de fiesta nacional, los salones de clase estaban vacíos	Jain, 2004
Arequipa	Perú	23/06/2001	7,9	Muchas escuelas seriamente dañadas	Las escuelas diseñadas con la nueva Norma de 1997 no tuvieron daños	Meneses, 2006; Meneses y Aguilar, 2004
Mólise	Italia	31/10/2002	5,6	Derrumbe de una escuela y la muerte de 27 niños y un maestro	Las víctimas escolares representaron el 93% de las víctimas del sismo	Dolce, 2004

Varios terremotos ocurridos en Centro y Sur América han afectado también edificios escolares, como se indica en la Tabla 2.1, especialmente el evento del Perú de 1.970 que provocó la pérdida de

varios miles de aulas y el evento de El Salvador del año 2.001 en donde el 50% de las víctimas fueron niños en escuelas. El evento de Nazca, Perú, en 1.996 puso de manifiesto que el cumplimiento con las norma de diseño sismorresistente de 1.977 era insuficiente para proteger las escuelas, lo que dio lugar a una nueva norma en 1.997, bastante más exigente, y que condujo a edificaciones más seguras como fue demostrado en el terremoto de Arequipa de 2.001.

Terremotos más recientes también han afectado significativamente a edificaciones escolares. El terremoto de Boumerdès (Argelia) de 2.003 causó extensos daños en escuelas. Solo unos días antes del evento de Argelia, un terremoto afectó el poblado de Bingöl de 70.000 habitantes, en Turquía, causando el derrumbe de varios edificios escolares. Prácticamente todas las edificaciones tenían pórticos de concreto armado rellenos con paredes de mampostería. Uno de los problemas estructurales comunes observados en estos edificios fue la presencia de columnas cautivas o cortas, debido a las restricciones que imponían las paredes. Otro problema común fue el detallado inadecuado de los elementos estructurales; falta de confinamientos en columnas, carencia del refuerzo transversal necesario para prevenir fallas por cortante, especialmente en el caso de las columnas cortas, y anclaje inadecuado de los extremos libres del refuerzo transversal. Se estima que unos 19.000 niños murieron durante el terremoto de Cachemira en Pakistán del año 2.005, producto del derrumbe generalizado de escuelas las cuales fueron más afectadas que otros edificios. Y datos preliminares indican que unas 6.900 escuelas e institutos de la ciudad de Sichuan se vinieron abajo a causa del sismo ocurrido en la China el 2.008 que causó unas 80.000 víctimas fatales de las cuales un 12% fueron estudiantes y maestros. El Ministro de Vivienda de China abrió una investigación al respecto.

2.2 Sismos en Venezuela

Los edificios escolares del país también han sido afectados por sismos pasados. En la Tabla 2.2 se presenta un listado de 16 sismos que han ocasionado daños en edificios escolares en un período de 47 años, desde 1.950 hasta 1.997. No se presenta información sobre otros sismos de mayor magnitud e importancia del siglo XX, como son los terremotos del 29/10/1.929 ($M=7,8-8,4$) en la región nortecostera y del 17/01/1.929 ($M=6,9$) en Cumaná, que aún cuando causaron destrucción en numerosas construcciones no se conoce sin embargo información específica de daños en edificios escolares.

Tabla 2.2 Sismos que han ocasionado Daños en Edificios Escolares de Venezuela.

Sismo	Lugar	Coordenadas	Fecha	Magnitud	Efectos en Escuelas	Observaciones	Referencia
Barquisimeto	Edo. Lara	9,68° N 69,68° O	05/08/1950	≥ 5	Daño considerable a una escuela en El Tocuyo	Es posible que los daños hayan sido causados por el sismo ($M=6,4$) de El Tocuyo ocurrido dos días antes	Grases et al., 1999
Carúpano	Edo. Sucre	10,92° N 62,81° O	04/10/1957	Ms=6,6	Dañado el Grupo Escolar Rojas Paúl en Río Caribe y agrietadas las paredes del Grupo Escolar de Irapa	Numerosos premonitores y réplicas. Casa derrumbadas en San Juan de las Galdonas, Morros de Puerto Santo e Irapa	Grases et al., 1999
Trujillo	Edo Trujillo	9,25° N 70,44° O	19/07/1965	mb=5,2	Daños graves en la escuela de las Mesitas	Daños graves en la Iglesia y en la Casa Parroquial de Las Mesitas	Grases et al., 1999
Guiría	Edo. Sucre	10,76° N 62,70° O	20/09/1968	Ms=7,2	Daños en el Grupo Escolar de Irapa. Los Liceos de Guiría y Río Caribe sufrieron daños importantes.	Dos muertos y 15 heridos en Trinidad. El 80% de las casas de Río Caribe sufrió daños. 50 heridos graves y lesionados en la Costa de Paría.	Grases et al., 1999
Carúpano	Edo. Sucre	10,92° N 62,55° O	22/10/1969	mb=5,4	En Irapa se acabó de desplomar la escuela y se dañó el Grupo Escolar Jesús Machado.	Agrietamiento en 4 viviendas de Carúpano	Grases et al., 1999
Carúpano	Edo. Sucre	10,56° N 63,38° O	12/06/1974	Ms=6,1	Varias edificaciones escolares de concreto armado sufrieron daños estructurales.	Dos muertos y 11 heridos en Casanay. Múltiples réplicas sentidas en los siguientes días.	Grases et al., 1999

Tabla 2.2 Sismos que han ocasionado Daños en Edificios Escolares de Venezuela.
(continuación)

Sismo	Lugar	Coordenadas	Fecha	Magnitud	Efectos en Escuelas	Observaciones	Referencia
Carúpano	Edo. Sucre	10,41° N 63,33° O	27/06/1974	4-4,2	Daños estructurales en 15 planteles escolares localizados en Carúpano y alrededores. (Muy probablemente los daños mayores que reportan los autores se produjeron durante el sismo del 12/06/1974).	Los autores encuentran “sorprendente el relativamente elevado número de edificios escolares y hospitalarias dañados por el sismo”	Urbina y Alonso, 1974
San Pablo	Edo. Lara	10,08° N 69,65° O	05/04/1975	Ms=6,1	Daños en instalaciones escolares de Quibor	El pueblo de San Pablo tuvo que ser desalojado (600 habitantes)	Grases et al., 1999
Curarigua	Edo. Lara	10,22° N 70,00° O	25/04/1975	Mb=4,4	Daños moderados en una escuela de Río Tocuyo	-	Grases et al., 1999
El Tocuyo	Edo. Lara	9,99° N 69,76° O	06/06/1977	¿?	Pequeñas grietas en pared del Liceo de El Tocuyo	-	Grases et al., 1999
Táchira	Edo. Táchira	8,04° N 72,47° O	26/11/1980	5,0	Daños menores en la unión entre paredes y columnas cortas en una escuela de 2 niveles de concreto armado en San Antonio del Táchira.	Intensidad máxima de VI en San Antonio del Táchira, Rubio y Ureña.	Romero, 1980
Táchira	Estado Táchira	8,17° N 72,47° O	18/10/1981	mb=5,5	Daño estructural importante en columnas cortas de escuela de concreto armado de 2 niveles en San Antonio del Táchira y de un nivel en Ureña.	Deslizamientos de tierra enterraron numerosas viviendas y habitantes. Intensidad máxima de VII en San Antonio del Táchira, Palmar de la Cope, Ureña y Cúcuta.	FUNVISIS, 1981 Grases et al., 1999
El Pilar	Estado Sucre	10,60° N 62,93° O	11/06/1986	Ms=6,1	Agrietamiento diagonal en ambas caras en una columna y fisuras en tabiques en la escuela de Tunapuy. Daños menores en escuela en Cumaná y en dos escuelas en Cariaco.	Tres muertos 45 heridos y un millar de damnificados. Intensidad máxima de VII en El Pilar.	Malaver et al., 1988
Boca del Tocuyo y Tocuyo de la Costa	Estado Falcón	10,99° N 68,31° O	30/04/1989	Ms=6,0	Daños en dos edificaciones escolares de dos plantas en Boca del Tocuyo y Tocuyo de la Costa.	Precedido por actividad sísmica inusual desde el 26 de abril. 2000 réplicas hasta el 29 de junio	Grases et al., 1999
Curarigua	Estado Lara	10,04° N 69,95° O	17/08/1991	mb=5,3	Daño estructural consistente en falla por cortante en tres columnas cortas de la escuela de Arenales de 2 niveles y en el tanque de agua elevado de otra estructura. Grietas en mampostería y caída de friso en escuela en el sector Calicanto.	La estructura mas dañada en Arenales fue la escuela de dos niveles de concreto armado. 10 días antes ocurrió otro evento de mb= 5,0. Centenares de réplicas.	FUNVISIS, 1991 Grases et al., 1999
Cariaco	Estado Sucre	10,43° N 63,49° O	09/07/1997	Ms=6,8	Cuatro edificios escolares derrumbados; otros 33 sufrieron daños estructurales severos, 66 daños moderados y 398 daño estructural ligero.	De los 7 edificios de concreto armado derrumbados, 4 eran escuelas. Aún cuando la ocupación de los edificios era parcial, provocó la muerte de 22 estudiantes y una maestra.	FEDE, 1998; Bonilla, et al., 2000

El sismo (Ms=6,1) de Carúpano del 12/06/1974 y su posible réplica (M=4-4,2) del 27/06/1974 provocaron daños estructurales en 15 planteles escolares localizados en Carúpano y sus alrededores (Alonso y Urbina, 1974); dicen los autores que “es sorprendente el relativamente elevado número de edificaciones escolares y hospitalarias dañadas por el sismo”. Entre las escuelas afectadas mención especial merecen los Grupos Escolares Manuel María Urbaneja y Petrica Reyes de Quilarte (Figura 2.1)

que mostraron “daños estructurales leves en vigas y voladizos”; éstos son edificios del tipo denominado Antiguo I, construidos muy posiblemente en la década de 1.950 y que mostrarían también daño estructural en otros sismos posteriores que se describen más adelante. Esta tipología de edificio escolar está constituida por una estructura de concreto armado de dos niveles con vigas altas en la dirección corta y vigas planas (o en algunos casos sin vigas) en la dirección larga. En esta última dirección las columnas tienen escasamente 20 cm de ancho y están en su mayoría restringidas por paredes de bloques con aberturas superiores que generan situaciones de columna corta las cuales potencian un comportamiento frágil (Figura 2.1). Por otro lado, poseen una muy limitada capacidad para disipar energía por acción inelástica tal como era característico en las construcciones de la época. Inspecciones de varios de estos edificios en distintos lugares del país indican que son prácticamente idénticos en cuanto a su geometría y dimensiones de miembros estructurales.



Figura 2.1. (a) Fachada longitudinal del G. E. Manuel M. Urbaneja; (b) Vista interior del pórtico transversal del G. E. Petrica R. de Quilarte. Ambas son del Tipo Antiguo I y fueron dañadas durante el sismo de Carúpano de 1.974. Las fotos fueron tomadas en el año 2.008.

Otro edificio del Tipo Antiguo I fue sensiblemente afectado por el sismo del Táchira, un evento de magnitud moderada ($m_b=5,5$) que ocurrió el 18 de octubre de 1.981. El Grupo Escolar Manuel Felipe Rugeles sufrió daños severos en el extremo superior de varias columnas cortas del segundo nivel, encontrándose a aproximadamente 35 km del epicentro en la población de San Antonio del Táchira. En la Figura 2.2 se aprecian grietas diagonales características del inicio de una falla por cortante (FUNVISIS, 1.981). Esta misma escuela ya había sido reportada con daños en la unión entre las paredes y las columnas en el segundo nivel (Romero, 1.980) durante el sismo ($M=5,0$) del 26/11/1.980 cuyo epicentro estaba aproximadamente a 45 km de la ciudad. Otra escuela del mismo tipo Antiguo I localizada en Tunapuy, Estado Sucre, fue también dañada durante el sismo ($M_s=6,1$) de El Pilar del 11/06/1.986; estando a 20 km del epicentro nuevamente se produjeron grietas diagonales por cortante en una de sus columnas cortas (Figura 2.3) (Malaver et al., 1.988).

El 17/08/1.991 un evento de magnitud moderada denominado el sismo de Curarigua ($m_b=5,3$) afectó a la Escuela Ananías Cotte en la Población de Arenales en el estado Lara provocando la grieta diagonal típica indicativa de una falla frágil por cortante en tres columnas cortas (Figura 2.4), en el entrepiso superior del edificio de dos pisos (FUNVISIS, 1.991). Nótese que estas grietas ocurren en las mismas columnas que experimentaron daño similar en 1.981 (Figura 2.2) y 1.986 (Figura 2.3). Utilizando relaciones de atenuación ajustadas a los valores de aceleración máxima registradas por FUNVISIS en Quibor (0,037g) y El Tocuyo (0,044g) a 47 km y 37 km del epicentro, respectivamente, se estimó una mediana de 0,08g y una mediana más una desviación estándar de 0,14g para la aceleración máxima en Arenales localizada a 22 km del epicentro (López et al., 2.004); éstos son valores de aceleración bastante más pequeños a los especificados en la norma vigente para el diseño de nuevas escuelas en esa misma

zona (0,30g) (COVENIN, 2001) y sin embargo provocaron daños estructurales importantes que amenazaron la estabilidad global del edificio.

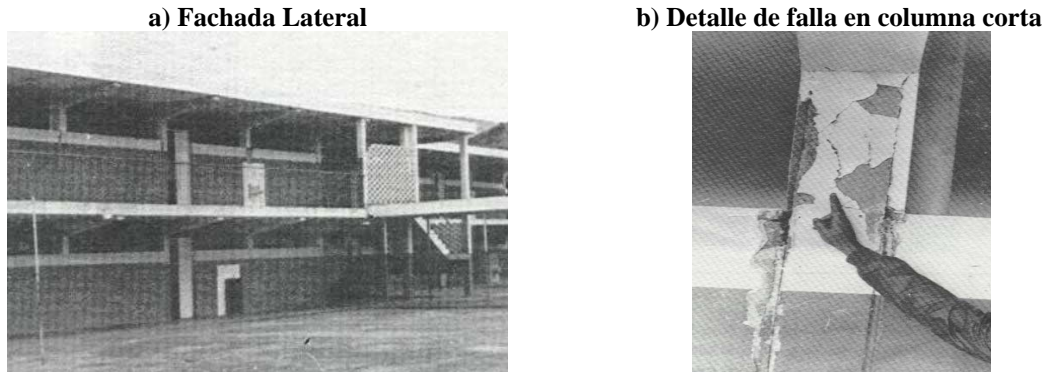


Figura 2.2. Varias columnas cortas de la Escuela Manuel Felipe Rugeles (Tipo Antiguo I) tuvieron grietas por cortante durante el sismo del Táchira de 1.981 (FUNVISIS, 1.981).

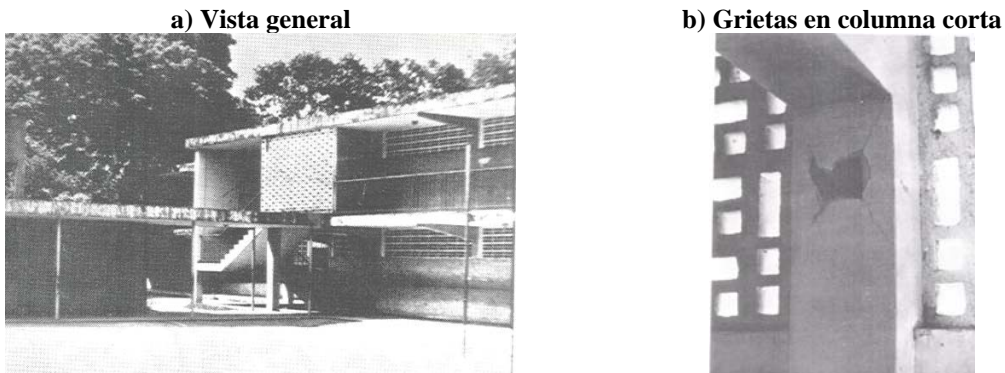


Figura 2.3. Escuela del Tipo Antiguo I localizada en Tunapuy, Estado Sucre. Una columna corta tuvo grietas por cortante durante el sismo de El Pilar de 1.986. (Malaver et al., 1.988).

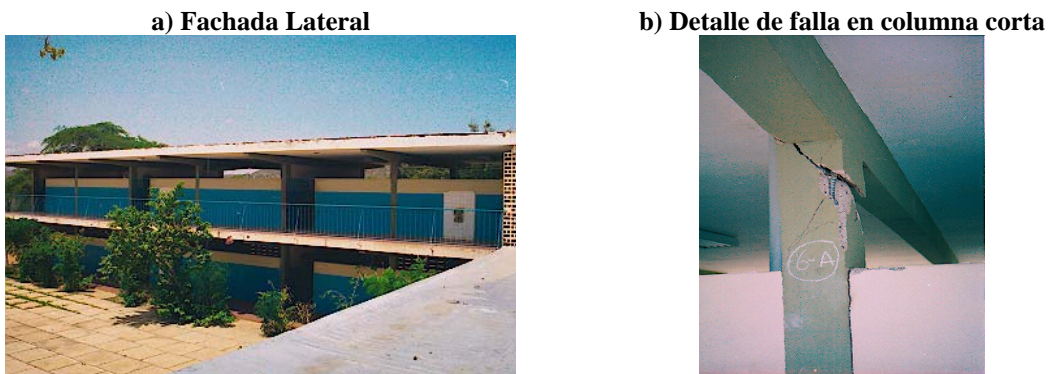


Figura 2.4. La U. E. Ananías Cotte sufrió la falla frágil de tres columnas cortas durante el sismo de Curarigua de 1.991 (Cortesía de A. Morón). Es una escuela Tipo Antiguo I.

Más graves fueron los efectos del terremoto de Cariaco ($M_s = 6,8$) en el Estado Sucre del 9 de Julio de 1.997 el cual derrumbó cuatro edificios pertenecientes a dos planteles escolares en Cariaco, provocando la muerte de 23 personas entre estudiantes y maestros. De un total de 592 escuelas inspeccionadas en el Estado Sucre después del terremoto, 35 (6%) sufrieron daños severos y tuvieron que ser sustituidas, 66 (11%) sufrieron daños estructurales moderados, 398 (67%) daño estructural ligero y 93 (16%) no sufrieron daños (FEDE, 1.998). Dos de los edificios derrumbados eran del Tipo Antiguo I y pertenecían a la Escuela Valentín Valiente (Figura 2.5). Los otros dos edificios eran del Tipo Cajetón y pertenecían al Liceo Raimundo Martínez Centeno (Figura 2.6). Los edificios del Tipo Cajetón están constituidos por pórticos de concreto armado de 3 o 4 niveles con abundancia de columnas cortas. Resultados de trabajos de campo y del análisis de la respuesta estructural no-lineal indican que el derrumbe de los edificios escolares en Cariaco fue el resultado de deficiencias estructurales para resistir terremotos: Baja resistencia, rigidez y capacidad de disipación de energía y la presencia de abundantes paredes de relleno que generaron columnas cortas y precipitaron modos de falla frágil (IMME, 1.998; Castilla y Marinilli, 2.000; López et. al, 2.007; López y Espinosa, 2.007).



Figura 2.5. Los dos edificios de la escuela Valentín Valiente derrumbados en el sismo de Cariaco de 1.997 son del Tipo Antiguo I que se encuentra en muchos otros lugares del país.



Figura 2.6. Los dos edificios del Liceo R. M. Centeno derrumbados en Cariaco en 1.997 pertenecen al Tipo Cajetón que se encuentran distribuidos en todo el país.

En el sismo de Cariaco también se observó el derrumbe de algunas paredes de relleno en una escuela del Tipo Rural, aparentemente sin mayores daños en la estructura. En la Figura 2.7 se muestra el volcamiento que sufrieron las paredes del Grupo Escolar Matías Parra Alcalá localizado en Casanay, el cual ya había sido reportado con daños estructurales leves durante los eventos de 1.974 (Alonso y Urbina, 1.974).



Figura 2.7. Volcamiento de paredes de relleno en el Grupo Escolar Matías Parra Alcalá en Casanay durante el sismo de Cariaco de 1.997 (cortesía FEDE).

Es necesario enfatizar que las deficiencias estructurales que dieron lugar al comportamiento inadecuado de las escuelas en los eventos sísmicos aquí examinados, eran propias de las edificaciones construidas con las normas vigentes para la época; en efecto, el desarrollo acelerado de la ingeniería sismorresistente en las últimas décadas ha dado lugar a un mejor conocimiento y al surgimiento de métodos y normas de diseño y construcción bastante más exigentes que las anteriores. De allí que es de esperar que en término medio una edificación construida con normas antiguas posea un grado de confiabilidad ante terremotos considerablemente menor que una moderna.

2.3 Esfuerzos Internacionales para la Protección de las Escuelas

Conviene destacar que la elevada vulnerabilidad a sismos de los edificios escolares es un problema reconocido a nivel internacional; varios países han emprendido desde hace años acciones para reforzar los edificios más antiguos. Un esfuerzo significativo para la reducción del riesgo sísmico en edificios escolares fue desarrollado en California en 1.933 con la aprobación de la Ley Field para escuelas públicas, poco tiempo después del terremoto de Long Beach que provocó el derrumbe de numerosas escuelas (Steinbrugge, 1.970; SSC, 2.004a); en la Ley se autorizó a la División de Arquitectura del Estado a revisar y aprobar los cálculos y los planos y a supervisar la construcción de nuevas escuelas. Más tarde en 1.968 se prescribieron nuevos reglamentos que obligaron a revisar y adecuar sísmicamente todas aquellas escuelas construidas antes de la aprobación de dicha ley. Terremotos ocurridos en California en las décadas subsiguientes demostraron la efectividad de estas acciones. En 1.986 se aprobó la Ley para Edificios Escolares Privados que exige desde entonces una confiabilidad a sismos similar a la de las escuelas públicas. Actualmente se desarrollan en California planes de refuerzo de miles de escuelas construidas antes de los cambios significativos que tuvieron las normas sísmicas en 1.976 después del terremoto de San Fernando (Meneses, 2.006). Más recientemente se han publicado documentos (FEMA, 2.002a) que recomiendan un conjunto de acciones de adecuación estructural a ser desarrollados paso a paso, en períodos de algunos años, que minimizan la interrupción de las actividades escolares. Se dispone también de guías para la reducción de los riesgos asociados a comportamientos inadecuados de los componentes no-estructurales (SSC, 2.004b).

Luego del desastre producido en 1.995 por el terremoto de Kobe en Japón, se iniciaron varios programas integrados dirigidos a la adecuación sísmica de los edificios escolares más vulnerables (Nakano, 2.004); se promulgaron leyes y se demolieron y reconstruyeron 54 edificios. En 1.996 se inició un programa de 5 años para adecuar los edificios escolares del país, el cual fue luego extendido por otros 5 años hasta el 2.005 (Nakano, 2.004). En el año 2.004 se inició en la Provincia de Columbia Británica de Canadá un ambicioso programa de 1,5 millardos de dólares para el refuerzo sísmico de 750 edificios

escolares (Taylor et al., 2.006). El propósito de esta iniciativa fue el de acelerar las mejoras en la seguridad de las escuelas públicas en las zonas de mayor amenaza de la Provincia. Para ello se desarrollaron técnicas de evaluación y refuerzo utilizando el estado del arte de la ingeniería sísmica basada en el desempeño (APEG/UBC, 2.006). Un programa para la evaluación del riesgo que asigna prioridades y define la secuencia en el tiempo para la rehabilitación sísmica, se ha aplicado en Italia a las aproximadamente 60.000 escuelas del país (Grant et al., 2.007). En Thessaloniki, Grecia, se ha propuesto un programa de refuerzo estructural de 500 escuelas que estima una inversión de 64 millones de euros (Spence, 2.004).

En el año 2.004 se organizó en París una reunión internacional de 30 expertos de 14 países con el objetivo de diseñar estrategias para proteger las escuelas contra los terremotos (Tucker, 2.006), bajo el patrocinio de la OECD y GeoHazards International. En julio de 2.005 los países miembros de la OECD acordaron poner en práctica un conjunto de acciones para la reducción de los riesgos sísmicos en las escuelas (OECD, 2004; OECD, 2.005). Con el lema “La Reducción de los riesgos de Desastres comienza en las Escuelas”, se desarrolló la campaña bienal 2.006-2.007 del Secretariado de las Naciones Unidas para una Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (UN, 2.006). Reduciendo la Vulnerabilidad de Escolares ante los Terremotos es el nombre de un programa promovido por el Centro de las Naciones Unidas para el Desarrollo Regional, que tiene el objetivo de formar a las comunidades para la mitigación de desastres (UNCRD, 2006).

Con el financiamiento del Ministerio del Poder Popular para la Ciencia y Tecnología se inició en Venezuela en el año 2.006 un proyecto de alcance nacional de tres años de duración que tiene como objetivo general el desarrollo de planes y procedimientos para la reducción del riesgo sísmico en las edificaciones escolares existentes en Venezuela (IMME-FUNVISIS-FEDE, 2.007).

3. EVALUACIÓN DEL RIESGO EN EL SISTEMA ESCOLAR NACIONAL

3.1 Amenaza Sísmica en las Escuelas

El mapa de zonificación de la norma venezolana COVENIN 1756 (COVENIN, 2001) divide al país en siete zonas, de diferente amenaza sísmica según se indica en la Tabla 3.1. La Norma le asigna el mayor Factor de Importancia a las edificaciones escolares, por lo que las aceleraciones del terreno a considerar en el diseño se incrementan un 30% en cada zona sísmica, en relación a otras edificaciones. Los valores de aceleración que se indican en la Tabla 3.1 son para roca y ya incorporan esta mayoración; están asociados a una probabilidad de excedencia de algo menos del 5% en un período de 50 años, equivalente a períodos de retorno del orden de 1000 años.

Tabla 3.1. Distribución de escuelas en las zonas sísmicas de Venezuela

Zona	Aceleración (g)	Número de Planteles	% de Planteles
7	0,52	556	2,0
6	0,46	1115	3,9
5	0,39	11328	40,3
4	0,33	6516	23,2
3	0,26	5655	20,1
2	0,20	2043	7,3
1	0,13	507	1,8
0	-	399	1,4
Total =		28.119	100

De acuerdo a los datos proporcionados por el Ministerio del Poder Popular para la Educación y del Instituto Nacional de Estadística existen un total de 28.119 planteles educativos distribuidos en todo el país. Con la información relativa a la localización de dichas escuelas se determinó el número de unidades en cada zona sísmica; la correlación entre la localización y la zonificación sísmica que se muestra en la Tabla 3.1 nos indica que aproximadamente un 70% de las escuelas, equivalente a un total de 19.515 unidades, están expuestas a amenazas que van desde alta (Zonas 4 y 5) a muy alta (Zonas 6 y 7).

Conviene asimismo señalar que numerosos edificios escolares del país han sido construidos a partir de unos pocos proyectos. Se estima que existen unas 500 edificaciones similares o idénticas a las derrumbadas en Cariaco, estando la mayoría de ellas localizadas en zonas de alta amenaza sísmica (IMME-FUNVISIS-FEDE, 2007). Sin embargo, no se conoce con precisión la localización de estas edificaciones, puesto que el tipo constructivo de un plantel no es una información que aparezca en las bases tradicionales de datos existentes en los organismos oficiales. Adicionalmente, de las aproximadamente 28.000 escuelas existentes en el país un porcentaje muy alto fue construido con las normas de 1.939, 1.947, 1.955 y 1.967, las cuales contenían exigencias sismorresistente considerablemente menores a las de las normas posteriores de 1.982 y 1.998. Como consecuencia, tenemos un porcentaje mayoritario de nuestra población escolar sujeta a riesgos mayores a los tolerables de acuerdo a las normas modernas.

3.2 Procedimientos de Evaluación e Información Necesaria

El “índice de riesgo” se define en este trabajo como un parámetro determinista, ya sea dado por el cociente entre la demanda esperada de desplazamientos y la capacidad disponible o ya sea por el producto de un índice de vulnerabilidad y un índice de amenaza. El procedimiento a seguir para la evaluación del índice de riesgo a que está expuesta una edificación escolar existente, depende de la cantidad de información disponible. A continuación se presentan tres fases de evaluación, organizados desde la que requiere menor hasta la que requiere mayor información. La aplicación de la primera fase a una muestra grande de edificios permitiría seleccionar aquellos de mayor índice que pasarían luego a la segunda fase de inspección visual, la cual a su vez permitiría priorizar aquellos que pasarían a la tercera fase de estudios detallados.

a) *Evaluación a partir de la edad y de la localización del edificio*

En ausencia de mayor información sobre el edificio escolar, una primera aproximación a la determinación de indicadores de riesgo consiste en suponer que los edificios fueron diseñados y construidos siguiendo y cumpliendo con las normas vigentes al momento del proyecto. Conociendo la norma para el momento de la construcción y el número de pisos, es posible estimar las fuerzas (como una fracción del peso) y las deformaciones que definen la capacidad resistente del edificio. Por otro lado, conociendo la localización del edificio y suponiendo valores de sus propiedades fundamentales se puede estimar la demanda de desplazamiento que impondría la acción de los movimientos sísmicos definidos con base en la amenaza sísmica conocida en el país, para cualquier valor deseado del periodo de retorno o probabilidad de excedencia. La relación entre la demanda y la capacidad permitiría inferir de una manera aproximada el daño potencial y el riesgo. En la Sección 4 se propone una metodología de cálculo para determinar este indicador de riesgo.

Al no requerir levantamiento de planos ni inspección del edificio, este procedimiento tiene la ventaja de que puede ser aplicado a un gran número de planteles escolares lo que permitiría jerarquizar los mismos en función de su mayor grado de riesgo a fin de seleccionar aquellos edificios que pasarían a una siguiente fase de evaluación que sí implicaría la inspección del edificio. Por otro lado aún cuando las bases de datos o sistemas SIG de planteles escolares disponibles en el país disponen de abundante información sobre los aspectos educacionales del plantel, no poseen información sobre el año de

construcción ni del número de pisos, tampoco sobre las tipologías constructivas de los edificios que lo constituyen. En el marco del programa nacional descrito previamente la información requerida para los más de 28.000 planteles escolares del país se recolecta a través del Censo Escolar Nacional el cual recibe la información de cada plantel vía *Internet*. En dicho censo se incluyó la consulta sobre el año de construcción y el número de pisos de cada edificio del plantel. Adicionalmente y con la finalidad de identificar aquellas tipologías más vulnerables tales como las que se derrumbaron en Cariaco, se le pide identificar, si es el caso, el tipo constructivo del edificio entre varias imágenes que describen los tipos más comunes construidos en el siglo XX (IMME-FUNVISIS-FEDE, 2.007).

b) Evaluación a partir de la inspección rápida de escuelas

Mediante inspección visual y utilizando instrumentos específicos de recolección de información, es posible asignar índices de riesgo a un edificio escolar. Este procedimiento se suele denominar como inspección rápida porque no requiere de levantar toda la información del edificio y ha sido utilizado exitosamente en diversos países (FEMA 2002b; Meneses 2006). De la inspección visual se determina un índice de vulnerabilidad el cual puede ser combinado con un índice de amenaza sísmica y un índice de población escolar a fin de definir un índice de riesgo que permitiría jerarquizar un grupo de edificios y seleccionar aquellos que pudiesen pasar posteriormente a la fase de estudios detallados.

c) Evaluación a partir de estudios detallados

Una evaluación óptima de la confiabilidad de un edificio escolar para resistir los movimientos sísmicos previstos en las normas vigentes, requiere de disponer de una información completa acerca de la geometría de la estructura y las dimensiones de sus miembros, tanto de la superestructura como de sus fundaciones y de los materiales con que fue construida. Especialmente en el caso de edificios escolares es indispensable conocer además la localización de las paredes de relleno, su geometría y sus materiales, para identificar la potencial generación de columnas cortas. Esta información que debiese estar contenida en los planos de arquitectura y de estructura que dieron lugar a la construcción, no suele estar disponible en edificaciones escolares antiguas. Es necesario en consecuencia levantar la información a través de inspecciones detalladas en sitio, para luego proceder a elaborar los modelos matemáticos lineales y no lineales que sean necesarios para la determinación de la demanda que impone el movimiento sísmico y su comparación con la capacidad disponible por la estructura, para los varios niveles de desempeño seleccionados.

4. INDICADORES DE RIESGO Y DE DAÑO A PARTIR DE LA EDAD Y LA LOCALIZACIÓN DEL EDIFICIO

Se propone a continuación una metodología para estimar indicadores de riesgo y de daño con base en el conocimiento de la edad de la construcción y por ende de la norma de cálculo estructural vigente en esa época, bajo la hipótesis de que el edificio escolar se diseñó y construyó en cumplimiento de dicha normativa, independientemente del lugar de ubicación y de la fecha de ejecución. Los indicadores se basan en estimar la demanda de desplazamiento que introduciría un sismo especificado sobre la estructura, y compararla con una estimación de la capacidad disponible. Estos indicadores permitirían hacer una selección inicial de los edificios escolares de mayor riesgo, los cuales podrían pasar luego a una segunda fase de inspección visual. Adicionalmente, la metodología aquí presentada pudiese extenderse hacia la estimación de pérdidas esperadas en el sistema escolar nacional por la ocurrencia de sismos futuros y para la elaboración de mapas de riesgo.

A conocimiento del autor la primera norma venezolana que reguló el diseño y construcción de edificios fue la “Norma para el Cálculo de Edificios” del Ministerio de Obras Públicas del año 1.939 (MOP, 1.939) en la cual se establecía que éstas “regirán para todas las obras nacionales dependientes de la Dirección de Edificios de este Ministerio y serán obligatorias a partir del 1° de enero de 1.940”. Los

aspectos de diseño sismo-resistente estaban contenidos en un artículo de aproximadamente una página de extensión denominado “Estabilidad contra movimientos sísmicos”. Esta Norma fue sustituida posteriormente por la de 1.947 (MOP, 1.947), luego por la de 1.955, (MOP, 1.955) influenciada por el terremoto del Tocuyo de 1.954, y finalmente por la de 1.967 que introduce nuevos criterios de análisis y diseño, impulsados a raíz del terremoto de Caracas del mismo año y cuya extensión fue de 17 páginas (MOP, 1.967). Más adelante, en 1.982, La Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y el Ministerio de Desarrollo Urbano (MINDUR) publican la Norma “Edificaciones Antisísmicas” que se convierte en la Norma COVENIN 1756 (COVENIN, 1982), con mejoras significativas respecto a la Norma de 1.967. Una nueva norma actualizada y mejorada se publica en 1.998, a la cual se le introducen pocos cambios en una nueva versión del 2.001 (COVENIN, 2001), actualmente en vigencia y que tiene una extensión de 71 páginas de articulado y 123 páginas de Comentarios, a las cuales deberían sumarse las páginas que describen los capítulos de diseño sismo-resistente contenidos en las normas COVENIN 1753 (Estructuras de Concreto Armado) y COVENIN 1618 (Estructuras de Acero).

4.1 Procedimiento de Cálculo

a) *Capacidad a fuerza cortante en la base del edificio*

La fuerza cortante en la base utilizada en el diseño de un edificio se suele estipular en las normas en función del peso (W) del edificio. En este estudio, la fuerza dada en la norma será amplificada según el criterio de diseño empleado en cada norma específica, a fin de estimar la fuerza a nivel de cedencia proveniente del diseño. Luego dicha fuerza es multiplicada por el factor de sobrerresistencia Ω_o . La sobrerresistencia de una estructura proviene de los materiales empleados, de los criterios de diseño seguidos y de la redundancia del sistema estructural. Los valores de Ω_o pueden variar entre 2 y 3,5 para pórticos de concreto armado o de acero (FEMA, 2003); en este trabajo se adoptará un valor de $\Omega_o = 2,7$ el cual es el promedio de los valores recomendados en FEMA. El resultado de multiplicar la fuerza de diseño por la sobrerresistencia es la fuerza cortante basal resistente (V_y), de un sistema elástico-perfectamente plástico, representativo del comportamiento del edificio.

Norma de 1.939:

La fuerza cortante basal resistente está dada por:

$$\frac{V_y}{W} = 1,33 \cdot C \cdot \Omega_o \quad (4.1)$$

Donde C es igual a 0,05 en edificios mayores de tres pisos localizados en cualquier lugar del país, y en edificios de cualquier número de pisos en los lugares del país situados en la zona montañosa de los Andes y de la Costa. Por tanto no se exigía el cálculo sísmico en edificios de 1, 2 o 3 pisos localizados en zonas no montañosas, como por ejemplo Maracaibo. El factor multiplicador de 1,33 permite llevar a nivel de cedencia la fuerza cortante normativa la cual consideraba en el diseño unos esfuerzos admisibles en los materiales aproximadamente iguales a 0,5 veces su resistencia, y se multiplicaban por 1,5 al tomar en cuenta el movimiento sísmico: $(1/0,5) \times (1/1,5) = 1,33$. Por ejemplo, para un edificio escolar de 2 plantas sobre cualquier tipo de suelo y adoptando un factor de sobrerresistencia $\Omega_o = 2,7$ tenemos de la Ec. (4.1) que $V_y/W = 0,180$ en Caracas o en Cumaná.

Norma de 1.947:

La fuerza cortante basal resistente está dada por:

$$\frac{V_y}{W} = 1,5 \cdot C \cdot \Omega_0 \quad (4.2)$$

En esta norma se presenta por primera vez un mapa de zonificación que divide al país en tres zonas (A, B, C). El coeficiente C en la fórmula 5.2 tiene un valor de 0,05 para “la estructura del edificio en conjunto” en la Zona A, y duplicándose en la zona B que comprendía áreas del Estado Sucre, incluyendo Cumaná. No se exigía el cálculo sísmico en la Zona C la cual incluía entre otros la mayor parte de los estados Zulia (incluyendo Maracaibo), Falcón (incluyendo Coro), Monagas (incluyendo Maturín) y Anzoátegui. El factor multiplicador de 1,5 lleva a nivel de cedencia la fuerza cortante normativa, la cual consideraba en el diseño unos esfuerzos admisibles en los materiales aproximadamente iguales a 0,5 veces la resistencia, los cuales se multiplicaban por 1,33 al tomar en cuenta el movimiento sísmico. Para un edificio escolar de cualquier número de pisos, localizado sobre cualquier suelo con un factor de sobrerresistencia $\Omega_0 = 2,7$, de la Ec. (4.2) tenemos que V_y/W vale 0,202 en Caracas y 0,405 en Cumaná.

Norma de 1.955:

La fuerza cortante basal resistente está dada por:

$$\frac{V_y}{W} = 1,5 \cdot C \cdot \Omega_0 \quad C = \frac{0,30}{N + 4,5} \quad \text{en la Zona B} \quad (4.3 \text{ a,b})$$

La Zona B incluía buena parte de los estados andinos y los estados Zulia, Falcón, Yaracuy, Carabobo, Aragua, Distrito Federal y Miranda. Los valores de C se duplicaban en la Zona C que comprendía los estados Sucre, Nueva Esparta y Táchira, y partes de Lara, Portuguesa, Trujillo y Monagas. En la Zona A no se exigía el cálculo sísmico, la cual incluía todo el Estado Anzoátegui y el resto del país. N es el número de pisos por encima del piso en consideración. El factor de 1,5 tiene un origen similar al de la Norma de 1.947. Para un edificio escolar de 2 pisos, localizado sobre cualquier suelo y para $\Omega_0 = 2,7$ tenemos que V_y/W vale 0,187 en Caracas o Maracaibo y 0,374 en Cumaná.

Norma de 1.967:

La fuerza cortante basal resistente está dada por:

$$\frac{V_y}{W} = 1,5 \cdot C \cdot \Omega_0 \quad (4.4)$$

Donde los valores de C vienen dados en una tabla; para la zona de mayor amenaza (Zona 3) varían entre 0,045 y 0,15, dependiendo del tipo de estructura, del uso del edificio y del tipo de suelo. La zona de mayor amenaza incluía buena parte de los estados andinos, el área metropolitana de Caracas y alrededores, los estados Sucre, Nueva Esparta y partes de Anzoátegui y Monagas. Estos valores se multiplicaban por 0,5 y 0,25 para las zonas 2 y 1 de menor amenaza, respectivamente. Así por ejemplo, a Maracaibo le correspondía la Zona 2. Tal como en las normas de 1.947 y 1.955, el factor de 1,5 incorpora la corrección a los criterios de diseño con esfuerzos admisibles usados en dicha norma. Por ejemplo, para un edificio escolar (Grupo 1) de cualquier número de pisos, con estructura de pórticos (Tipo I) localizada sobre depósitos aluvionales, se tiene $C=0,075$; adoptando $\Omega_0 = 2,7$ se tiene de la Ec. (4.4) que V_y/W vale 0,304 en Caracas o en Cumaná pero 0,152 en Maracaibo.

Norma de 1.982:

Para efectos de estimar la resistencia en un edificio escolar (pocos pisos) utilizaremos la expresión contenida en el Método Estático Equivalente de dicha norma. La fuerza cortante basal resistente está dada por:

$$\frac{V_y}{W} = \mu_o \cdot A_d(T) \cdot \Omega_o \quad \mu_o = \frac{3}{2} \frac{(N+1)}{(2N+1)} \quad (4.5 \text{ a,b})$$

Donde N es el número de pisos, $A_d(T)$ es la aceleración espectral de diseño dividida entre la aceleración de gravedad y T es el período fundamental de vibración. De acuerdo a esta norma adoptaremos para pórticos $T=1,2T_a=0,0732 h_n^{3/4}$. $A_d(T)$ depende de la Zona sísmica, del Perfil del Subsuelo, del Uso del edificio, y del Factor de Ductilidad (D) el cual define la capacidad disponible de respuesta inelástica. D es seleccionado dependiendo del Tipo de Estructura y del Nivel de Diseño. El país se divide en cinco zonas (Zona 0 a Zona 4) y se especifican por primera vez en el país aceleraciones del terreno (hasta 0,30g) asociadas a un período de retorno de 475 años. Por ejemplo, para un edificio escolar de 2 pisos, con estructura de pórticos diseñada con Nivel de Diseño 3 (D=6), período fundamental $T=0,33$ segundos, localizada sobre un perfil de suelos medianamente densos (S2) y $\Omega_o=2,7$ de la Ec. (4.5) se obtiene que V_y/W vale 0,335 en Caracas o en Cumaná y 0,167 en Maracaibo.

Norma de 1.998 y de 2.001:

Al igual que en la Norma de 1.982 la resistencia de un edificio escolar (pocos pisos) la estimamos con la expresión contenida en el Método Estático Equivalente. La fuerza cortante basal resistente está dada por:

$$\frac{V_y}{W} = \mu_o \cdot A_d(T) \cdot \Omega_o \quad \mu_o = 1,4 \frac{(N+9)}{(2N+12)} \quad (4.6 \text{ a,b})$$

Donde todas las variables han sido definidas previamente en la Norma de 1.982. De acuerdo a la norma se puede adoptar $T=1,4T_a=0,098 h_n^{3/4}$ para pórticos de concreto armado. $A_d(T)$ depende de la Zona sísmica, del Uso del edificio, de las características del perfil geotécnico, de la regularidad estructural y del Factor de Reducción (R) el cual incorpora la capacidad de ductilidad y en alguna medida la sobrerresistencia. R es seleccionado dependiendo del Material, del Tipo de Estructura y del Nivel de Diseño. El país se divide en ocho zonas con aceleraciones de hasta 0,40g con períodos de retorno de 475 años. Por ejemplo, para un edificio escolar de 2 pisos, regular, con estructura de pórticos de concreto armado diseñada con Nivel de Diseño 3 (R=6), se tiene que el período fundamental es $T=0,38$ segundos; si está localizada sobre suelo denso de profundidad entre 15 m y 50 m (S2, $\varphi=0,90$) y $\Omega_o=2,7$ tenemos de la Ec. (4.6) que V_y/W vale 0,270 en Maracaibo, 0,396 en Caracas y 0,540 en Cumaná.

b) Capacidad de deformación; cedente y última

El desplazamiento cedente (u_y) en el último nivel de una estructura de pocos pisos, asociado a la fuerza cortante resistente en la base (V_y), se puede determinar suponiendo que la respuesta dinámica está contenida en el modo fundamental de período efectivo T_e . De la teoría de dinámica estructural el desplazamiento cedente en el modo 1 está dado por:

$$u_y = \alpha_1 \cdot D_1 \quad (4.7)$$

Donde α_1 es el factor de participación del modo fundamental en el desplazamiento del último piso (López y Cruz 1.996) y D_1 es el desplazamiento espectral del modo fundamental.

El cortante basal se puede escribir como:

$$V_y = \beta_1 \cdot m \cdot S_a \quad (4.8)$$

Donde β_1 es la fracción de la masa total (m) contenida en el modo 1 y S_a es la aceleración espectral del modo 1. Sustituyendo $S_a = (2\pi/T_e)^2 \cdot D_1$ y $m = W/g$ en la Ec. (4.8), siendo W el peso total y g la aceleración de gravedad, despejando D_1 y sustituyéndolo en (4.7) queda:

$$u_y = \frac{\alpha_1}{\beta_1} \cdot \frac{V_y}{W} \cdot g \cdot \left(\frac{T_e}{2\pi}\right)^2 \quad (4.9)$$

El factor α_1 se puede adoptar como igual a 1, 1,15, 1,20, 1,25 y 1,30, para edificios de 1, 2, 3, 4 y 5 pisos, respectivamente (FEMA 2000; López y Cruz 1.996); β_1 es la fracción de la masa del edificio contenida en el modo fundamental, la cual se puede hacer igual al valor de μ_0 dado en la Ec. (4.6b).

El desplazamiento último (u_u) en el último nivel del edificio se determina a partir de:

$$u_u = \mu \cdot u_y \quad (4.10)$$

Donde μ es el factor de capacidad dúctil global que se le puede asignar a la estructura, idealizada como un sistema elástico-perfectamente plástico, el cual se puede estimar a partir de la norma de diseño empleada, de los planos y de las prácticas constructivas para el año de construcción de la edificación, así como de resultados publicados de ensayos y de estudios analíticos con modelos no-lineales.

La deriva global normalizada a nivel de cedencia (D_y), y última (D_u), se definen como:

$$D_y = \frac{u_y}{H}; \quad D_u = \frac{u_u}{H}; \quad (4.11 \text{ a,b})$$

Donde H es la altura total del edificio.

c) *Demanda de desplazamiento ante un sismo dado*

Sea un movimiento sísmico definido por su espectro de aceleraciones. La demanda de desplazamiento que impone dicho sismo se puede estimar como (FEMA, 2000; FEMA, 2005):

$$u_d = C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_a(T_e) \cdot (T_e/2\pi)^2 \quad (4.12)$$

Donde:

u_d : Desplazamiento en el último nivel de la estructura.

$S_a(T_e)$: Aceleración espectral del sistema elástico de periodo efectivo T_e y amortiguamiento de 5%.

C_0 : Factor de corrección que correlaciona el desplazamiento del último piso con el de un sistema de un grado de libertad, el cual es igual al factor α_1 definido previamente en la Ec. 4.7: $C_0 = 1, 1,15, 1,20, 1,25$ y $1,3$ para edificios de 1, 2, 3, 4 y 5 pisos, respectivamente.

C_1 : Factor de corrección que correlaciona el máximo desplazamiento del sistema inelástico con el del sistema elástico. C_1 es función de la intensidad del movimiento sísmico y está dado por:

$$C_1 = 1 + \frac{R-1}{b T_e^2} \quad R = \frac{S_a(T_e)/g}{V_y/W} \cdot C_m \quad (4.13a,b)$$

R es el cociente entre la demanda elástica y la capacidad, en términos de la fuerza cortante basal, $b = 130, 90$ y 60 para roca sana, suelo muy duro y suelo denso, respectivamente, y C_m es la fracción de la

masa participando en el modo fundamental para la cual adoptamos los valores de μ_0 dados por la Ec. (4.6 b). Para $T_e < 0,2s$, C_1 se toma igual al valor que tiene para $T_e=0,2$. Para $T_e > 1s$, $C_1=1$.

C_2 : es el factor de corrección que representa el efecto de la degradación de rigidez y de resistencia y el estrangulamiento de las curvas fuerza-deformación. Para $T_e < 0,2s$, C_2 se toma igual al valor que tiene para $T_e=0,2$. Para $T_e > 0,7s$, $C_2=1$. C_2 es también función de la intensidad del sismo (incorporada en R) y está dado por:

$$C_2 = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{R-1}{T_e} \right)^2 \quad (4.14)$$

C_3 : es el factor de corrección para representar los efectos $P-\Delta$ dinámicos. Para los edificios escolares de no mas de cuatro pisos, adoptaremos $C_3=1$.

d) *Relación demanda/capacidad y estados de daño*

Para efectos de estimar el daño estructural inducido por sismos en escuelas, se pueden definir los cinco estados que se presentan a continuación: 1- Sin Daño; 2- Daño Ligero; 3- Daño Moderado; 4- Daño Severo, y 5- Colapso. Cada Estado se expresa en función de la demanda de desplazamiento (u_d) y su relación con el desplazamiento cedente (u_y) y el último (u_u), ver Figura 4.1:

- | | | |
|-------------------|------------------------------------------------------|----------------|
| 1- Sin Daño: | $u_d < 0,75 u_y$ | |
| 2- Daño Ligero: | $0,75 u_y \leq u_d < 1,25 u_y$ | |
| 3- Daño Moderado: | $1,25 u_y \leq u_d < 1,25 u_y + 0,5(u_u - 1,25 u_y)$ | (4.15 a,b,c,d) |
| 4- Daño Severo: | $1,25 u_y + 0,5(u_u - 1,25 u_y) \leq u_d < u_u$ | |
| 5- Colapso: | $u_d \geq u_u$ | |

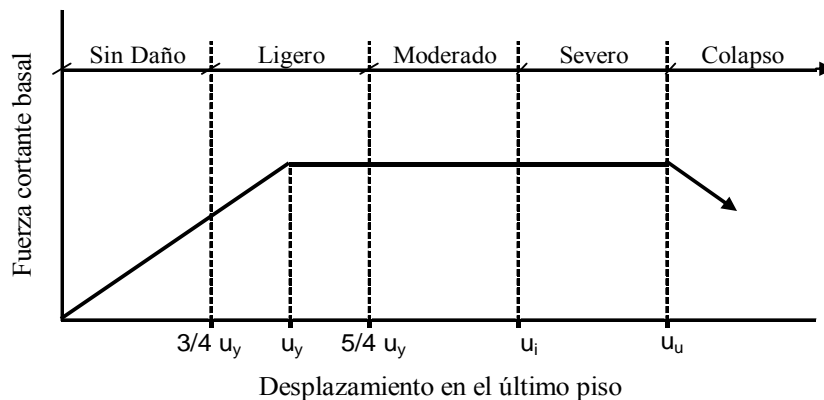


Figura 4.1. Estados de Daño Estructural. El desplazamiento $u_i = 1,25 u_y + 0,5 (u_u - 1,25 u_y)$.

e) *Aceleración del sismo necesaria para alcanzar determinado estado de daño*

La aceleración del movimiento sísmico (a_u) que se requiere para alcanzar el estado de colapso se calcula igualando la demanda de desplazamiento (Ec. 4.12) con el desplazamiento último (Ec. 4.10):

$$u_d = u_u \quad (4.16)$$

$$C_0 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot C_3 \cdot S_{au}(T_e) \cdot (T_e/2\pi)^2 = \mu \cdot \left[\frac{\alpha_1}{\beta_1} \cdot \frac{V_y}{W} \cdot g \cdot \left(\frac{T_e}{2\pi} \right)^2 \right] \quad (4.17)$$

Donde $S_{au}(T_e)$ es la aceleración espectral del sistema elástico de período T_e y amortiguamiento 5% para una aceleración del terreno igual a a_u .

Descomponiendo la aceleración espectral, $S_{au}(T_e)$, en términos de la aceleración del terreno (a_u) y la forma espectral, $f(T_e)$, se tiene:

$$S_{au}(T_e) = f(T_e) \cdot a_u \quad (4.18)$$

Sustituyendo (4.18) en (4.17), cancelando C_0 con α_1 y despejando a_u se obtiene:

$$\frac{a_u}{g} = \frac{\mu \cdot V_y / W}{\beta_1 C_1(a_u) C_2(a_u) f(T_e)} \quad (4.19)$$

$$C_1(a_u) = 1 + \frac{R_u - 1}{b T_e^2} \quad ; \quad C_2(a_u) = 1 + \frac{1}{800} \left(\frac{R_u - 1}{T_e} \right)^2 \quad (4.20 \text{ a,b})$$

$$R_u = \frac{S_{au}(T_e)/g}{V_y/W} \cdot C_m \quad (4.21)$$

En donde se destaca que los coeficientes C_1 y C_2 son funciones de la intensidad del sismo representada por a_u . La Ec. (4.19) es una ecuación no-lineal que debe ser resuelta mediante iteraciones. De manera similar se puede determinar la aceleración del terreno asociada a cualquier otro estado de daño.

f) Organización del procedimiento para estimar el índice de riesgo y el estado de daño

Datos:

- i- La fecha de construcción, la localización y el número de pisos (N) del edificio
- ii- Se estiman los valores del período efectivo (T_e), del factor de capacidad dúctil (μ) y del factor de sobrerresistencia (Ω_o)

Cálculos:

- i- Identificar la norma de construcción empleada y determinar la fuerza cortante basal resistente dividida entre el peso (Ec. 4.1 a 4.6)
- ii- Determinar el desplazamiento cedente (u_y) y el último (u_u) (Ec. 4.9 y 4.10)
- iii- Determinar la aceleración espectral (S_a) del sistema elástico con período T_e y amortiguamiento de 5%, a partir de la amenaza sísmica conocida para la zona y para el período de retorno seleccionado
- iv- Determinar la demanda de desplazamiento (u_d) (Ec. 4.12 a 4.14)
- v- Determinar indicadores de riesgo, dados por los cocientes u_d/u_u y u_d/u_y
- vi- Determinar el estado de daño esperado (Ec. 4.15)
- vii- Determinar la aceleración del sismo necesarias para alcanzar determinado estado de daño (Ec. 4.19 a 4.21)

Conviene destacar que en la metodología propuesta se requiere únicamente conocer tres parámetros de la estructura a efectos de estimar el índice de riesgo y el estado de daño producido; estos parámetros son el período efectivo (T_e), la fuerza cortante resistente expresada en forma adimensional

como una fracción del peso del edificio (V_y/W), la cual incluye la sobrerresistencia, y el factor de capacidad dúctil (μ).

4.2 Ejemplos de Aplicación

Sea un edificio escolar de dos pisos constituido por pórticos de concreto armado el cual se supone que fue diseñado y construido en seis diferentes épocas, cumpliendo en cada diseño con la norma vigente en el momento (1.939, 1.947, 1.955, 1.982 y 1.998). Está localizado sobre un suelo de dureza intermedia que se puede clasificar como aluvional en la norma de 1.967 y como S2 en las de 1.982 y 1.998. Para todos los edificios se ha estimado una sobrerresistencia $\Omega_o=2,7$.

a) *Período efectivo*

El período efectivo para el ejemplo del edificio escolar de dos pisos se estima a partir de resultados de análisis de varios edificios escolares típicos de dos y tres pisos, diseñados y construidos con las normas previas a la de 1.982, que se listan en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Períodos de vibración de algunos edificios escolares.

Escuela	Tipo	Nº de Pisos	Año de Construcción	Período de Vibración (s)				Referencia
				Estructura Sola		Estructura con Paredes		
				L	T	L	T	
V. Valiente (Cariaco)	Antiguo I (Sin Vigas en dirección L)	2	1950-1960	1,40	0,63	0,65	0,11	Fernández N. 1999
J. A. Rodríguez A. (Carúpano)	Antiguo I (Vigas planas en dirección L)	2	1950-1960	0,83	0,53	0,31	0,15	Goncalvez Z., Ynfante M. 2008
Luis A. Alvarado (Cagua)	Antiguo I (Vigas Planas en dirección L)	2	1950-1960	1,10	0,71	0,35	0,16	Ebres D., Olivo M. 2008
Ambrosio Plaza (Guarenas)	Antiguo II	2	1950-1960	1,24	1,20	0,38	0,28	Abou F., Lee C. 2005
Lisandro Lecuna (Valencia)	Antiguo II	2	1950-1960	1,65	1,63	0,35	0,31	Márquez L., Rodríguez H. 2007
R. M. Centeno (Cariaco)	Cajetón Abierto	3	1970-1980	0,85	0,91	0,69	0,48	Espinoza L. F. 2005
D. F. Sarmiento (Caracas)	Cajetón Cerrado (Vigas Planas en Dirección T)	3+1	1970-1980	0,92	1,46	0,42	0,24	Taboada A., Sosa M. 2007
Corazón De Jesús (Cumana)	Cajetón Cerrado (Vigas Planas en Dirección T)	3	1980-1981	0,78	1,37	0,34	0,28	Lárez M., Gazcón J. 2008
Cirilo Alberto (Guacara)	Stac	2	1982-1983	0,90	0,64	0,37	0,24	Guzmán G., Rojas L. 2008

En dichos análisis se consideró la inercia asociada a las secciones agrietadas de los elementos estructurales, de acuerdo a lo recomendado en (Pauley y Priestley 1.992). Se muestran en dicha Tabla los valores del período del modo fundamental para ambas direcciones horizontales (Longitudinal L y Transversal T) de cada edificio, para un modelo de la estructura sola y otro de la estructura con paredes.

El efecto de las paredes se modeló mediante bielas equivalentes, de acuerdo a lo recomendado en (Pauley y Priestley 1.992), suponiendo un estado de deformación tal que la pared se ha separado del pórtico en las esquinas traccionadas. Las cinco primeras escuelas en la Tabla 4.1 son construcciones hechas antes de 1.967, mientras que las cuatro últimas fueron diseñadas con la Norma de 1.967. Seleccionando como período de referencia al mayor valor entre los valores correspondientes a las direcciones L y T, se tiene para las escuelas construidas antes de 1.967 un valor medio de 1,24 s para la estructura sola y de 0,41 s para la estructura con paredes. Adoptando un valor de referencia correspondiente a un estado de respuesta intermedio entre ambos modelos, se tiene una media de 0,83 s. Para los edificios diseñados con la norma de 1.967 se obtiene un valor medio de 0,81 s, similar al anterior.

Para efectos de este ejemplo de estimar la demanda sobre el edificio de dos pisos, se adopta un valor del período efectivo $T_e = 0,80$ s para diseños hechos con las normas de 1.939, 1.947, 1.955 y 1.967. Para las normas de 1.982 y 1.998 se adopta $T_e = 0,60$ s, tomando en consideración el aumento en la sección mínima de columnas que la llevó hasta 30 cm en la norma de concreto armado COVENIN 1753-85 (COVENIN 1987).

b) Cortante basal resistente y ductilidad

En la Tabla 4.2 se muestran los valores de la fuerza cortante basal resistente de cada edificio, dividida entre el peso, V_y/W , obtenidas de aplicar las fórmulas 4.1 a 4.6 para localizaciones en tres ciudades distintas (Maracaibo, Caracas y Cumaná). Para la norma de 1.982 se adoptó $T=0,33$ s y $D=6$ mientras que para la de 1.998 $T=0,38$ s y $R=6$. En el caso de los edificios ubicados en Maracaibo y construidos según las normas de 1.939 y 1.947 las cuales no exigían cálculo sísmico, se adoptó un valor de $V_y/W=0,03 \Omega_0$ suponiendo una resistencia lateral mínima que proviene del diseño a cargas gravitatorias. Considerando los criterios de cada norma y las prácticas constructivas de cada época, se estimaron los valores del factor de capacidad dúctil (μ) que se muestran en la Tabla 4.2. También se muestran allí los valores estimados del período efectivo T_e . El desplazamiento cedente para cada edificio se obtuvo de la Ec. 4.9 utilizando valores de $\alpha_1=1,15$ y $\beta_1 = 0,9625$ para $N= 2$ pisos. El desplazamiento último se obtuvo de la Ec. 4.10. En la Tabla 4.3 se muestran los valores del desplazamiento cedente y del desplazamiento último para cada norma en la ciudad de Maracaibo. Los casos de Caracas y Cumaná se presentan en las Tablas 4.4 y 4.5.

Tabla 4.2. Propiedades del edificio escolar de 2 pisos con pórticos de concreto armado, diseñado de acuerdo a las diferentes normas, en tres ciudades.

Edificio según la Norma	Período Efectivo T_e (s)	Factor de Capacidad Dúctil μ	Cortante Basal Resistente/Peso V_y/W		
			Maracaibo	Caracas	Cumaná
1939	0,8	2	0,081	0,180	0,180
1947	0,8	2	0,081	0,203	0,405
1955	0,8	2	0,187	0,187	0,374
1967	0,8	3	0,152	0,304	0,304
1982	0,6	4	0,167	0,335	0,335
1998	0,6	4,5	0,270	0,396	0,540

Tabla 4.3. Desplazamiento cedente, Último y demanda de desplazamiento para un edificio escolar diseñado según diferentes normas y localizado en Maracaíbo. Amenaza Sísmica actual, con Período de Retorno de 475 años.

Edificio según la norma	u_y (cm)	u_u (cm)	R	C_o	C_1	C_2	u_d (cm)
1939	1,539	3,078	5,407	1,150	1,115	1,038	9,628
1947	1,539	3,078	5,407	1,150	1,115	1,038	9,628
1955	3,550	7,100	2,344	1,150	1,035	1,004	8,643
1967	2,886	8,657	2,884	1,150	1,049	1,007	8,790
1982	1,789	7,157	2,990	1,150	1,092	1,014	5,923
1998	2,886	12,986	1,854	1,150	1,040	1,003	5,575

Tabla 4.4. Desplazamiento cedente, Último y demanda de desplazamiento para un edificio escolar diseñado según diferentes normas y localizado en Caracas. Amenaza Sísmica actual, con Período de Retorno de 475 años.

Edificio según la norma	u_y (cm)	u_u (cm)	R	C_o	C_1	C_2	u_d (cm)
1939	3,420	6,841	3,649	1,150	1,069	1,014	13,526
1947	3,848	7,696	3,244	1,150	1,058	1,010	13,341
1955	3,550	7,100	3,516	1,150	1,066	1,012	13,464
1967	5,772	17,315	2,163	1,150	1,030	1,003	12,894
1982	3,578	14,314	2,242	1,150	1,058	1,005	8,531
1998	4,228	19,025	1,898	1,150	1,042	1,003	8,381

Tabla 4.5. Desplazamiento cedente, Último y demanda de desplazamiento para un edificio escolar diseñado según diferentes normas y localizado en Cumaná. Amenaza Sísmica actual, con Período de Retorno de 475 años.

Edificio según la norma	u_y (cm)	u_u (cm)	R	C_o	C_1	C_2	u_d (cm)
1939	3,422	6,844	4,864	1,150	1,101	1,029	18,851
1947	7,696	15,391	2,163	1,150	1,030	1,003	17,192
1955	7,100	14,201	2,344	1,150	1,035	1,004	17,286
1967	5,772	17,315	2,884	1,150	1,049	1,007	17,580
1982	3,578	14,314	2,990	1,150	1,092	1,014	11,845
1998	5,772	25,972	1,854	1,150	1,040	1,003	11,150

c) *Demanda de desplazamientos y daños*

Cada edificio descrito en la Tabla 4.2 fue sometido al movimiento sísmico con período de retorno de 475 años que se especifica en la norma actual en cada una de las tres ciudades consideradas (COVENIN 2001); se utilizaron por tanto aceleraciones del terreno de 0,20g, 0,30g y 0,40g para Maracaibo, Caracas y Cumaná, respectivamente. La amenaza se describe por el espectro de aceleraciones que se muestra en la Figura 4.2, para cada ciudad y suponiendo terreno firme. La demanda de desplazamiento que imponen estos sismos sobre la estructura se calculó con la Ec. 4.12. Se utilizó un valor de $b=60$ en el cálculo de C_1 en la Ec. 4.13a. En la Tabla 4.3 se muestran los valores obtenidos para la demanda de desplazamiento (u_d) en Maracaibo, con sus correspondientes valores de R , C_0 , C_1 y C_2 usados en el cálculo. Los valores para Caracas y Cumaná se muestran en las Tablas 4.4 y 4.5.

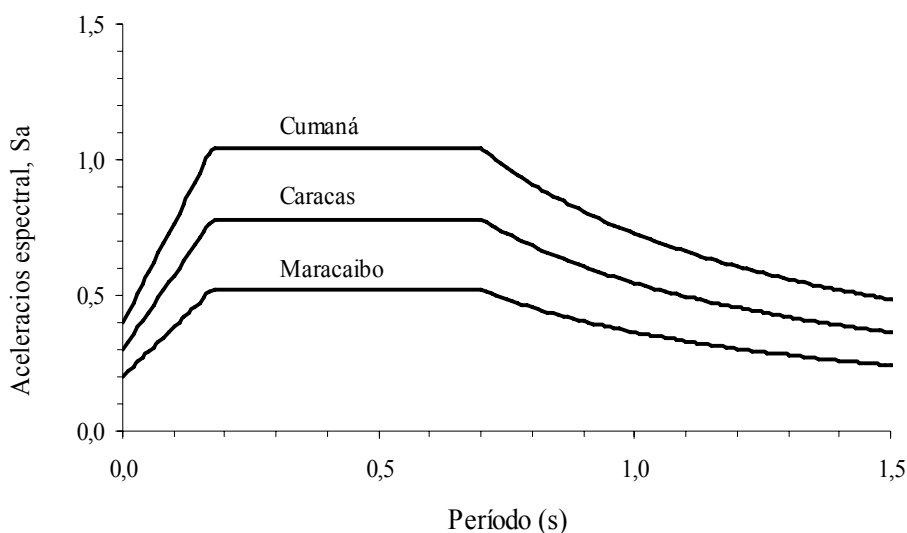


Figura 4.2. Espectro elástico de aceleraciones para suelo denso y amortiguamiento de 5%. Movimientos sísmicos con período de retorno de 475 años, para tres ciudades del país.

La Figura 4.3 muestra los estados de daño que se obtienen, de acuerdo a las definiciones dadas por la Ec. 4.15 (Figura 4.1). Para el movimiento sísmico aplicado se obtienen daños que exceden el umbral de colapso para los diseños efectuados con las normas de 1.939, 1.947 y 1.955 en las tres ciudades. Daños producidos por otros sismos con diferentes períodos de retorno se pueden determinar siguiendo un procedimiento similar.

Siguiendo el procedimiento descrito en la Sección 4.1.e, se determinó la aceleración del terreno necesaria para alcanzar cada uno de los estados de daño definidos en la Figura 4.1, para el edificio escolar de dos pisos (Tabla 4.2) localizado en Caracas y diseñado en dos épocas distintas: el primero con la norma de 1.939 y el segundo con la de 1.998. Los resultados que se muestran en la Figura 4.4 destacan la marcada diferencia entre el edificio diseñado con la norma antigua y el diseñado con la norma actual.

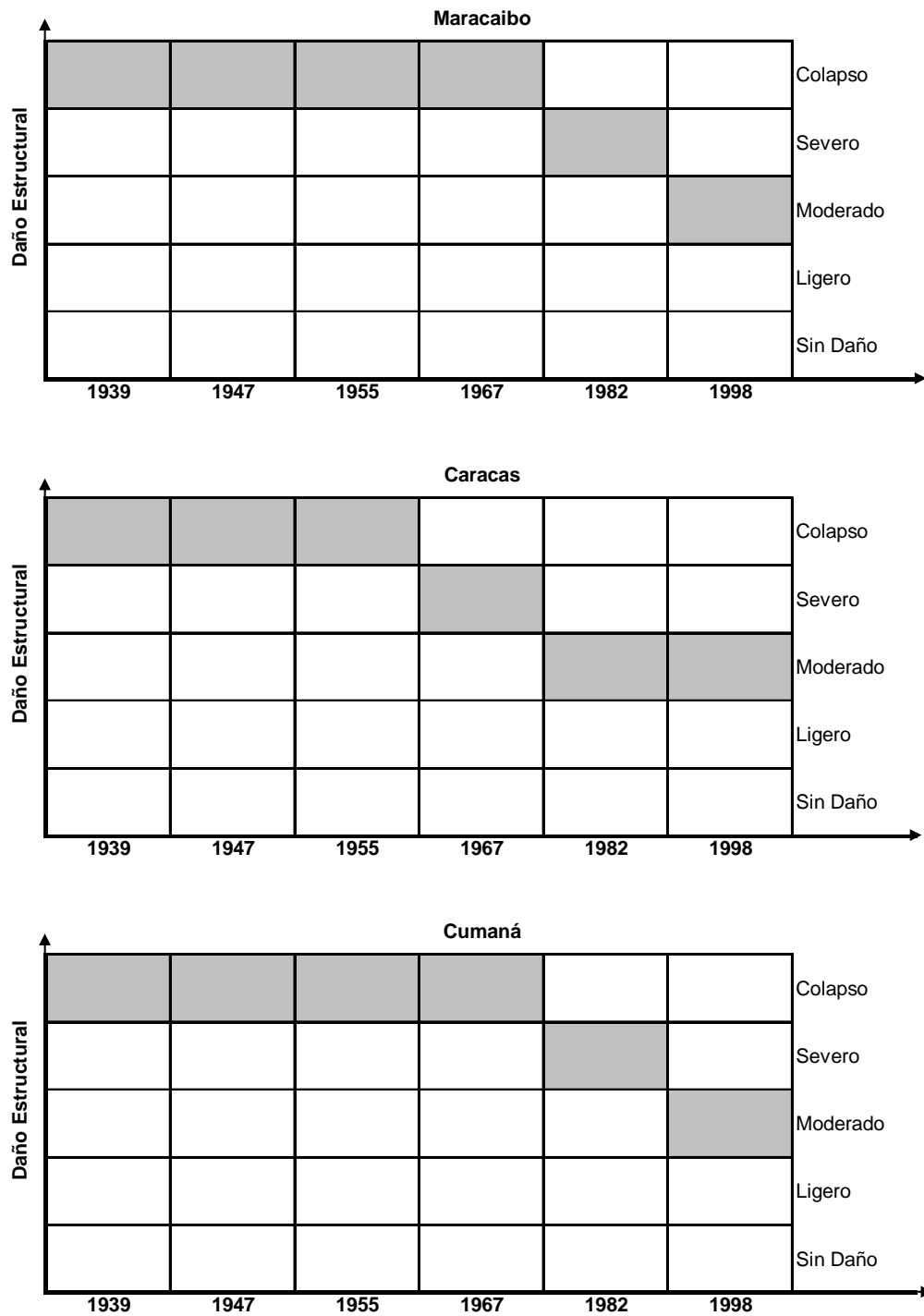


Figura 4.3. Daño Estructural para el edificio escolar de dos pisos diseñado según las diferentes normas y localizado en Caracas, Maracaibo y Cumaná, para un movimiento sísmico con período de retorno de 475 años.

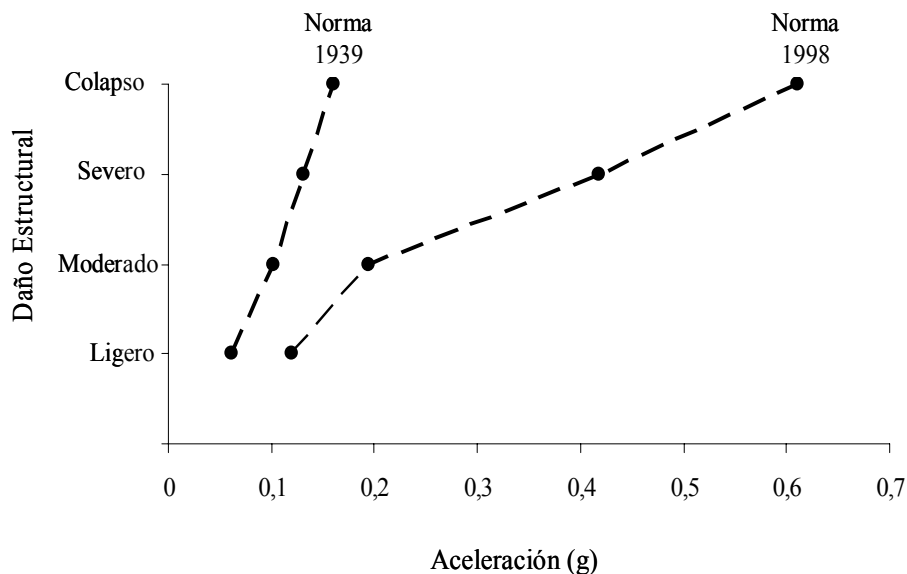


Figura 4.4. Aceleración del terreno necesaria para iniciar cada estado de daño. Edificio escolar de dos pisos localizado en Caracas y diseñado según la Norma de 1.939 y la Norma de 1.998.

5. CONCLUSIONES

- 1- La revisión de los efectos de 26 terremotos ocurridos en el planeta desde 1933 puso en evidencia la elevada vulnerabilidad de las edificaciones escolares que han provocado la pérdida de miles de vidas. Se examinaron los casos de 16 sismos ocurridos en Venezuela en el siglo XX que ocasionaron algún tipo de daño en escuelas. Varios edificios estructuralmente idénticos y pertenecientes a las escuelas tipo denominadas Antiguo I que fueron construidos en la década de 1950 en diversos lugares del país, fueron dañados por los sismos de Carúpano (1.974), del Táchira (1.981), del Pilar (1.986) y de Curarigua (1.991). Dos de estos edificios y otros dos pertenecientes al tipo denominado Cajetón que fueron construidos en la década de 1.970-1.980, se derrumbaron durante el sismo de Cariaco de 1.997 causando pérdidas de vidas. El mal comportamiento ante estos sismos puede ser atribuido a deficiencias sismorresistentes propias de aquellas edificaciones construidas con las normas de 1947, 1955 y 1967, a saber, poca rigidez y resistencia lateral, poca capacidad de disipación de energía y la presencia de columnas cortas que precipitan fallas frágiles.
- 2- La mayor parte de los 28.119 planteles escolares del país fueron construidos con las normas antiguas de 1.939, 1.947, 1.955 y 1.967, con criterios de diseño sismorresistente considerablemente menos exigentes que los encontrados en las normas posteriores de 1.982 y 1.998; un 69,4% de ellos están además localizados en zonas de amenaza sísmica elevada. Adicionalmente se conoce que varios centenares de estos edificios escolares son similares o idénticos a los que se derrumbaron en Cariaco.
- 3- Se propuso una metodología para la determinación de indicadores de riesgo y daño en una población de edificaciones escolares existentes sujeta a la acción de movimientos sísmicos. El indicador de riesgo y de daño se cuantifica en términos del cociente demanda/capacidad de desplazamiento, utilizando como información básica la edad y la localización del edificio. El procedimiento presupone que el edificio fue diseñado y construido cumpliendo con la normativa

vigente en el momento de su construcción. Al no requerir de planos ni de la inspección del edificio, esta fase puede ser aplicada a la población completa de edificios lo que permitiría posteriormente ordenarlos y seleccionar los de mayor riesgo que pasarían a la siguiente fase de evaluación que sí involucraría una inspección visual.

- 4- En la metodología propuesta se requiere únicamente conocer tres parámetros de la estructura a efectos de estimar el índice de riesgo y el estado de daño producido; estos parámetros son el período efectivo (T_e), la fuerza cortante resistente expresada en forma adimensional como una fracción del peso del edificio (V_y/W), la cual incluye la sobrerresistencia, y el factor de capacidad dúctil (μ). Se presentaron expresiones que permiten estimar la fuerza cortante resistente para un edificio escolar diseñado según las normas de 1939, 1947, 1955, 1967, 1982 y 1998. Se propuso un procedimiento para estimar la aceleración del terreno necesaria para alcanzar cada estado de daño. Un ejemplo de aplicación de la metodología propuesta en un edificio escolar típico pone de manifiesto el riesgo elevado de aquellas escuelas construidas siguiendo las normas sismorresistentes más antiguas; este resultado es congruente con el comportamiento observado en algunas escuelas durante los sismos descritos previamente.

6. AGRADECIMIENTOS

El autor desea expresar su agradecimiento al Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela y al FONACIT (Proyecto 20005000188) del Ministerio del Poder Popular para la ciencia y la Tecnología.

7. REFERENCIAS

1. Abou F. y Lee C., 2005. Evaluación del Riesgo Sísmico en Edificaciones del Tipo Antiguo II. TEG de Ing. Civil, F. de Ing., Universidad Central de Venezuela, Tutor: Prof. O. A. López.
2. Alonso J. L. y L. Urbina, 1.974. Sismo de Carúpano del 26-06-1.974. Informe para el Consejo Directivo. FUNVISIS, Caracas, 08/07/1974.
3. APEGBC/UBC, 2.006. Bridging Guidelines for the Performance-Based Seismic Retrofit of British Columbia Low-Rise School Buildings. British Columbia Ministry of Education, Canada, October 2.006.
4. Bendimerad F., 2.004. Earthquake Vulnerability of School Buildings in Algeria. Ad Hoc Expert's Group Meeting on Earthquake Safety in School, OECD, Paris.
5. Bonilla R., O. A. López, E. Castilla, R. Torres, A. Marinilli, W. Annicchiarico, F. Garcés, Z. Maldonado, 2.000. El Terremoto de Cariaco del 9 de julio de 1997. BT IMME V. 38, 2, p 1-50.
6. Castilla E. and Marinilli A. Structural Behavior of Raimundo Martínez Centeno Highschool on 07/09/1.997 Cariaco Earthquake. XII WCEE, New Zealand, 2.000.
7. COVENIN, 1.982. Norma Venezolana; Edificaciones Antisísmicas. Comisión Venezolana de Normas Industriales COVENIN 1756-87. Caracas, julio 1.988.
8. COVENIN, 1.987. Estructuras de Concreto Armado para Edificaciones; Análisis y Diseño. Norma Venezolana COVENIN MINDUR 1753-87, Caracas, Venezuela.

9. COVENIN, 2.001. Edificaciones Sismorresistentes. Norma COVENIN 1756:2.001, Venezuela.
10. COGSS, 2.006. School Disaster Risk Reduction; Think Globally, Act Locally. Coalition for Global School Safety. En disco Compacto, April 2.006.
11. Dolce M., 2.004. Seismic Safety of Italian Schools. Ad Hoc Expert's Group Meeting on Earthquake Safety in Schools, OECD, Paris.
12. EERI, 2.006. The Kashmir Earthquake of October 8, 2005: Impacts in Pakistan. EERI Special Earthquake Report, EERI Newsletter, February 2006 Vol. 40, Number 2.
13. EERI, 2.008. May 12, 2.008, M7.9 Sichuan, China, Earthquake. EERI Newsletter, June 2008, Vol. 42, Number 8.
14. Ebres D. y M. Olivo, 2.008. Evaluación del Riesgo Sísmico en Escuelas del Tipo Antiguo I. Trabajo Especial de Grado para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad Central de Venezuela. Tutor N. Fernández. Caracas, mayo 2.008.
15. Espinosa L. F., 2.005. Respuesta Dinámica del Liceo Raimundo Martínez Centeno durante el Terremoto de Cariaco. TEG de Ing. Civil. F. de Ing., Univ. Central de Vzla. Tutor: O. A. López.
16. FEDE, 1.998. Síntesis Informativa- Segunda Época No 19, Enero-Marzo de 1998, Ministerio de Educación, Caracas, Venezuela.
17. FEMA, 2.000. Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA 356, Washington D.C.
18. FEMA, 2002a. Incremental Seismic Rehabilitations of School Buildings (K-12). FEMA 395-December 2.002, Washington D.C.
19. FEMA, 2.002b. Rapid Visual Screening of Buildings for Potential Seismic Hazards: A Handbook. Second Edition, FEMA 154/March 2002, Washington D.C.
20. FEMA, 2.003. NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures. FEMA 450-1/2003 Edition, Washington D.C.
21. FEMA, 2.005. Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. FEMA 440, ATC-55 Project, Washington D.C.
22. Fernández N., 1.998. Estudio de la Sensibilidad de las Causas que Provocaron el Colapso de la Escuela Valentín Valiente en el Sismo de Cariaco del 9 de Julio de 1.997. Trabajo Especial de Grado de Ing. Civil, F. de Ing., Universidad Central de Venezuela, Tutor: Prof. E. Castilla.
23. FUNVISIS, 1.981. El Sismo del Táchira del 18 de Octubre de 1981. Serie Técnica 01-82, FUNVISIS, Caracas, Enero 1.982.
24. FUNVISIS, 1.991. Sismo de Curarigua del 17/08/91, Informe de campo. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Caracas, Venezuela.

25. Goncalvez Z. y Ynfante M., 2008. Evaluación del Riesgo Sísmico en Edificaciones Escolares Tipo Antiguo I, ubicadas en el Municipio Bermúdez de la Población de Carúpano, Estado Sucre. TEG de Ing. Civil. F. de Ing., Universidad Central de Venezuela., Tutor: Prof. N. Fernández.
26. Grases J., R. Altez y M. Lugo., 1999. Catálogo de Sismos Sentidos o Destruyores, Venezuela 1530/1998. Academia de Ciencias Físicas, Matemáticas y Naturales, Caracas, 1.999.
27. Grant D. N, J. J. Boomer, R. Pinho, G. M. Calvi, A. Goretti, F. Meroni, 2.007. A Priorization Scheme for Seismic Intervention of School Buildings in Italy. Earthquake Spectra, Vol. 23 No 2, p 291-314, may 2.007.
28. Guzmán G. y Rojas L., 2008. Estudio de la Vulnerabilidad Sísmica de la Unidad Educativa Cirilo Alberto, Tipo “Stac Antiguo”, ubicada en el Municipio Valencia del Estado Carabobo. TEG de Ing. Civil. F. de Ing., Universidad de Carabobo. Tutor: Prof. C. Alvarado y O. A. López.
29. IMME, 1.998. 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.
30. IMME-FUNVISIS-FEDE, 2.007. Reducción del Riesgo Sísmico en Edificaciones Escolares de Venezuela. Informe Técnico del Primer Informe de Avance. Proyecto FONACIT 2005000188, Caracas, 25/06/2007.
31. Jain S. K., 2.004. Implementing School Seismic Safety Programmes in Developing Countries. Ad Hoc Expert’s Group Meeting on Earthquake Safety in Schools, OECD, Paris.
32. Lárez M. y Gascón J., 2008. Evaluación Sismorresistente de la Edificación “Escuela Básica Corazón de Jesús” ubicada en Cumaná Estado Sucre. TEG de Ing. Civil. F. de Ing., Universidad Central de Venezuela. Tutor: Prof. A. Marinilli.
33. López O. A., M. Cruz, 1.996. Number of Modes for the Seismic Design of Buildings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. Vol. 25, No 8, p837-855.
34. López O. A. y Espinosa L. F., 2.007. Colapso del Liceo RMC durante el Terremoto de Cariaco. Boletín Técnico IMME, Volumen 45, No. 2, p35-57.
35. López O. A., J. J. Hernández, G. Del Re, J. Puig, L. F. Espinosa, 2.007. Reducing Seismic Risk of School Buildings in Venezuela. Earthquake Spectra, Vol. 23, No 4, p771-790, November 2.007.
36. López O. A. Protección de las Escuelas contra los Terremotos. Trabajo de Incorporación Académica, Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat. Caracas, julio, 2008.
37. Malaver A., C. Chacón, J. Jácome, O. Romero y C. Grimán, 1.988. El Sismo de El Pilar del 11 de Junio de 1986. Serie Técnica 06-88, FUNVISIS, Caracas 1988.
38. Meneses J., 2.006. Vulnerabilidad y Adecuación Sismorresistente de Escuelas: La experiencia de California y Otros Lugares del Mundo. VIII Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Valencia, Venezuela, Mayo 2.006.

39. Meneses J. y Z. Aguilar. Seismic Vulnerability of School Buildings in Lima, Perú, 2.004. 13th WCEE, Vancouver, B. C., Canada. August 1-6, 2.004, Paper No 1683.
40. Milutinovic Z. and Massué J.P., 2.004. School ID-Card-A key Prerequisite for Effective Mitigation and Emergency Response. Ad Hoc Expert's Group Meeting on Earthquake Safety in Schools, OECD, Paris.
41. MOP, 1.939. Norma para el Cálculo de Edificios. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Edificios. Caracas.
42. MOP, 1.947. Norma para el Cálculo de Edificios. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Edificios e Instalaciones Industriales. Caracas.
43. MOP, 1.955. Norma para el Cálculo de Edificios. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Edificios e Instalaciones Industriales. Caracas.
44. MOP, 1.967. Norma Provisional para Construcciones Antisísmicas. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Edificios. Caracas, Noviembre 1967.
45. Nakano Y. Seismic Rehabilitation of School Buildings in Japan, 2.004. Journal of Japan Association for Earthquake Engineering, Vol. 4, No 3 (Special Issue), 2.004.
46. OECD, 2.004. Keeping Schools Safe in Earthquakes. Organization for Economic Co-operation and Development, OECD, Paris, France.
47. OECD, 2.005. Draft Recommendation of the Council concerning Guidelines on Earthquake Safety in Schools. Organization for Economic Co-operation and Development, c(2005)24, Paris, France.
48. Romero O., 1.980. Informe del Sismo ocurrido el 26 de Noviembre de 1980-Edo Táchira. FUNVISIS, Caracas, 1.981.
49. SSC, 2.004a. Seismic Safety in California's Schools. Findings and Recommendations on Seismic Safety Policies and Requirements for Public, Private and Charter Schools. California Seismic Safety Commission, SSC 04-04, Sacramento, California.
50. SSC, 2.004b. Guide and Checklist for Nonstructural Earthquake Hazards in California Schools. California Seismic Safety Commission. Sacramento, California.
51. Spence R., 2.004. Strengthening Existing Buildings to Resist Earthquakes: Progress in European Countries with Reference to School Buildings. Ad Hoc Expert's Group Meeting on Earthquake Safety in Schools, OECD, Paris.
52. Steinbrugge K. V., 1.970. Earthquake Damage and Structural Performance in the United States. Chapter 9 in Earthquake Engineering, R.L. Wiegel, coordinating editor, Prentice-Hall, Inc.
53. Taboada A. y Sosa Marcos, 2.007. 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.

54. Taylor G. W., White T. W. and Ventura C. E., 2006. British Columbia School Seismic Mitigation Program; Performed-Based School Retrofitting Guidelines. 8th National Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 738, San Francisco, California.
55. Tucker B., 2006. Toward Global Earthquake Safety. Geohazard International. <http://www.geohaz.org/>.
56. UN, 2006. United Nations Secretariat for the International Strategy for Disaster Reduction. <http://www.unisdr.org>.
57. UNCRD, 2006. Disaster Management Planning Hyogo Office. United Nations Centre for Regional Development. <http://www.hyogo.uncrd.or.jp>.
58. Yüzügüllü Ö., Barbarosoglu G. and Erdik M., 2004. Seismic Risk Mitigation Practices of School Buildings in Istanbul. Ad Hoc Expert's Group Meeting on Earthquake Safety in Schools, OECD, Paris.