

## **REDUCCIÓN DEL RIESGO SÍSMICO EN ESCUELAS DE VENEZUELA**

Oscar A. López, Julio J. Hernández, Gianina Del Re, José Puig

*Instituto de Materiales y Modelos Estructurales, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Central de Venezuela*

### **RESUMEN**

El terremoto de Cariaco, Venezuela, 1.997, provocó el derrumbe de cuatro edificaciones escolares y la muerte de 23 personas. Las fallas fueron el resultado de deficiencias estructurales para resistir terremotos, de carácter conceptual, típicas de los diseños de décadas pasadas: Poca rigidez y resistencia lateral, baja capacidad para disipar energía, insuficiente resistencia al cortante y la presencia de columnas “cortas”. Por otro lado, el derrumbe de dos edificaciones fue también influenciado porque fueron construidos en una zona sísmica con intensidad dos veces mayor a la de la zona especificada en los planos de construcción. Las escuelas denominadas Tipo Antiguo y Tipo Cajetón son similares a las derrumbadas en Cariaco y se hallan distribuidas en todo el país. Mediante técnicas de análisis dinámico lineal y estático no lineal se determinó el riesgo a que están expuestas en las diferentes zonas sísmicas de Venezuela. Las escuelas Tipo Antiguo están expuestas a riesgos intolerables por lo que deben ser reforzadas, aun en las zonas de moderada amenaza como quedó demostrado en Arenales donde un evento de moderada intensidad en 1.991 comprometió la estabilidad de la escuela. Solo las escuelas Tipo Cajetón localizadas en las zonas de mayor amenaza sísmica deben ser reforzadas. Se propone un programa nacional para la reducción de riesgos en escuelas existentes y para la construcción de nuevas escuelas seguras ante terremotos.

Palabras clave: Cariaco, escuelas, riesgo sísmico, columnas cortas, reducción de riesgos.

### **REDUCTION OF SEISMIC RISK IN VENEZUELAN SCHOOLS**

#### **ABSTRACT**

The Cariaco earthquake in 1997 led to the ruin of four school buildings and the loss of 23 lives. The failures were the result of conceptual deficiencies in the structural system, typical of the seismic design of the past decades: Very low lateral strength and stiffness, low energy dissipation capacity, insufficient shear resistance and the presence of “short columns”. On the other hand, the collapse of two buildings was also influenced because they were built in a seismic zone with twice the intensity specified in the construction plans. The schools identified as “Old Type” and “Box Type”, similar to the schools that collapsed in Cariaco, can be found all along the country. Using linear dynamic and non-linear static analysis, the seismic risk at which they are exposed was determined in the different zones of Venezuela. “Old Type” schools are exposed to unacceptable risk and need to be retrofitted, even in moderate seismic zones as it has been shown in one school in Arenales where an earthquake of moderate intensity endanger the stability of the school. On the other hand, only “Box Type” schools located in the high hazard zones need to be retrofitted. A national plan for the mitigation of seismic risk in existing schools and for the construction of new earthquake resistant schools is proposed.

Key words: Cariaco, schools, seismic risk, short columns, risk reduction.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las Edificaciones Escolares han demostrado reiteradamente ser especialmente vulnerables durante terremotos. Escuelas públicas en las cuales se exige la asistencia obligatoria de niños, se derrumban frecuentemente durante terremotos de moderada a elevada severidad en el mundo entero, causando numerosas y trágicas pérdidas de vidas. Miles de niños han muerto en la última década porque el conocimiento y la tecnología existente no han sido aplicados para salvaguardar sus vidas [1].

Un evento histórico que provocó un cambio sustancial en el diseño y construcción de escuelas en California, ocurrió en Long Beach en 1.933. Un terremoto de magnitud Richter igual a 6,3, destruyó 70 escuelas y causó daños a otras 120; afortunadamente el evento ocurrió a las 5:54 p.m., después de finalizadas las clases, con lo que se salvaron centenares de vidas [2]. Los elevados riesgos asociados a las edificaciones escolares quedaron dramáticamente ilustrados en el terremoto de Armenia del 7 de Diciembre de 1.988 ( $M = 6,9$  a unos 7-8 km de profundidad); del total de 25.000 muertes, más de 6.000 (24%) fueron estudiantes y maestros de instituciones educativas [3]. Otro caso notable ocurrió durante el terremoto de Skopje (Macedonia) del 26 de Julio de 1.963 ( $M = 6,1$  a 8 km de profundidad); del total de 77 edificaciones escolares de la ciudad de Skopje, 44 (57%) fueron destruidas, provocando una interrupción masiva del proceso educacional en la ciudad y en el país. Gracias a que el evento tuvo lugar a las 5:17 a.m., todos los edificios estaban desocupados por lo que se salvaron miles de vidas [3]. 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 [3].

Terremotos recientes también han afectado significativamente a edificaciones escolares. El terremoto de Molise en Italia, ocurrido el 31 de Octubre de 2.002, causó el derrumbe de una escuela primaria y la muerte de 27 niños y un maestro [4]. El terremoto de Boumerdès (Argelia) del 21 de Mayo de 2.003 ( $M_w = 6,8$ ) causó extensos daños en escuelas: 564 de un total de 1.800 escuelas inspeccionadas, sufrieron serios daños. Veintitrés años antes, el 70% de las escuelas de la ciudad de El-Asnam resultaron con daños extensos o derrumbadas durante el terremoto del mismo nombre de 1.980 ( $M = 7,3$ ), en una proporción sustancialmente mayor que el resto de las construcciones de la ciudad. Afortunadamente, debido a que la hora de ocurrencia de estos eventos no coincidió con las horas de actividades escolares, la pérdida de vidas fue muy baja [5]. El mismo año y solo unos días antes del evento de Argelia, el primero de Mayo de 2.003, un terremoto ( $M_w = 6,4$ ) afectó el poblado de Bengöl de 70.000 habitantes, en Turquía [6]. De un grupo de 28 edificaciones escolares inspeccionadas se observó que 3 tuvieron daño ligero o no tuvieron daño, 12 tuvieron daño moderado, 10 daño severo y 3 se derrumbaron totalmente causando la muerte de numerosos niños mientras dormían. Todas las edificaciones eran de concreto armado, 17 constituidas por pórticos y una por un sistema mixto de muros y pórticos. Todas poseían paredes de mampostería de relleno colocadas entre columnas. 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 [6].

El terremoto de Cariaco ( $M_s = 6,8$ ), Venezuela, del 9 de Julio de 1.997 derrumbó cuatro edificios escolares provocando la muerte de 23 personas entre estudiantes y maestros. Las edificaciones derrumbadas responden a dos tipologías bien definidas de edificios escolares que se encuentran distribuidas por todo el país en un número que probablemente sobrepase las mil unidades, estando la mayoría de ellas localizadas en zonas de alta amenaza sísmica. Partiendo de la premisa que la seguridad de los niños en las escuelas debe ser entendida como un derecho humano fundamental y en vista del desafortunado comportamiento de estas escuelas observado en Cariaco, se hace imperiosa la necesidad de evaluar los niveles de riesgo a que están expuestas y tomar medidas para su mitigación.

El trabajo que aquí se presenta tiene como objetivo general la evaluación del riesgo a que están expuestas estas edificaciones escolares típicas en Venezuela y recomendar acciones a seguir. Los objetivos específicos son los siguientes: i) presentar la experiencia de Cariaco e identificar las causas del derrumbe de las escuelas; ii) Cuantificar el nivel de riesgo a que están expuestas edificaciones escolares del mismo tipo, nominalmente iguales, distribuidas en todo el país, y iii) recomendar acciones a tomar a fin de reducir los riesgos a niveles comparables con los de nuevas escuelas diseñadas de acuerdo al estado del conocimiento y a las normas vigentes.

## 2. LA EXPERIENCIA DEL TERREMOTO DE CARIACO

El terremoto de Cariaco ocurrió a las 3:24 p.m. del día 9 de julio de 1.997, afectando a la región noreste de Venezuela a unos 300 km de Caracas. El movimiento vibratorio provocó el desplome de 7 edificios de concreto armado, causando 74 víctimas fatales y 522 heridos. El evento también provocó licuación y falla del suelo en varias poblaciones costeras. En la ciudad de Cariaco se desplomaron cuatro edificaciones educacionales, el edificio del Banco del Orinoco de dos niveles y un hotel de tres niveles en construcción, siendo todas ellas de concreto armado, y unas 300 viviendas unifamiliares con paredes portantes de bahareque o de bloques de arcilla o concreto, ocasionando un total de 41 muertes [7, 8, 9]. Cerca de las edificaciones escolares había otras construcciones de un nivel en las que no se apreciaron daños. Dos de las cuatro edificaciones escolares derrumbadas formaban parte de la escuela primaria Valentín Valiente y las otras dos pertenecían al liceo Raimundo Martínez Centeno.

### 2.1 Movimiento estimado en Cariaco

El terremoto de magnitud  $M_s=6,8$ ,  $M_w=6,9$ , tuvo su epicentro en las coordenadas  $10,43^\circ$  N y  $63,49^\circ$  W con una profundidad focal de 10 km. El poblado de Cariaco está localizado a unos 10 km del epicentro del terremoto, pero las edificaciones derrumbadas estaban solo a unos 600 metros de la traza de la falla (Figura 1); la traza de falla superficial observada en campo es indicativa de un movimiento transcurrente dextral, con un desplazamiento medio de unos 30 cm a lo largo de por lo menos 30 km en dirección este-oeste (Figura 1). Esta traza se corresponde con la falla de El Pilar que sirve de frontera entre las placas tectónicas del Caribe y la Suramericana.

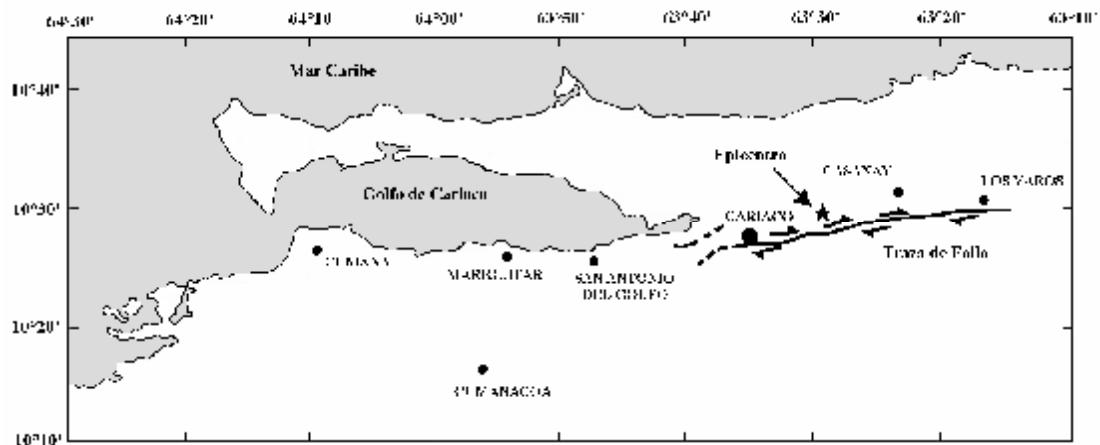


Figura 1. Epicentro y traza de falla del terremoto de Cariaco del 9 de Julio de 1997

En Cumaná, a unos 70 km del epicentro, se obtuvo el único registro acelerográfico del evento con aceleraciones máximas de 0,09g, 0,05g y 0,03g en dirección longitudinal, transversal y vertical, respectivamente, con una duración total de unos 20 segundos [7]. Dado que las escuelas se encontraban a algunos centenares de metros de la traza de la falla, se estima que allí ocurrió un movimiento vibratorio significativamente mayor al registrado en Cumaná. El suelo en las dos edificaciones escolares se caracteriza por materiales predominantemente finos de características semejantes en toda la columna de suelos, muy sueltos en los primeros 10 m, medianamente densos entre 10 m y 20 m y densos o muy densos por debajo de 20 m [10].

Mediante leyes de atenuación desarrolladas internacionalmente que consideran movimientos registrados muy cerca de la falla geológica [11-14], se determinó el rango más probable de valores de la aceleración máxima " $a$ ", que puede haber ocurrido en el sitio. Considerando los datos del terremoto ( $M_w = 6,9$ , falla transcurrente) y del sitio (suelo, a menos de un kilómetro de la traza de la falla), mediante las correspondientes leyes validadas para fallas transcurrentes y suelo, se determinaron los valores de las medianas de  $a$ , asociadas a un 50% de probabilidad de excedencia, que se indican en la Tabla 1. Conocida la desviación estándar del logaritmo neperiano de  $a$ , se determinaron los valores de  $a$  en torno a la mediana que limitan un rango de aceleraciones con un 50% de probabilidad de ocurrencia. Se puede apreciar en la Tabla 1 una muy buena concordancia de las cuatro leyes de atenuación en la estimación de la mediana de  $a$ , con valores que varían entre 0,49g y 0,54g. También se muestra en la Tabla 1 la desviación estándar del neperiano de  $a$  para cada caso. Conociendo que el neperiano de  $a$  sigue una distribución normal se determinaron los valores de  $a$  asociados al percentil 25 y al percentil 75 que se muestran en la misma Tabla 1. Los resultados de la Tabla 1 muestran de nuevo poca variación entre las predicciones obtenidas con las diferentes leyes de atenuación. Promediando los valores para todas ellas se aprecia una aceleración máxima cuya mediana (percentil 50) es 0,52g, y un rango comprendido entre 0,39g y 0,71g que establece una probabilidad de 50% de estar entre estos límites. Conviene destacar que estas probabilidades no corresponden a las probabilidades de no-excedencia para diseño establecidas en las normas (90% en 50 años, para todos los sismos que puedan ocurrir en ese lapso), sino a la certidumbre probabilística del valor de la aceleración para este sismo específico. El valor de 0,52 g aproxima el valor más probable de aceleración máxima ocurrida en Cariaco.

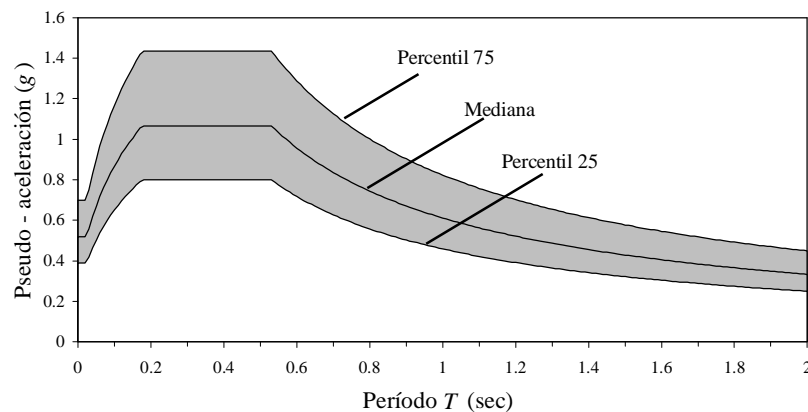
Con los valores de aceleración máxima así calculados se determinó el espectro de pseudo-aceleración asociado a ese movimiento. Para ello se utilizaron los espectros suavizados construidos a partir de los espectros medios de una colección de 38 movimientos registrados en suelo en el campo cercano [15], a distancias menores de 15 km de la falla y para un 5% de amortiguamiento.

**Tabla 1. Valores estimados para la aceleración máxima,  $a$ , en Cariaco, para el terremoto del 9 de julio de 1.997**

Ley de atenuación	Desviación estándar de $\ln a$	Aceleración máxima $a$ (g)		
		Menor (percentil 25)	Mediana (percentil 50)	Mayor (percentil 75)
Campbell [11]	0,39	0,38	0,49	0,64
Sadigh et. al. [12]	0,42	0,41	0,54	0,72
Boore et. al. [13]	0,52	0,38	0,53	0,76
Abrahamson & Silva [14]	0,44	0,39	0,53	0,71
<b>Promedios =</b>		<b>0,39</b>	<b>0,52</b>	<b>0,71</b>

La Figura 2 muestra el espectro suavizado definido por su mediana (percentil 50) y por una curva inferior (percentil 25) y una superior (percentil 75), que tienen probabilidades de no-excedencia de 50%, 25% y 75%, respectivamente. Las curvas superior e inferior limitan un rango de valores con una

probabilidad de ocurrencia de 50%. Los valores espectrales más probables ocurridos en Cariaco podemos describirlos por la mediana de la Figura 2. Es interesante comparar estos valores con los valores estipulados para el diseño de escuelas en la norma venezolana vigente [16]; de acuerdo a ésta, las nuevas escuelas en Cariaco deben ser diseñadas a partir de un espectro elástico que se encuentra ligeramente por encima de la mediana mostrada en la Figura 2. Concluimos entonces que la norma vigente exige un diseño de escuelas con movimientos sísmicos de severidad similar a la ocurrida en Cariaco el 09/07/1997.



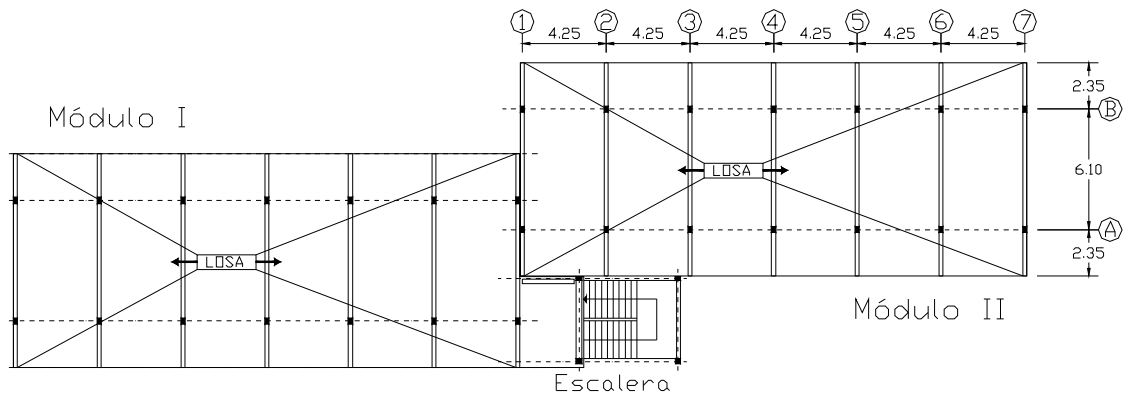
**Figura 2. Espectros de pseudo-aceleración estimados para el movimiento sísmico ocurrido en Cariaco el 09-07-1997**

## 2.2 Comportamiento de la Escuela Valentín Valiente

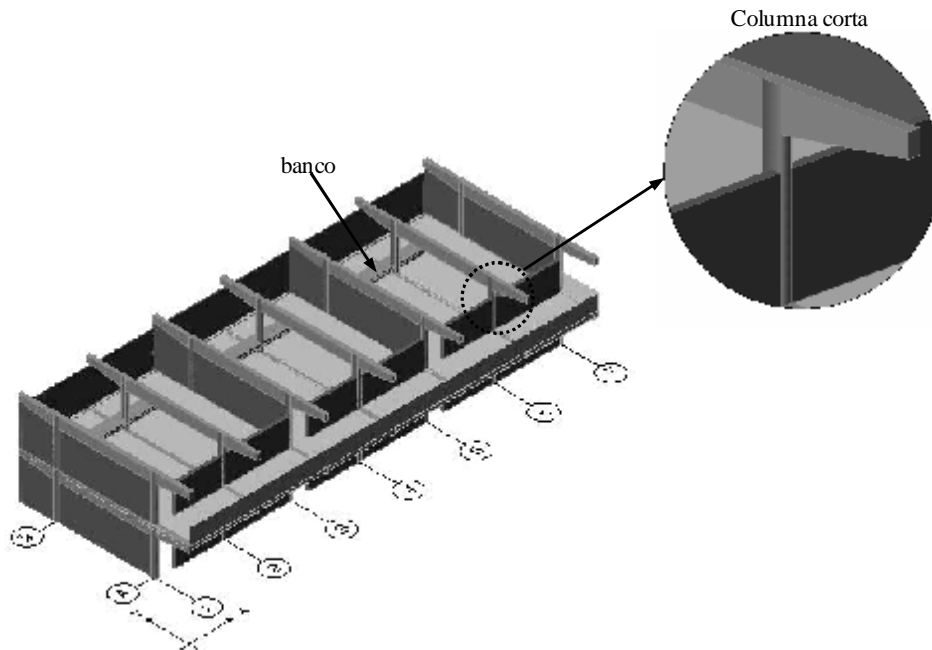
### a) Descripción de la Escuela

La Escuela Valentín Valiente, posiblemente construida en 1.958, estaba formada por dos módulos independientes separados por una junta de construcción. La única diferencia entre ambos módulos es que uno de ellos está unido al módulo de escalera (Figura 3). Cada módulo es de dos niveles y planta de forma rectangular, con estructura de concreto armado y paredes de mampostería constituidas por bloques de concreto de 15 cm de espesor, en gran parte enmarcadas por la estructura [10,17]. El sistema de entrepiso consistía en una losa nervada en la dirección longitudinal del edificio de 20 cm de espesor. Las columnas eran todas de sección 20 cm x 30 cm, exceptuando las de la escalera, con su mayor dimensión orientada en la dirección más corta del edificio. Las vigas de carga eran de sección 20 cm x 65 cm también orientadas en la dirección transversal. No existían vigas en la dirección longitudinal del edificio. De las pruebas de materiales efectuadas después del terremoto se obtuvo una resistencia promedio del concreto a compresión de 140 kgf/cm<sup>2</sup>; las barras de acero longitudinal y transversal clasifican con un límite elástico de 2.400 kgf /cm<sup>2</sup> y 2.800 kgf /cm<sup>2</sup>, respectivamente. De la observación de los elementos estructurales en sitio se constató la ausencia de refuerzo transversal en las juntas. El refuerzo transversal en vigas y columnas era de barras lisas de Ø 1/4" espaciado a 25 cm y a 15 cm, respectivamente, con ganchos a 90° [7,8]. Las paredes de mampostería eran de tres alturas distintas (Figura 4): Unas de altura igual a 2,25 m que llenaban completamente los pórticos transversales en los ejes 1, 3, 5 y 7, otras de altura igual a 1,70 m que generaban columnas "cortas" de 55 cm de altura libre en el pórtico longitudinal A, y otras de altura igual a 2,60 m, fuera de los pórticos, en la fachada longitudinal cercana y paralela al eje B. El pórtico longitudinal B tenía un banco de concreto armado

constituido por una loseta de 70 cm x 10 cm, y una viga de 21 cm de ancho y 28 cm de alto, que conectaba rígidamente las columnas a una altura de 50 cm del piso (Figura 4). Durante las visitas al sitio no se evidenciaron defectos serios de construcción ni fallas del terreno de fundación [10].



**Figura 3. Planta de la Escuela Valentín Valiente. Dimensiones en metros**



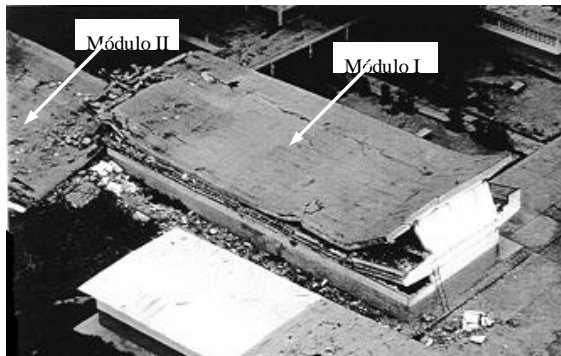
**Figura 4. Imagen tri-dimensional del Módulo II de la Escuela Valentín Valiente mostrando pórticos, paredes completas, banco y paredes parciales generando columnas cortas**

Integralmente considerado, el edificio es bastante más débil en dirección longitudinal por la ausencia de vigas y por la dimensión de solo 20 cm de las columnas. Además, el edificio poseía muy poca capacidad de disipación de energía, especialmente debido al limitado refuerzo transversal. Las columnas “cortas” disminuyeron todavía más la ya escasa ductilidad de la estructura. En la dirección

transversal destaca la considerablemente mayor rigidez y resistencia de las vigas en relación con las columnas.

b) Comportamiento durante el terremoto

Cuatro estudiantes y una maestra fallecieron en esta escuela. Ambos módulos mostraron un gran desplazamiento remanente en dirección longitudinal (Figura 5). El módulo II (sin escaleras) (Figura 3) se desplomó totalmente, quedando las losas apoyadas sobre el terreno (Figura 5a). El módulo I (con escalera) se desplomó parcialmente, quedando las losas del primer y segundo nivel apoyadas sobre las paredes, en la mayor parte de su longitud (Figura 5b). Se observaron fallas a flexión en las columnas largas y fallas a cortante en las columnas cortas, tanto en aquellas restringidas por las paredes (Figura 6a) como en las restringidas por el banco (Figura 6b). También se apreció la falla a tracción del acero longitudinal en algunas columnas y del acero transversal en algunas vigas. No se apreciaron fallas en las fundaciones [7 a 10, 17, 21].



a) Vista de arriba (Cortesía de J.L. Alonso)

b) Vista longitudinal (Módulo I)

**Figura 5. Derrumbe de los dos edificios de la Escuela Valentín Valiente**



a) Columna restringida por paredes

b) Columna restringida por banco

(Cortesía de N. Fernández)

(Cortesía de N. Fernández)

**Figura 6. Fallas en columnas cortas de la Escuela Valentín Valiente**

c) Análisis del comportamiento

La capacidad del edificio se determinó mediante un análisis estático no-lineal aplicando cargas laterales de distribución triangular, semejante a la forma del modo fundamental, que crecen monótonicamente hasta producir la inestabilidad de la estructura. Se analizó el módulo II (Figura 3), al cual se le aplicó el patrón de carga lateral en dirección longitudinal por ser ésta la dirección del colapso. La idealización estructural incluyó las paredes enmarcadas por el pórtico A (Figura 4), modeladas con bielas equivalentes. Al no existir vigas altas en dirección longitudinal, se consideró una viga equivalente de sección T en ambos pórticos longitudinales, definida por la contribución de los nervios de la losa. La Figura 7 muestra la relación entre la fuerza cortante en la base y el desplazamiento del techo. Los resultados señalan una primera falla por cortante en las columnas cortas A2, A4 y A6 del primer piso, para una fuerza cortante basal de 24 t y un desplazamiento de aproximadamente 0,8 cm, seguida de la falla por cortante de las mismas tres columnas en el segundo piso, para una fuerza cortante basal de 32 t. Después de estas fallas frágiles se desarrollan fallas por flexión en los nervios de la losa y en las columnas restantes que estaban libres para deformarse, hasta alcanzar un desplazamiento total en el tope de aproximadamente 6,6 cm, asociado a una fuerza cortante basal de aproximadamente 32 t, para el cual se produce la inestabilidad global de la estructura. Para efectos de estimar el índice de riesgo adoptaremos el valor de 32 t como la capacidad de la estructura, dado que para esa carga ya fallaron frágilmente tres columnas en cada entrespiso.

La fuerza cortante máxima probable, que hubiese actuado sobre el edificio si éste hubiese respondido elásticamente, se estimó mediante análisis dinámicos elásticos de la estructura sometida al movimiento sísmico estimado para el sitio, definido por los espectros de aceleraciones determinados previamente (Figura 2). Se determinó un peso total de la estructura de 315 t para la condición de carga variable presente en el momento del sismo. El período del modo fundamental en dirección longitudinal se estimó en 0,65 segundos. Los resultados del análisis indican una fuerza cortante en la base comprendida entre 190 y 342 toneladas. Los desplazamientos máximos corresponden a derivas entre 15 y 27 % para cada entrespiso, respectivamente, valores muy elevados que exceden los límites normativos, definiendo un rango con una probabilidad de ocurrencia aproximadamente igual al 50%. La fuerza cortante elástica en la base excede de 6 a 11 veces la capacidad resistente de la estructura, generando una demanda de ductilidad del mismo orden, la cual no se puede desarrollar manteniendo la estabilidad porque esta estructura posee muy baja capacidad para disipar energía, que se corresponde con una ductilidad no mayor que 2.

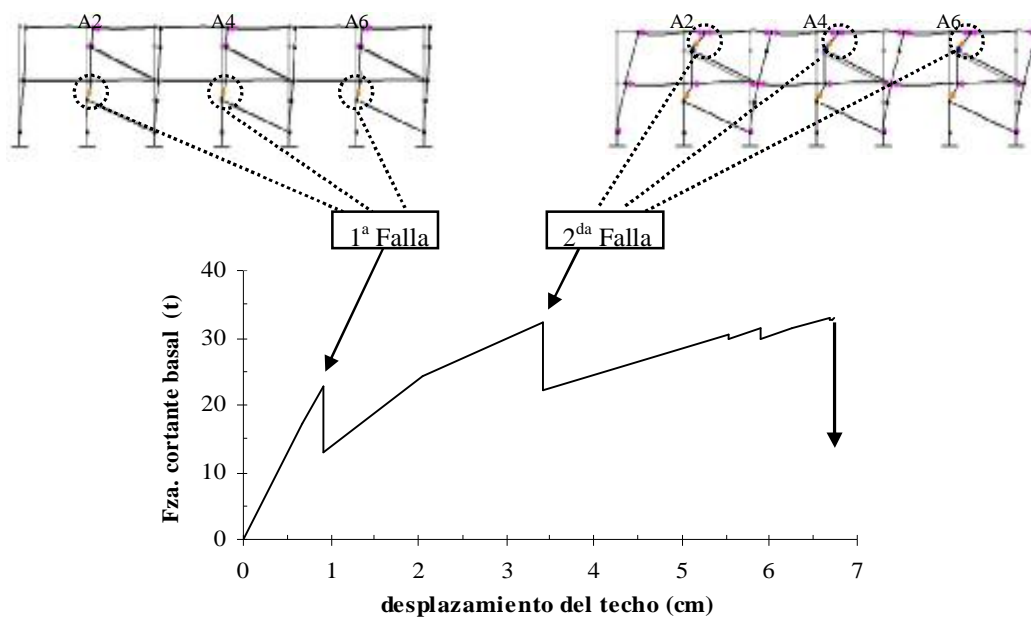
d) Causas del desplome de la Escuela

De la información presentada y de los análisis efectuados se puede concluir que el desplome de la Escuela Valentín Valiente fue el resultado de: i) La muy baja resistencia y rigidez de la estructura en dirección longitudinal, debido a la pequeña dimensión de las columnas y la ausencia de vigas; ii) La presencia de paredes adosadas a las columnas que crearon columnas "cortas" y precipitaron fallas frágiles por cortante, y iii) La limitada capacidad de disipación de energía de la estructura. Solo el primer punto mencionado, la baja resistencia de la estructura, era suficiente para provocar el derrumbe de la escuela considerando la carencia de elementos resistentes a carga lateral en la dirección longitudinal del edificio. La presencia de las columnas cortas precipitó un modo frágil de falla en una estructura que igualmente hubiese fallado aún desarrollando toda su poca ductilidad.

Conviene destacar que la falla de los dos edificios no fue el resultado de defectos evidentes de construcción, ni tampoco del incumplimiento manifiesto con las normas de diseño de la época. En



efecto, la información recabada nos permite suponer que la obra fue proyectada siguiendo la Norma MOP de 1.955 [18] o la Norma MOP de 1.947 [19]; en ambas normas, se permitía el uso de concretos con esfuerzos de rotura tan bajos como  $100 \text{ kgf/cm}^2$ , por lo que el valor de  $140 \text{ kgf/cm}^2$  medido en ese edificio no representaba una resistencia inusual para la época. Y en la Norma de 1.955 se permitían además columnas con una dimensión de 20 cm, aún cuando la Norma previa de 1.947 estipulaba una dimensión mínima de 25 cm. Tanto la Norma de 1.955 como la de 1.947 exigían un análisis y diseño sísmico de los edificios; para esta edificación localizada en el Estado Sucre, se exigía un diseño con un cortante basal de servicio de  $0,10 W$  en la norma de 1.947 y de  $0,092 W$  en la de 1.955, siendo  $W$  el peso total, lo que equivale a un cortante basal límite de diseño de aproximadamente  $0,14 W$  una vez hecha la reconciliación con los criterios utilizados en dichas normas. Para un peso de 307 t, esta carga es de 43 t que es algo mayor a la capacidad de la estructura determinada mediante el análisis no-lineal que es de 32 t (Figura 7). El cortante basal de diseño límite de 43 t corresponde al hipotético proyecto de esa estructura en la ciudad de Cariaco, que estaba ubicada dentro de la zona C, la de mayor amenaza sísmica del país en ambas normas. Si la estructura hubiese sido diseñada para la zona sísmica B, que incluía los estados centrales y andinos en la Norma de 1947 y buena parte de ellos en la Norma 1.955, las fuerzas de diseño se reducirían a la mitad por lo que el cortante basal límite de diseño hubiera sido de 21 t, algo menor a la capacidad real de la estructura (Figura 7).



**Figura 7. Secuencia de falla de la estructura de la Escuela Valentín Valiente: 1ª falla: columnas cortas del 1º entepiso; 2ª falla: columnas cortas del 2º entepiso**

Concluimos destacando que la falla de las dos edificaciones de la escuela fue el resultado de deficiencias notorias en su capacidad sismo-resistente, de carácter conceptual, ciertamente no previstas en las Normas de diseño de 1.947 y 1.955. La asimetría en uno de los edificios inducida por la escalera es un elemento adicional que podría haber aumentado la vulnerabilidad de la estructura, pero aún despreciándolo se explica plenamente su falla. Por otro lado, aún cuando el movimiento sísmico en el

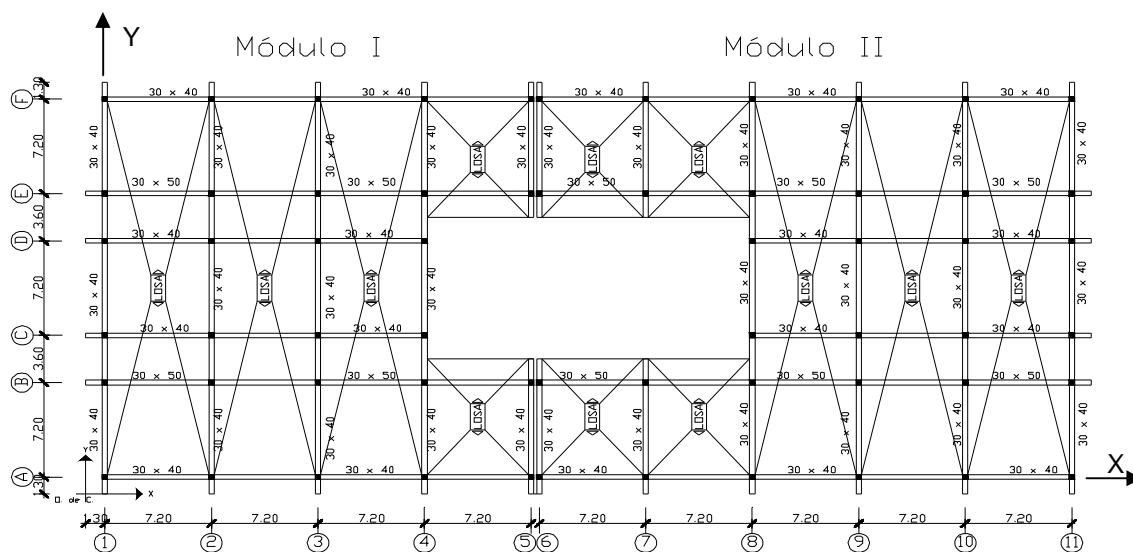
sitio fue de elevada intensidad por su cercanía a la falla, más adelante en este artículo se señala que movimientos de menor intensidad también hubieran podido provocar el desplome de estos edificios debido a su gran vulnerabilidad intrínseca.

### 2.3 Comportamiento del Liceo Raimundo Martínez Centeno

#### a) Descripción del Liceo

El Liceo fue construido en Cariaco en el año 1.985 aun cuando los planos estructurales son de 1.978 [10]. Conviene destacar que en dichos planos se indica expresamente que la estructura había sido diseñada para la Zona Sísmica 2 de la Norma de 1.967 [20], vigente para ese momento; según dicha Norma, Cariaco estaba ubicado en la Zona Sísmica 3 donde se requería aplicar solicitaciones sísmicas dobles a las de la Zona 2.

El liceo estaba constituido por dos módulos similares e independientes, con planta en forma de “C” y separados por una junta de construcción. Ambos módulos unidos dan la apariencia de una planta rectangular anular (Figura 8). Un módulo tenía tres pisos y el otro se le agregó un piso adicional en una pequeña zona; el Módulo I es analizado en este trabajo. La estructura es de concreto armado con pórticos de vigas altas en ambas direcciones ortogonales y paredes de mampostería de 15 cm de espesor con bloques de arcilla, enmarcadas por la estructura (Figura 9).

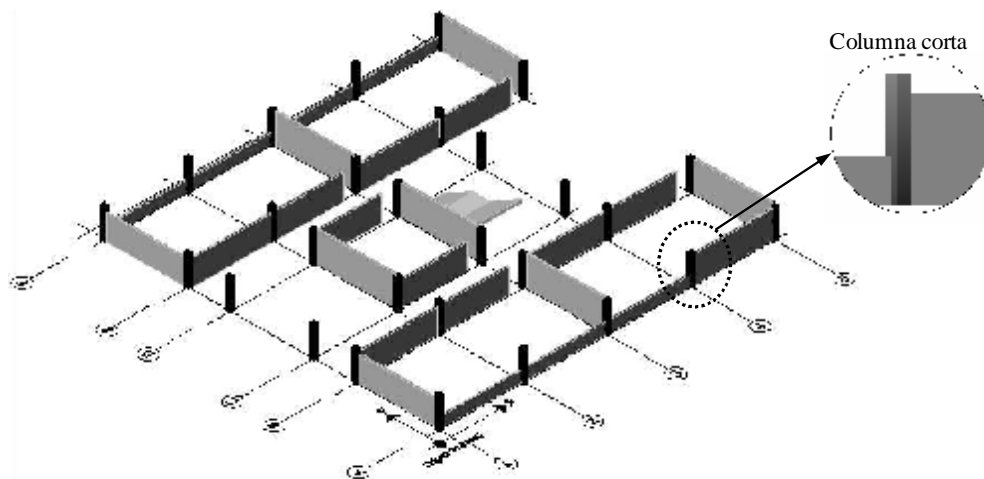


**Figura 8. Planta del primer piso del Liceo Raimundo Martínez Centeno. Dimensiones en metros**

Las losas eran nervadas de altura total igual a 30 cm con nervios en dirección transversal (Y). Todas las columnas son de 35 cm x 35 cm. Las vigas en dirección transversal (Y) tenían una sección de 30 cm x 40 cm. En dirección longitudinal (X) las vigas de carga tenían un ancho de 30 cm y alturas comprendidas entre 40 cm y 70 cm. Las paredes (Figura 9) en los pórticos 1 a 5 llenaban completamente los vanos. En los pórticos B y E eran de altura igual a 2 m generando columnas “cortas” de 70 cm de longitud. En los pórticos A y F las paredes tenían 1,00 m de altura por lo que la longitud libre de las columnas adyacentes era de 1,70 m. El primer entrepiso tenía bastante menos paredes que los otros dos entrepisos; tenía solo la tercera parte de las paredes que rellenaban los pórticos del segundo entrepiso y

la mitad de las del último entrepiso. Además, el primer entrepiso poseía 11 vanos con columnas “cortas” contra 9 en cada uno de los entrepisos superiores.

De las pruebas de materiales hechas después del terremoto se obtuvo una resistencia promedio a compresión del concreto de aproximadamente  $250 \text{ kgf/cm}^2$  y de  $4.200 \text{ kgf/cm}^2$  para el esfuerzo a la cedencia de las barras de acero [6], que corresponden a los valores característicos especificados en los planos estructurales. El refuerzo transversal en columnas consistía en ligaduras cerradas de dos ramas de  $\text{Ø } 3/8$ ". La separación de estribos y ligaduras según los planos, era de 10 cm cerca de los nodos y 20 cm en la parte central. No se observó refuerzo transversal en el interior de los nodos. La cuantía de refuerzo transversal en la zona de confinamiento representaba un valor cercano al 66% del valor requerido para Nivel de Diseño 3 según la Norma actual [22]. Los ganchos de las ligaduras doblaban a  $90^\circ$  aún cuando en los planos se especificó un ángulo de  $135^\circ$ . En algunas columnas se apreció un anclaje inadecuado del acero longitudinal dentro de los nodos así como empalmes fuera de la mitad central de la columna. Se observó también que en el 40% de las uniones viga-columna del primer piso, la suma de las capacidades a flexión de las vigas concurrentes al nodo era mayor que las de las columnas concurrentes [10,21]. Por otro lado, no se apreciaron otros defectos relevantes de construcción ni fallas en las fundaciones.



**Figura 9. Vista tri-dimensional de la planta baja del Liceo Raimundo Martínez Centeno (Módulo I) indicando columnas, escalera, paredes completas y paredes parciales generando columnas cortas**

Desde un punto de vista clasificatorio y bajo el marco de la norma vigente [22] tenemos que la estructura: a) satisface el Nivel de Diseño 1 en general, salvo por la carencia de ligaduras en los nodos, las cuales modernamente se exigen para garantizar la integridad estructural; b) satisface el Nivel de Diseño 2 en cuanto al confinamiento en los extremos de los miembros, aunque no en cuanto a la necesaria resistencia a cortante de todas las columnas; c) no satisface el Nivel de Diseño 3. En consecuencia, podemos decir que la estructura tiene un Nivel de Diseño intermedio entre el 1 y el 2. Parece excesivo asignarle simplemente el Nivel de Diseño 1, clasificación pura que corresponde reservar a las estructuras que no satisfagan ningún aspecto importante del Nivel de Diseño 2.

Desde un marco conceptual, la estructura poseía poca capacidad de disipación en energía, algunas columnas eran más débiles que las vigas y tenían poca capacidad a corte. Varias paredes creaban columnas “cortas” con un modo potencial de falla frágil. Además, existía un número significativamente

mayor de paredes en los entresijos superiores que en el primero, generando un primer entresijo más débil y más flexible que los superiores.

b) Comportamiento durante el terremoto

Un total de 18 estudiantes murieron debido al desplome de los dos edificios. Ambos módulos tuvieron un comportamiento similar, caracterizado por las fallas de las columnas del nivel más bajo y del desplome del edificio con desplazamiento predominante en dirección X (este-oeste), aplastando el primer entresijo y quedando el piso 2 directamente apoyado sobre el nivel del terreno (Figura 10). Se apreció también un desplazamiento significativo en la dirección Y (norte-sur). No se observó evidencia de colisión entre ambos módulos. En los entresijos 2° y 3° que permanecieron en pie, se apreciaron fallas por cortante en varias columnas “cortas” (Figura 11) y fallas a compresión con pandeo del acero longitudinal en otras [10,21]. No se apreciaron fallas en las fundaciones [7 a 10, 17, 21.]



a) Antes del terremoto  
(Cortesía de E. Castilla)



b) Después del terremoto; aplastamiento del primer entresijo  
(Cortesía de E. Castilla)

**Figura 10. Liceo Raimundo Martínez Centeno, antes y después del terremoto**

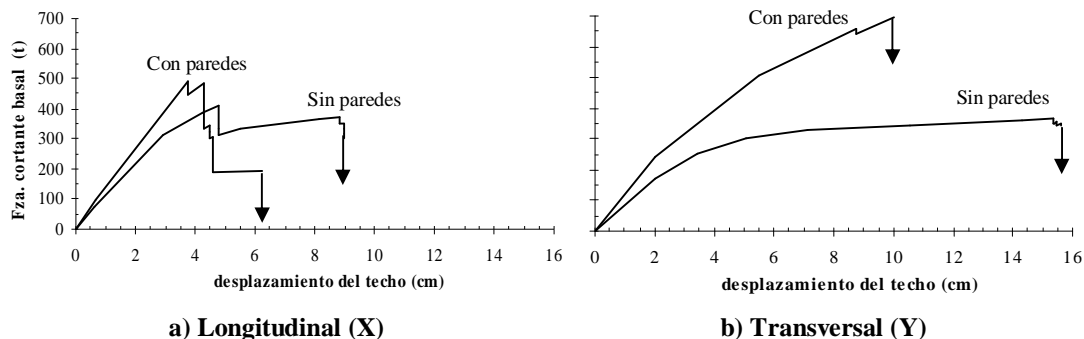


**Figura 11. Falla en columna corta del Liceo Raimundo Martínez Centeno. (Cortesía de E. Castilla)**

c) Análisis del comportamiento

Mediante un análisis estático no-lineal se determinó la capacidad del edificio, en ambas direcciones, aplicando cargas laterales de distribución triangular hasta alcanzar la inestabilidad de la estructura. Las paredes se modelaron mediante bielas equivalentes. El resultado del análisis en dirección longitudinal (X), la dirección predominante de falla, en términos de la fuerza cortante en la base y del desplazamiento del último piso se muestra en la Figura 12a, con un modelo que ignora las paredes y con otro modelo que las considera. Cuando se consideran las paredes, la estructura muestra una conducta bastante frágil, caracterizada por una brusca caída de resistencia debido a las fallas por cortante en las columnas cortas cuya secuencia es la siguiente: una primera falla por cortante en las columnas cortas B3, E3 y E4 del primer entrespezo para una carga de 480 t, seguida de la falla por cortante de las columnas A1, A4, B1, B4, E1, E4, F1 y F4 de la planta baja, que representa una pérdida de aproximadamente el 60% de la resistencia de la estructura, para un desplazamiento de aproximadamente 4,5 cm. Cuando se ignoran las paredes (Figura 12a), la conducta de la estructura es más dúctil, con un desplazamiento hasta de 9 cm, aún cuando se observa una caída moderada de resistencia a los 4,5 cm debido a la falla por cortante de varias columnas. Se infirió un valor de 450 t como capacidad del edificio para efectos de comparar con la demanda elástica y determinar los índices de riesgo. Se concluye entonces que la presencia de paredes que generan columnas cortas, lejos de ayudar más bien potencia la fragilidad del sistema estructural.

Los resultados del análisis para la dirección transversal (Y) que se muestran en la Figura 12b indican un comportamiento más dúctil que en la dirección X, para ambos modelos con y sin paredes, con desplazamientos de hasta 10 cm para la estructura con paredes y mayores para la estructura sin paredes. En el modelo que incluye las paredes se produce una falla por cortante en las columnas cortas A1 y E1 para una carga de aproximadamente 650 t, la cual fue precedida por fallas dúctiles en las vigas.



**Figura 12. Relación carga-desplazamiento lateral hasta el colapso, Liceo Raimundo Martínez Centeno, considerando e ignorando las paredes**

Mediante un análisis dinámico elástico se determinó la demanda que introdujo el movimiento sísmico representado por los espectros de la Figura 2. El edificio tiene un modo fundamental con periodo igual a 0,58 s en dirección longitudinal (X). El peso del edificio se estimó en 1.900 t para la condición de poca carga variable presente en el momento del sismo. La fuerza cortante en la base en dirección X tiene un 50% de probabilidad de estar comprendida entre 1.280 t y 2.300 t con media de unas 1800 t. Esta demanda excede entre 2,8 y 5,1 veces la capacidad del edificio (Figura 12a), con una media de 4 la cual se considera muy elevada debido a la limitada capacidad de disipación de energía. Dada la consideración anterior respecto a que la estructura clasificaría en un Nivel de Diseño intermedio entre el 1 y el 2, podría asignársele una ductilidad global entre 2,5 y 3; sin embargo, debido a la existencia de algunas columnas cortas, estimamos que no podemos admitir un valor de ductilidad superior a 2, el cual es la mitad de la demanda media ( $\sim 4$ ) de ductilidad que impone el sismo.

#### d) Causas del desplome del Liceo

El derrumbe de los dos edificios del liceo fue el resultado de la combinación de dos factores: Deficiencias de carácter conceptual, y el hecho de haber sido construidas en una zona sísmica con el doble de la intensidad estipulada para la zona según los planos de construcción. Las deficiencias conceptuales fueron: i) La limitada capacidad de disipar energía de la estructura, principalmente por la falta de confinamiento en columnas y nodos y la poca resistencia al cortante de columnas, ii) la presencia de paredes enmarcadas por los pórticos generando columnas “cortas” y precipitando fallas frágiles, iii) la disminución de resistencia y rigidez en el primer entrepiso, motivada por la reducción en el número de paredes que rellenaban los pórticos de los entrepisos superiores.

Las deficiencias conceptuales citadas como responsables del mal comportamiento sismorresistente, eran típicas de los diseños de la época. Aún cumpliendo con todos los requerimientos de la norma de 1.967, la capacidad sismorresistente de esas estructuras es considerablemente menor a la capacidad de estructuras diseñadas con las normas modernas, porque éstas han introducido mejoras sustanciales en los criterios de diseño para resistir terremotos. Por lo que podríamos decir que las debilidades sismo-resistentes de esas estructuras eran fundamentalmente de carácter conceptual.

### 3. LAS ESCUELAS Y EL ESCENARIO SÍSMICO VENEZOLANO

#### 3.1 Amenaza Sísmica en Escuelas

A lo largo del sistema cordillerano venezolano coliden las placas tectónicas del Caribe y Sudamérica dando lugar a los grandes sistemas de fallas de Boconó, San Sebastián y El Pilar que han ocasionado terremotos de magnitud estimada de hasta 7,5. Con base a la información geológica y sismológica se han elaborado en el país estudios de amenaza sísmica a fin de determinar con criterios probabilísticos las aceleraciones del terreno a usar en el diseño de estructuras. El mapa de zonificación de la norma venezolana para el diseño sismorresistente del año 2.001, prescribe valores de aceleración máxima del terreno [16]; el país se divide en siete zonas, que pueden ser clasificadas como de muy alta, elevada, moderada y baja amenaza sísmica según se indica en la Tabla 2. Las aceleraciones máximas del terreno asociadas a cada zona sísmica, se incrementan en 30% para el diseño de escuelas [16] considerando la importancia que tienen estas edificaciones. Los valores que se indican en la Tabla 2, están asociados a una probabilidad de excedencia de menos del 5% en un período de 50 años. Se puede notar que en la zona de mayor amenaza se prescribe un valor de 0,52 g, valor coincidentalmente similar al estimado como mediana para Cariaco durante el terremoto de 1.997 (Tabla 1).

**Tabla 2. Distribución de escuelas en las zonas sísmicas de Venezuela**

Amenaza Sísmica	Zona	Aceleración (g)	Número de Escuelas	% de Escuelas
Muy alta	6 - 7	0,46 - 0,52	1.671	5,9
Elevada	4 - 5	0,33 - 0,39	17.844	63,5
Moderada	2 - 3	0,20 - 0,26	7.698	27,4
Baja	0 - 1	≤ 0.13	906	3,2
Total =			<b>28.119</b>	<b>100</b>

De acuerdo a los datos proporcionados por el Ministerio de Educación, existen un total de 28.119 unidades educativas, desde preescolar hasta bachillerato, distribuidas 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 2 nos indica que aproximadamente un 70% de las escuelas, equivalente a un total de 19.515 unidades, están expuestas a amenazas que van de elevada a muy elevada. Este número de unidades representa muy probablemente

un número significativamente mayor de edificaciones puesto que cada unidad educativa está generalmente constituida por varias construcciones independientes, como es el caso de las dos unidades educativas presentadas en este trabajo.

Por otro lado, numerosas unidades educativas del país han sido construidas a partir de unos pocos proyectos arquitectónicos y diseños estructurales. Se estima que existen en el país varias centenas de edificaciones tipo “Cajetón”, similares o idénticas al liceo Raimundo Martínez Centeno, y otras centenas de edificaciones tipo “Antiguo”, similares o idénticas a la escuela Valentín Valiente. La Figura 13 muestra algunas de ellas que pueden compararse con las derrumbadas en Cariaco (Figuras 5 y 10). El elevado riesgo a que están expuestas estas edificaciones había sido ya puesto de manifiesto durante los temblores de Curarigua en el año 1.991, antes del terremoto de Cariaco, según se describe a continuación.



**Escuela Tipo Cajetón**  
(similar al Liceo RMC-Figura 10)  
(Cortesía de E. Castilla)



**Escuela Tipo Antiguo**  
(Idéntica a la Escuela VV-Figura 5)

**Figura 13. Escuelas tipo en Venezuela que son similares o idénticas a las derrumbadas en Cariaco**

### 3.2 La Experiencia de Arenales; Un Aviso Desapercibido

Durante el mes de Agosto del año 1.991 ocurrieron una serie de movimientos sísmicos en el Estado Lara que fueron sentidos por la población. El mayor de todos estos eventos ocurrió el 17 de Agosto en la madrugada, con magnitud  $m_b=5,3$  y profundidad 16 km, localizado en las coordenadas  $10,01^\circ$  N y  $70,03^\circ$  W, que corresponde a los alrededores de la pequeña población de Curarigua, Municipio Torres [23]. El movimiento fue registrado confiablemente por dos estaciones acelerográficas de FUNVISIS localizadas en Quíbor y El Tocuyo a 47 km y 37 km respectivamente, del epicentro. Las aceleraciones máximas en dirección horizontal fueron de 0,037 g en Quíbor y 0,044 g en El Tocuyo (Casa Jelambi); las aceleraciones verticales fueron de menor amplitud.

La escuela Ananías Cotte del pequeño poblado de Arenales localizado a 22 km del epicentro, es una escuela tipo “Antiguo”, prácticamente idéntica a la Escuela Valentín Valiente derrumbada en Cariaco (Figura 5). El movimiento sísmico de 1.991 provocó una falla frágil por cortante en las columnas “cortas” del primer piso (Figura 14), que puso en serio peligro la estabilidad global de la edificación. Estas fallas son similares a las ocurridas en Cariaco (Figura 6) y predichas por los resultados analíticos indicados en la Figura 7. La escuela Ananías Cotte fue posteriormente reparada y reforzada por el Ministerio de Educación con la participación de especialistas en ingeniería sismorresistente de la región.

Utilizando leyes de atenuación propuestas por diversos autores [11-14, 24, 25], en conjunto con la información obtenida en los registros de Quíbor y El Tocuyo, se estimaron valores probables de la

aceleración máxima que ocurrió en Arenales. Para la utilización de las leyes extranjeras basadas en  $M_w$  [11-14], dado  $m_b=5,3$  se estimó  $M_w=5,5$  de acuerdo con Kanamori [26]. Igualmente para la utilización de las leyes nacionales basadas en  $M_s$  [24,25], se estimó  $M_s=4,9$  de acuerdo con las validaciones específicas para Venezuela de Kozuch [27] y Ceresis [28]. Igualmente para la utilización de las leyes extranjeras, a partir de la zona de réplicas [29] se estimaron las distancias a la zona de ruptura discerniendo la dirección del plano de falla, las cuales vienen a ser 43 km para la estación de Quíbor, 33 km para la estación de El Tocuyo y 18 km para Arenales. Se estimó una longitud de rotura de 5 km. Los resultados se presentan en la Tabla 3. Los valores medios predichos por cada ley de atenuación para Quíbor y El Tocuyo (Casa Jelambi) se utilizaron para determinar el factor de corrección  $f$  indicado en la Tabla 3, a fin de ajustar los valores estimados a los valores registrados en dichas estaciones. La mediana y la mediana más una desviación estándar de la aceleración máxima en Arenales se determinaron multiplicando por  $f$  el resultado dado por cada ley de atenuación. Los resultados de la Tabla 3 indican buena concordancia entre los valores de la aceleración máxima estimada en Arenales por los diferentes autores. Promediando todas las leyes se tiene una mediana de 0,080 g y una mediana más una desviación estándar ( $\sigma$ ) de 0,144 g.

Estos resultados sugieren que la aceleración máxima ocurrida en Arenales fue probablemente inferior a 0,14 g, valor éste localizado entre las zonas de baja a moderada amenaza sísmica en la Norma Venezolana (Tabla 2). Y sin embargo, este movimiento causó daños importantes a la estructura de la escuela. Se concluye entonces que las edificaciones escolares tipo “Antiguo” poseen una elevada vulnerabilidad aún ante sismos moderados, evidenciada durante los eventos citados de Curarigua de 1.991.

**Tabla 3. Aceleración máxima para el sismo del 17-8-1.991**

Método (Registro o Ley de Atenuación)	Estaciones Acelerográficas				Arenales		
	Quíbor		El Tocuyo (Casa Jelambi)		Calc.	Corregida	
	$a$ (g)	Correc. $f$	$a$ (g)	Correc. $f$	$a$ (g)	$a$ (g)	$a + \sigma$ (g)
Registro acelerográfico [23]	0,037	---	0,044	---	---	---	---
Campbell [11]	0,029	1,27	0,041	1,08	0,086	0,101	0,169
Sadigh et. al. [12]	0,030	1,22	0,042	1,04	0,082	0,093	0,176
Boore et. al. [13]	0,053	0,70	0,064	0,69	0,100	0,069	0,116
Abrahamson & Silva [14]	0,032	1,17	0,042	1,04	0,080	0,088	0,165
INTEVEP-Occ [24]	0,039	0,95	0,045	0,98	0,058	0,062	0,109
WDC [25]	0,048	0,76	0,056	0,78	0,075	0,067	0,130
Promedio de leyes de atenuación.	<b>0,039</b>	<b>0,96</b>	<b>0,048</b>	<b>0,91</b>	<b>0,080</b>	<b>0,080</b>	<b>0,144</b>

$a$  representa la aceleración registrada o la mediana calculada;  $\sigma$  representa una desviación estándar.





a) Vista General

**Figure 14. Fallas en columnas cortas de la Escuela Ananías Cotte en la población de Arenales durante los sismos de Curarigua de 1991. (Cortesía de A. Morón)**



b) Fallas en columnas cortas

**Figura 14. Fallas en columnas cortas de la Escuela Ananías Cotte en la población de Arenales durante los sismos de Curarigua de 1991. (Cortesía de A. Morón)**

### 3.3 Riesgo Sísmico en Escuelas Tipo

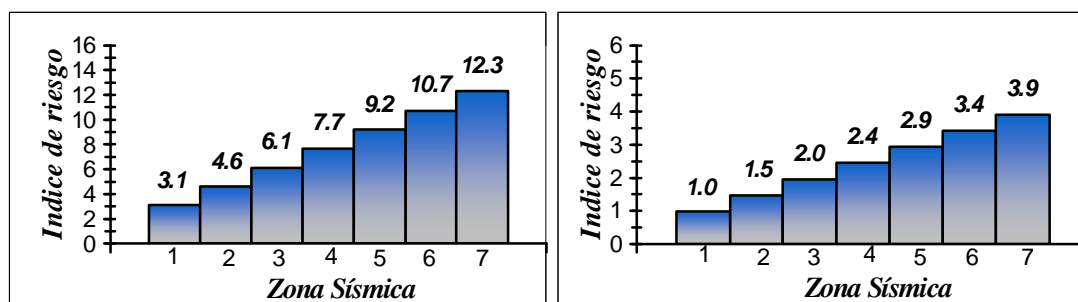
El proyecto de investigación “Reducción de Riesgos Sísmicos en Edificaciones Escolares” dentro del cual se inserta este artículo, tiene como objetivos identificar y clasificar las escuelas existentes en función de su vulnerabilidad, determinar los niveles de riesgos a que están expuestas y proponer medidas de mitigación a fin de bajar el riesgo hasta niveles estipulados en las normas vigentes de diseño sismorresistente, optimizando los costos de construcción y minimizando la interrupción en el funcionamiento escolar. La adecuación estructural de las escuelas considera tres niveles de desempeño:

1) Ocupación Inmediata para movimientos sísmicos moderados, 2) Seguridad de Vida, para movimientos sísmicos severos, y 3) Estabilidad Estructural para el máximo movimiento sísmico creíble.

Las escuelas tipo Antiguo y tipo Cajetón fueron seleccionadas para una evaluación detallada por ser idénticas a las derrumbadas en Cariaco y por estar distribuidas en todo el país. El objetivo inicial es determinar índices de riesgo de cada escuela para cada una de las siete zonas sísmicas en que se divide el país (Tabla 2). Se calculó la máxima respuesta dinámica de cada escuela tipo mediante un modelo elástico lineal sujeto a los movimientos sísmicos especificados en cada zona del país que están caracterizados por espectros de pseudo-aceleración para 5% de amortiguamiento. Se consideró el tipo de suelo más desfavorable entre los definidos en la norma. Se consideraron dos calidades del concreto y cinco modelos matemáticos distintos a fin de discriminar la influencia de las paredes, la escalera, el banco y el agrietamiento de los elementos estructurales. Se consideró la acción conjunta de las cargas gravitatorias, dos componentes horizontales del sismo, la componente sísmica vertical y momentos torsores accidentales normativos que toman en cuenta la componente sísmica rotacional y las incertidumbres en la localización de los centros de masa y de rigidez. Estos casos de carga fueron combinados entre sí siguiendo las pautas establecidas en las normas [16].

Se determinaron índices de riesgo, IR, a nivel local y a nivel global. A nivel local, los IR son el cociente entre la máxima sollicitación elástica que podría desarrollarse en el supuesto de que la estructura no alcanzara la falla, y la capacidad de un determinado elemento estructural. En aquellos elementos con modos de falla dúctil, este índice puede interpretarse como un valor aproximado a la demanda local de ductilidad. A nivel global, el índice de riesgo se define por el cociente entre la máxima fuerza cortante elástica en la base y su capacidad, definida por la fuerza cortante de cedencia que es determinada mediante un análisis estático no-lineal. El índice de riesgo en términos de la fuerza cortante basal se puede interpretar como una aproximación a la demanda global de ductilidad, bajo las acciones sísmicas normativas.

Resultados del índice de riesgo del cortante basal de la escuela tipo Antiguo (Figura 13b) se muestran en la Figura 15a para el modelo con paredes, banco y una resistencia del concreto de 140 kgf/cm<sup>2</sup>. Aún en las zonas sísmicas de moderada intensidad se aprecian valores muy elevados de riesgo para esta escuela; las características del armado y detallado de sus elementos y juntas no permite asignarle índices mayores a 2 tal como se expresó previamente, por lo que se desprende la urgente necesidad de que sean reforzadas. En la Figura 15b se presentan resultados para la escuela tipo Cajetón (Figura 13a), con un modelo que incluye paredes y escalera y una resistencia del concreto de 250 kgf/cm<sup>2</sup>. Adoptando un valor de 2 como un índice tolerable en ellas, se concluye que las escuelas tipo Cajetón localizadas en las zonas 4 a 7 deben ser reforzadas.



a) Escuela Tipo Antiguo

b) Escuela Tipo Cajetón

Figura 15. Valores medios de los índices de riesgo de la fuerza cortante basal en escuelas tipo para las diferentes zonas sísmicas de Venezuela

## 4. ACCIONES PARA REDUCIR LOS RIESGOS

### 4.1 La Experiencia Internacional

Diversos países han reconocido la magnitud del problema y tomado acciones a fin de reducir los riesgos en escuelas existentes así como de garantizar la seguridad de nuevas escuelas durante terremotos. Citemos por ejemplo que, como consecuencia del citado terremoto de Long Beach de 1.933 el estado de California aprobó ese mismo año una ley, conocida como la *Field Act*, que fijó requerimientos especiales para el diseño y construcción de nuevas escuelas [30]. Esta ley y sus reglamentos han sido modificados muchas veces desde su aprobación, y constituyen una de las medidas más efectivas adoptadas por el estado de California para reducir los riesgos sísmicos; la efectividad de estas medidas ha quedado demostrada por el buen comportamiento de las escuelas públicas en terremotos recientes y su utilización como albergues de emergencia. En 1.976 se incorporó la obligatoriedad de revisar y adecuar sísmicamente todas las escuelas públicas construidas antes de la aprobación de la ley. En la actualidad, se exige también a las escuelas privadas el cumplimiento de reglamentos similares impuestos por las autoridades locales. La *Field Act* entre otros aspectos exige que: 1- Los planos y especificaciones sean preparados por ingenieros especializados y certificados por el estado; 2- los diseños sean revisados y aprobados por una oficina independiente; 3- la construcción sea supervisada por personal especializado independiente del contratante, contratados por la coordinación del distrito escolar, y 4- los profesionales que hicieron el diseño, el inspector independiente y el constructor, deben presentar informes escritos, certificados bajo juramento, donde manifiestan que la escuela fue construida de acuerdo a los planos aprobados [31].

Varios países europeos han emprendido también programas de rehabilitación sísmica de edificaciones escolares existentes [32]. Después de los desastres ocasionados por el terremoto de Boumerdès, se ha planificado en Argelia la reconstrucción de 122 escuelas y la rehabilitación de otras 422 [5]. Un programa similar ha sido presentado en Turquía a fin de rehabilitar un total de 3,8 millones de metros cuadrados de construcción [33]. En Latinoamérica se conocen los esfuerzos hechos en Ecuador [34] y en Colombia [35] para mitigar los riesgos en escuelas existentes.

Por otro lado, la adecuación sismorresistente de escuelas construidas antes de la aprobación de las normas modernas representa un reto de grandes proporciones, por el esfuerzo y los costos que involucra. Recientemente se ha propuesto un enfoque innovador que consiste en la aplicación de un conjunto de acciones parciales de adecuación sísmica, distribuidas durante un período de varios años. Propuesto por la Agencia Federal para el Manejo de Desastres de Estados Unidos (FEMA), el procedimiento se denomina Rehabilitación Sísmica Incremental [36]. El manual que describe dicho procedimiento proporciona la información necesaria a los responsables y administradores de escuelas para evaluar la vulnerabilidad sísmica de sus edificios y para planificar un programa de adecuación sismorresistente de manera gradual. Por otro lado, muchas de las víctimas y de los daños materiales ocurridos en terremotos pasados han sido producidos por la falla de componentes no estructurales de edificios, tales como paredes, sistemas mecánicos, techos, parapetos, muebles, y otros. En algunos países se han desarrollado guías que permiten evaluar el peligro de estos componentes y que recomiendan acciones a seguir para reducir los riesgos [37].

Recientemente se celebró en París, Francia, una reunión de expertos con el propósito de identificar y planificar acciones internacionales para reducir los riesgos sísmicos en edificaciones escolares. La reunión fue organizada conjuntamente por el Programa de Edificaciones Educativas (PEB) de la Organización para el Comercio y el Desarrollo Económico (OECD) y *Geohazards International* (GHI) [1]. En las conclusiones de la reunión se manifiesta lo siguiente: "El grupo de expertos cuestiona el que escuelas públicas construidas por los gobiernos de países del mundo en donde se exige la asistencia obligatoria de niños, se derrumben rutinariamente durante terremotos de moderada a elevada severidad causando numerosas y trágicas pérdidas de vidas". El grupo de expertos recomendó

por unanimidad que la OECD estableciera en la fecha más temprana posible un Programa para la Seguridad Sísmica de Escuelas en los países miembros.

#### **4.2 Hacia un Programa Nacional de Reducción de Riesgos Sísmicos en Escuelas**

Con el objetivo insoslayable de lograr la reducción de los riesgos sísmicos en escuelas, es conveniente establecer un Programa Nacional al respecto, el cual debe contener los siguientes elementos:

##### a) Reducción de Riesgos en Escuelas Existentes

Este sub-programa puede organizarse de la siguiente manera:

- Recopilación de información básica y generación de sistemas de información geográfica (SIG) que incluyen mapas de amenaza sísmica, y también de otras amenazas tales como deslizamientos de tierra e inundaciones.
- Desarrollo y aplicación de un instrumento de inspección rápida para determinar índices de vulnerabilidad en escuelas.
- Selección de escuelas de riesgo elevado para estudios detallados, similares a los presentados en este trabajo.
- Proyectos de adecuación estructural debidamente evaluados, optimizando costos y minimizando la interrupción de las actividades escolares.
- Construcción de las obras, con minuciosa inspección estructural y arquitectónica.

##### b) Reducción de Riesgos en Nuevas Escuelas

Este sub-programa debe incluir los siguientes aspectos:

- Evaluación pormenorizada de los nuevos proyectos estructurales, en cumplimiento de la Norma Sismorresistente nacional, más otras reglamentaciones ad-hoc que se establezcan.
- Supervisión e inspección meticulosas, independientes de los constructores de las obras.

##### c) Aspectos Legales

Deberá existir un marco legal para el programa con líneas claras de responsabilidad de cada miembro de la sociedad que participe en el mismo. Tanto para la correcta aplicación de los nuevos diseños de escuelas como para la adecuación y refuerzo de escuelas existentes conviene instituir legal y prácticamente las siguientes medidas:

- Establecimiento de una Oficina o Comisión de Evaluación, constituida por especialistas en ingeniería sismorresistente.
- Exigencia de certificación a los proyectistas, revisores, constructores e inspectores del cumplimiento con las normas del proyecto y de construcción, así como con los planos aprobados.

##### d) Formación Profesional y Técnica.

Es conveniente difundir la aplicación de las normas sismorresistentes y de diseño vigentes, así como las nuevas experiencias nacionales e internacionales que contribuyan al mejoramiento de la

práctica constructiva, de modo de prevenir al máximo cualquier potencial insuficiencia. A tal fin es necesario desarrollar programas de entrenamiento de los ingenieros proyectistas e inspectores. Igualmente, convendría elaborar instructivos de difusión de buenas prácticas técnicas dirigidas a los constructores.

Atención especial se le debe dar a la vinculación de las paredes de relleno con la estructura, de manera de evitar que se restrinja la libre deformación de las columnas y se generen columnas cortas con sus efectos perniciosos para la conducta sismorresistente. Los planos de construcción deben contener indicaciones precisas de las separaciones que se deben mantener entre las paredes y las columnas. Solo en aquellas paredes que llenen por completo el pórtico, pudiese eximirse este requisito. Igualmente, los planos deben indicar la manera como la pared se ancla a la estructura para evitar su derrumbe durante el movimiento vibratorio, especialmente en la dirección perpendicular a su plano.

#### e) Cultura Sismorresistente

Se debe impulsar la generación de una cultura sismorresistente en el país, especialmente entre los profesionales de la ingeniería y los funcionarios gubernamentales, a nivel nacional y local, que cree conciencia en primer lugar de la existencia del problema y luego de las medidas para su solución.

## 5. CONCLUSIONES

Las conclusiones principales de esta investigación relativa al riesgo sísmico en las edificaciones escolares en Venezuela son las siguientes:

1. Se determinó un valor de 0,52 g como la media probable (50 percentil) de la aceleración máxima del terreno que pudo haber ocurrido en Cariaco durante el terremoto del 9 de Julio de 1.997. Por otro lado, la aceleración máxima allí ocurrida tiene una probabilidad del 50% de estar comprendida entre 0,39 y 0,71 g. Estos valores son indicativos de la ocurrencia de un movimiento de elevada intensidad, característico de movimientos muy cercanos a la falla que generó el terremoto.
2. Utilizando análisis dinámico lineal y estático no-lineal se identificaron las causas del derrumbe de cuatro edificios escolares en Cariaco. La falla estructural de dos edificios nominalmente idénticos en la Escuela Valentín Valiente fue el resultado de deficiencias notorias de carácter conceptual en su capacidad sismorresistente, ciertamente no previstas en las normas de diseño y construcción de la época (1.947-1.955). Estas deficiencias eran: i) Una muy baja resistencia y rigidez de la estructura en su dirección longitudinal, ii) la presencia de paredes enmarcadas en los pórticos creando columnas "cortas" y precipitando modos de falla frágil, y iii) la limitada capacidad de disipación de energía de la estructura. El derrumbe de dos edificios similares en el Liceo Raimundo Martínez Centeno puede ser atribuido a dos factores independientes: Deficiencias conceptuales en su capacidad sismo-resistente y el hecho que fueron construidos en una zona sísmica de mayor intensidad a la indicada en los planos de construcción. Las deficiencias conceptuales, no resueltas en su totalidad por la Norma de diseño de la época (1.967), eran: i) Falta de confinamiento adecuado en los elementos de concreto armado; ii) La presencia de columnas cortas; iii) La presencia de una planta baja más débil y flexible que los entresijos superiores.

3. Aproximadamente el 70% de las 28.119 escuelas del país se encuentran localizadas en las zonas de elevada a muy alta amenaza sísmica, de acuerdo a la Norma sísmica vigente para el diseño de nuevas edificaciones. Un número significativo de estas escuelas fue construido con las normas de 1.947, 1.955 y 1.967, con exigencias de diseño sismorresistente significativamente menores a las incluidas en las normas modernas. Un número de ellas que pudiese llegar al millar, son las denominadas Tipo Antiguo y Tipo Cajetón, similares o idénticas a la Escuela Valentín Valiente y al Liceo Raimundo Martínez Centeno, respectivamente, que se derrumbaron en Cariaco.
4. Las escuelas Tipo Antiguo poseen una muy elevada vulnerabilidad aún ante sismos de moderada a baja intensidad como quedó evidenciado en la población de Arenales durante los sismos de Curarigua de 1.991. Con base a los registros acelerográficos obtenidos en poblaciones vecinas se infirió que las aceleraciones máximas ocurridas en Arenales probablemente no excedieron el valor de 0,14 g; esa aceleración moderada causó la falla por cortante de tres columnas cortas del primer entrepiso poniendo en peligro la estabilidad global de la edificación.
5. Mediante técnicas de análisis dinámico lineal y estático no-lineal y bajo el marco de la Norma Sísmica vigente se determinó el riesgo a que están expuestas las edificaciones Tipo Antiguo y Tipo Cajetón en las diferentes zonas en que se divide el país. Las escuelas tipo Antiguo están expuestas a riesgos intolerables, aún en las zonas de amenaza moderada, por lo que se desprende la urgente necesidad de que sean reforzadas. Solo las escuelas tipo Cajetón localizadas en las zonas sísmicas 4 a 7 deben ser reforzadas.
6. Se ha propuesto un programa nacional para la reducción del riesgo sísmico en escuelas, el cual contiene un sub-programa para la evaluación del riesgo y el refuerzo de escuelas existentes y un sub-programa para garantizar la construcción de nuevas escuelas seguras ante terremotos. Ambos sub-programas deben existir dentro de un marco legal que establezca líneas claras de responsabilidad para cada profesional participante en el proceso, junto con la potenciación de la formación profesional y técnica al respecto y la divulgación de cultura sismorresistente en el país

## 6. RECONOCIMIENTO

Se agradece el financiamiento proporcionado por el FONACIT del Ministerio de Ciencia y Tecnología de Venezuela, Proyecto N° 2001003499, y por el Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico (CDCH) de la Universidad Central de Venezuela, Proyecto N° 08-31-4952-2002. Igualmente se agradece la colaboración de la Fundación de Edificaciones y Dotaciones Educativas (FEDE) del Ministerio de Educación y del IMME de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela.

## 7. REFERENCIAS

1. PEB-OECD. *Ad Hoc Expert's Group Meeting on Earthquake Safety in Schools*. Programme on Educational Buildings (PEB) and Geohazards International (GHI). Meeting Papers. OECD, Paris, France, 9-11 February 2.004.

2. Steinbrugge K.V. Earthquake Damage and Structural Performance in the United States. Chapter 9 in *Earthquake Engineering* (R.L. Wiegel, Coordinating Editor), Prentice Hall, Inc. 1.970.
3. Milutinovic Z. and Massué J.P. 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, February 2.004.
4. Dolce M. Seismic Safety of Italian Schools. *Ad Hoc Expert's Group Meeting on Earthquake Safety in Schools*, OECD, Paris, February 2.004.
5. Bendimerad F. Earthquake Vulnerability of School Buildings in Argelia. *Ad Hoc Expert's Group Meeting on Earthquake Safety in Schools*. OECD, Paris, February 2.004.
6. Gülkan P. Seismic Safety of School Buildings in Turkey: Obstacles impeding the Achievable? *Ad Hoc Expert's Group Meeting on Earthquake Safety in Schools*, OECD, Paris, February 2.004.
7. Bonilla R., López O. A., Castilla E., Torres R., Marinilli A., Anicchiarico W., Garcés F. y Maldonado Z. El Terremoto de Cariaco del 9 de Julio de 1.997. *Boletín Técnico IMME*, Volumen, 38, N° 2, 2.000, 1-50.
8. Malaver, A. y Barreiro M. El Terremoto de Cariaco del 9 de Julio de 1.997. *Universidad Católica Andrés Bello*, Facultad de Ingeniería, Departamento de Estructuras, Caracas, Noviembre 1.997.
9. Alonso, J.L. y Bermúdez, M. El Terremoto de Cariaco. *Revista CIV*, 370, 1.998, 17-44.
10. IMME. Evaluación Sismorresistente de las Edificaciones derrumbadas durante el Sismo de Cariaco del 09-07-1.997. Informe N° 209209 del 20/08/1.998. *IMME, Facultad de Ingeniería. Universidad Central de Venezuela*, 1998.
11. Campbell K. W. Empirical Near-Source Attenuation Relationships for Horizontal and Vertical Components of Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Pseudo-Absolute Acceleration Response Spectra. *Seismological Research Letters*, 68, N° 1, 1.997, 154-179.
12. Sadigh K., Chang C. Y., Egan J. A., Makdisi F., and Youngs R. R. Attenuation Relationships for Shallow Crustal Earthquakes Based on California Strong Motion Data.. *Seismological Research Letters*, 68, N° 1, 1.997, 180-189.
13. Boore D. M., Joyner W. B. and Fumal T.E. Equations for Estimating Horizontal Response Spectra and Peak Acceleration from Western North American Earthquakes: A Summary of Recent Work. *Seismological Research Letters*, 68, N° 1, 1.997, 128-153.
14. Abrahamson N.A. and Silva W. J. Empirical Response Spectral Attenuation Relations for Shallow Crustal Earthquakes. *Seismological Research Letters*, 68, N° 1, 1.997, 94-127.
15. López O.A., Bonilla R., Hernández J.J. y Fernández A. Propiedades de las Tres Componentes Principales del Movimiento Sísmico. *Boletín Técnico IMME*, Vol. 42, N° 1, 2.004.
16. COVENIN. Edificaciones Sismorresistentes. Norma 1756:2001, *MCT-MINDUR-FUNVISIS*, Caracas, 2.001.
17. Fernández N. 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*, 1.998.

18. Ministerio de Obras Públicas. Normas para el Cálculo de Edificios 1.955. *MOP, Dirección de Edificios e Instalaciones Industriales*, Caracas 1.959.
19. Ministerio de Obras Públicas. Normas para el Cálculo de Edificios 1.947. *MOP, Dirección de Edificios e Instalaciones Industriales*, Caracas 1.948.
20. Ministerio de Obras Públicas. Norma Provisional para Construcciones Antisísmicas. *MOP, Dirección de Edificios*, Caracas, 1.967.
21. 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.
22. COVENIN. Norma Venezolana. Estructuras de Concreto Armado para Edificaciones. Análisis y Diseño. Comisión Venezolana de Normas Industriales. *Norma COVENIN – MINDUR 1753-87*, Caracas, 1.987.
23. FUNVISIS. Sismo de Curarigua del 17/08/91, Informe de campo. *FUNVISIS*, Caracas, Noviembre 1.991.
24. Quijada, P., Gajardo, E., Franke, M., Kozuch, M.J. y Grases, J. Análisis de Amenaza Sísmica de Venezuela para el nuevo mapa de zonificación con fines de ingeniería. En: *Memorias del VIII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismo-Resistente*, Mérida, Venezuela, 1.993.
25. Cascante, G. Atenuación de Aceleraciones Máximas en Roca o Terreno Firme Obtenida de Registros del World Date Center (WCD). *Informe Interno de CORAL 83*, Caracas, 1.988.
26. Kanamori H. Magnitude scale and quantification of earthquakes. *Tectonophysics*, Vol. 93, issues 3-4, pp.185-199, 1.983.
27. Kozuch, M.J. Earthquake Magnitude and Source Parameter Relations for Venezuela. *Memorias del VIII Seminario Latinoamericano de Ingeniería Sismorresistente*, Mérida, Venezuela, 1.993.
28. CERESIS. Global Seismic Hazard Assessment Program, North Andean Region Final Report. Lima, Perú, 1.998.
29. Valera M. Estudio de la Tormenta Sísmica ocurrida en el Estado Lara en los meses Agosto-Septiembre de 1.991. Trabajo de Grado. *Universidad de Oriente*, 1.995.
30. [www.leginfo.ca.gov](http://www.leginfo.ca.gov) California Codes, Educations Codes, Section 17280-17317.
31. California Seismic Safety Commission. Finding and Recommendations On the Use of Non-Field Act Compliant Buildings for Public Schools. SSC 02-05, December 2.002 (<http://www.seismic.ca.gov/pub>).
32. Spence R. 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, February 2.004.
33. Yüzügüllü Ö., Barbarosoglu G. and Erdik M. Seismic Risk Mitigation Practices of School Buildings in Istanbul. *Ad Hoc Expert's Group Meeting on Earthquake Safety in Schools*, OECD, Paris, February 2.004.



34. GeoHazards International. Invirtiendo en el Futuro de Quito. Escuela Politécnica Nacional, Geohazards International, *Proyecto de Seguridad Sísmica para las Construcciones Escolares de Quito*. GeoHazards International, Ecuador, 1.995.
35. LTDA. Análisis de la Vulnerabilidad Sísmica de las Edificaciones de la Secretaría de Educación del Distrito y Diseño de Rehabilitación de Algunas de Ellas. *Proyectos y Diseños LTDA*, Bogotá, 2.002.
36. FEMA. Incremental Seismic Rehabilitations of School Buildings (K-12). *Federal Emergency Management Agency*, FEMA 395-December 2.002. (El manual puede ser descargado desde [www.edfacilities.org/pubs/schools.pdf](http://www.edfacilities.org/pubs/schools.pdf)).
37. Seismic Safety Commission. Guide and Checklist for Nonstructural Earthquake Hazards in California Schools. *Governor's Office of Emergency Services*, California, 2.004 (El documento puede ser descargado desde [www.seismic.ca.gov/pub/SB122.pdf](http://www.seismic.ca.gov/pub/SB122.pdf)).