

EVALUACION Y ADECUACIÓN ESTRUCTURAL DE EDIFICACIONES ESCOLARES DEL TIPO ANTIGUO II

Carlos Lee ¹, Oscar A. López ²

¹Ingeniero Civil, UCV. *celcaven@yahoo.com*

²Profesor Titular. IMME. Facultad de Ingeniería, UCV. *oalsf@yahoo.com*

RESUMEN

Las escuelas del Tipo Antiguo II son edificaciones construidas hace aproximadamente 50 años, con normas de diseño menos exigentes a las actuales, similares a las colapsadas en Cariaco durante el Sismo de 1997, estimándose en más de un centenar en todo el país. Se realizó una recopilación exhaustiva de las características estructurales y arquitectónicas de las escuelas en varias ciudades del país, elaborándose planos detallados y un modelo virtual consistente en imágenes y videos digitales de la edificación. Se comprobó el carácter repetitivo de estas edificaciones. Se presentan resultados de la evaluación sismorresistente de estas edificaciones, utilizando análisis dinámicos lineales y estáticos no lineales, al igual que alternativas de adecuación, actividades desarrolladas dentro del Proyecto Fonacit 2005000188.

Bajo el marco de la Norma 1756, se determinó la respuesta dinámica considerando un factor de reducción igual a 2 congruente con la limitada capacidad de disipación de energía de edificaciones de esa época. Las derivas observadas excedieron en cuatro veces el valor límite estipulado por la Norma. La relación demanda/capacidad al ignorar las paredes es del orden de seis, pero es dos al incluir las paredes. Estos resultados son indicativos de la baja rigidez y resistencia a carga lateral del edificio.

Se efectuó una evaluación más refinada de la relación demanda/capacidad mediante métodos estáticos no lineales en términos de corte basal y deriva global. Al incorporar las paredes, la rigidez y la capacidad a cortante aumenta sensiblemente, pero el comportamiento pasa a ser indeseablemente más frágil. Se estimó la demanda por medio del Método de los Coeficientes (FEMA-356 y FEMA-440) para la zonas sísmicas 7 del país. Los resultados ponen nuevamente en evidencia la necesidad de aumentar la rigidez y la resistencia de estas estructuras.

Se concluyó la necesidad de adecuar estructuralmente estas escuelas, planteándose alternativas adaptadas a las diferentes zonas sísmicas del país y considerando las prácticas constructivas venezolanas. Se propone el uso de la mampostería existente como elemento estructural, utilizando técnicas de refuerzo conocidas como “friso armado”, brindando mayor rigidez, resistencia y garantizando la integridad de la tabiquería en el tiempo. Así mismo, deficiencias patológicas en estas escuelas, como las columnas cortas existentes, son reducidas o eliminadas. Para edificaciones escolares en zonas de elevado peligro sísmico se propone agregar adicionalmente una estructura auxiliar de concreto armado.

INTRODUCCIÓN

Los elevados riesgos asociados a las edificaciones escolares están presentes a nivel mundial según las experiencias observadas en los últimos sismos. Terremotos recientes han afectado de manera significativa a edificaciones escolares. Las escuelas primarias, secundarias y las universidades, al igual que, hospitales, oficinas de gobierno y centros de comunicación, son instalaciones estratégicas, cuyas estructuras deben ser capaces de resistir las sollicitaciones sísmicas con mejor comportamiento que otras instalaciones comunes. De la estabilidad y buen funcionamiento de las mismas, luego de los sismos, dependerá salvar muchas vidas, no obstante, la experiencia demuestra lo especialmente vulnerables que son las edificaciones escolares durante terremotos de moderada a elevada intensidad.

El 9 de julio de 1997 un terremoto ($M_w=6,9$) en el Estado Sucre dejó un saldo de 73 muertos y sobre los 100 millones de dólares en pérdidas [01][02]. De las siete edificaciones de concreto armado que se derrumbaron, sorprendentemente cuatro fueron edificios escolares. Adicionalmente, otros 35 planteles sufrieron daño estructural severo. En el terremoto en cuestión fueron afectados 301 planteles educativos, ocasionando la muerte de 23 personas entre estudiantes y personal docente [03].

El sistema estructural de numerosas escuelas presentes hoy en día en Venezuela es muy similar al de las que fallaron durante el terremoto de Cariaco. Uno de estos sistemas semejantes es el llamado Tipo Antiguo II, construidos entre los años 1950 y 1960, de los cuales se estima que existen aproximadamente un centenar en todo el país.

El objetivo de este trabajo es evaluar el nivel de riesgo sísmico de estas edificaciones y plantear medidas de adecuación estructural que brinden un mejor comportamiento sismorresistente, teniendo en consideración los diferentes niveles de amenaza para cada zona sísmica y las prácticas constructivas del país.

DESCRIPCION DE LA EDIFICACION

Como ya se ha mencionado, no se disponen de la totalidad de planos de estas construcciones hechas hace unos 50 años por lo que se hizo necesario conseguir información directamente en las edificaciones escolares existentes. Se realizó una recopilación exhaustiva de la arquitectura y estructura de escuelas de Caracas, Guarenas, Santa Lucia, Nueva Esparta, Cumana y Carúpano, comparándose con la información disponible de otras ubicadas en Mérida, Trujillo y Nueva Esparta, obteniéndose como resultado la similitud existente entre todas ellas y comprobando su carácter repetitivo a nivel nacional. Las escuelas examinadas fueron la “E. B. Ambrosio Plaza” de Guarenas, la “E. B. Miguel Villavicencio” de Caracas, la “E. B. Francisco Espejo” de Santa Lucia, la “E. B. Doctor Luis Ortega” de Nueva Esparta, la “E. B. Nueva Esparta” de Mérida, la “E. B. Samuel Darío Maldonado” y la “E. B. Padre Miguel Lorenzo” ubicadas en Trujillo, “U. E. Andrés Eloy Blanco” y “U. E. Juan Freites” de Cumaná, y la “U. E. María Reina de López” de Carúpano, Estado Sucre (Ver Figura 01).



Figura 01. Fotografías del Módulo Principal de dos escuelas del Tipo Antigua II, localizadas en Guarenas (foto izquierda) y en Caracas (foto derecha). Fotografías tomadas por Lee y Abou.

Con la información recopilada se elaboraron planos detallados de la arquitectura (Figura 03) y la estructura (Figura 04), además de modelos en tres dimensiones con sus correspondientes imágenes y videos de animación digital (ver Figura 02). Los resultados de los levantamientos se presentan en términos de imágenes fotográficas, planos arquitectónicos y planos estructurales.

Las escuelas Tipo Antigua II son estructuras aporricadas de concreto armado construidas entre los años 50 y 60, formadas por dos módulos contiguos, un Módulo denominado Principal y un Módulo Anexo (Ver Figura 01 y 02). Estos módulos han sido observados conectados rígidamente como desconectados. El Módulo Principal (edificio de aulas y oficinas administrativas) posee dos niveles, Planta Baja y Planta Alta. El Módulo Anexo (cocina y comedor) consta de un solo nivel.

Módulo Principal

El Módulo Principal cuenta con doce pórticos transversales separados a 3,50 m, identificados con números del "01" al "12", y cuatro pórticos longitudinales separados a 6,25 m en los vanos extremos y 4,75 m en el vano central, identificados con letras de la "A" a la "D". En total 59 columnas cuadradas de 25 cm x 25 cm conforman este Módulo (ver Figura 04). La estructura posee vigas altas de 25 cm x 60 cm en la dirección longitudinal. En la dirección trasversal se encuentran vigas altas de 25 x 60 sólo entre los ejes A-B y C-D; entre los ejes B-C sólo existen vigas en los pórticos extremos. La altura de entrepiso de Planta Baja es de 3,60 m. La altura de entrepiso en la Planta Alta es variable, de 4,60 m a 3,25 m, producto de la inclinación de la losa de techo, la cual es a dos aguas.

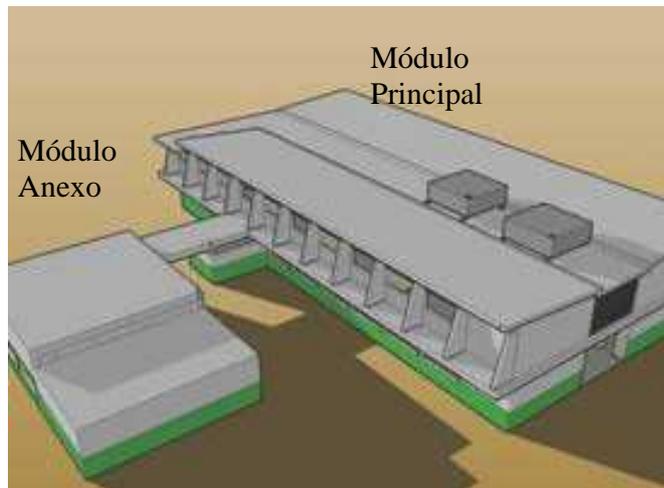


Figura 02. Modulo Principal y Modulo Anexo unidos mediante un pasillo.

La tabiquería existente en ambos pisos de la edificación principal, está compuesta por bloques de arcilla de 25 cm de ancho con un friso en ambas caras de aproximadamente 2,5 cm de espesor, en algunas escuelas se ha detectado la presencia de ladrillo macizos en las paredes transversales que separan las aulas. Las paredes no están desvinculadas o separadas de los elementos estructurales. Todas las aulas de clase cuentan con ventanas que van de cara a cara de columna, situadas a 1,20 m de la losa de piso, con dimensiones de 3,25 m de ancho por 1,80 m de altura. Las paredes que separan las aulas del pasillo central poseen en su parte superior, unas aberturas o ventanas de ventilación de 0,45 m. La configuración de las paredes generan columnas cortas a todo lo largo de los pórticos longitudinales: En los pórticos “B” y “C” las columnas cortas son de 0,45 m de altura, mientras que en los pórticos “A” y “D” son de 1,80 m. En la dirección transversal se presentan alternadamente unos vanos con paredes completas y otros sin paredes.

En el Módulo Principal la losa de piso y techo es nervada aligerada con bloques de arcilla con un espesor de 25 cm (ver figura 05). En la Planta Techo se ubican dos estanques elevados de almacenamiento de agua de concreto armado de aproximadamente 10 mil litros de capacidad cada uno.

Módulo Anexo

El Módulo Anexo posee cinco ejes longitudinales (de la F a la J) y seis ejes transversales (04, 05, 13, 14, 15, 16). En total son 16 columnas de concreto armado, con secciones de 25 cm x 60 cm, 25 cm x 50 cm y de 25 cm x 25 cm (ver Figura 04). Las vigas perimetrales del anexo son de 25 cm x 60 cm. El Módulo Anexo está constituido por un comedor, una zona de cocina, baño y vestidores. En el comedor la altura de entrepiso es de 4,50 m, pero en el área destinada a la cocina es de 3,60 m.

La losa de techo es de 25 cm de espesor está armada en ambas direcciones, aligerada con bloques de arcilla. En la zona de la cocina la losa es de 25 cm de espesor nervada, aligerada con bloques de arcilla (ver figura 05). Las ventanas del comedor son de cara a cara de columna, las mismas son de 1,80 m de altura y se encuentran ubicadas a 0,38 m de la losa

de piso. Las ventanas de la cocina también son de cara a cara de columna, se ubican a 1,60 m de la losa de piso y poseen una altura de 0,80 m. En el Módulo Anexo las paredes son de 30 cm de espesor, constituidas por ladrillos macizos de arcilla frisadas por ambas caras.

Materiales

Las propiedades de los materiales se estimaron con base a una recopilación de información correspondiente a edificaciones escolares en Venezuela de similar antigüedad. El concreto utilizado para la construcción de los elementos estructurales se estima con una resistencia promedio a compresión de 163 Kgf/cm², en vigas, columnas y losas [04].

El acero utilizado para el armado longitudinal de los elementos estructurales se estima con un límite elástico $f_y = 2400$ Kgf/cm² (clasificación A-24) y para el armado transversal $f_y = 2800$ Kgf/cm² (clasificación A-28) [04].

Con base a las exploraciones efectuadas y a la información encontrada en planos de un edificio del mismo tipo, se adoptó como acero longitudinal en columnas: 4 barras de 1/2", 4 barras de 5/8", cuatro barras de 3/4" y seis barras de 1/2" en cada columna, dependiendo del tipo y ubicación. Todas las barras longitudinales se consideraron estriadas en base a lo evidenciado en estructuras similares de la época y a lo observado en una de las columnas de la Escuela Ambrosio Plaza, de Guarenas, cuyo acero estaba expuesto.

De la misma forma, con base a las exploraciones efectuadas y a la información encontrada en los planos antes nombrados, se adoptó como acero longitudinal en vigas longitudinales: 2 barras de 1/2" en ambas caras. Y para vigas transversales: 4 barras de 3/4" más 1 de 7/8" como acero inferior y 2 barras de 3/4" más dos de 5/8" como acero superior. Todas las barras longitudinales se consideraron estriadas en base a lo evidenciado en estructuras similares de la época y por similitud al acero evidenciado en columnas.

El acero transversal presente en columnas (ligaduras) y en vigas (estribos) tiene un diámetro de 1/4" y son barras lisas. Todas las barras de refuerzo transversal en columnas están separadas en promedio cada 25 cm de eje a eje y en vigas cada 20 cm en promedio de eje a eje, en toda la longitud de los elementos, valores obtenidos de las mediciones hechas en sitio con el detector de metales. No se detectó la existencia de zonas con menor espaciamiento o zonas de confinamiento entre barras de refuerzo transversal para vigas o columnas. Es importante acotar que según las mediciones realizadas con el detector de metales, se pudo apreciar que en la escuela María Reina de López de Carúpano existe una gran irregularidad en la disposición del acero transversal existente en las columnas de las edificaciones, llegando a variar de 15 a 35 cm en su separación.

Se consideró un módulo de elasticidad de la mampostería de bloques de arcilla de 20.000 Kgf/cm² y un módulo de elasticidad de la mampostería de ladrillo de 80.000 Kgf/cm² [05].

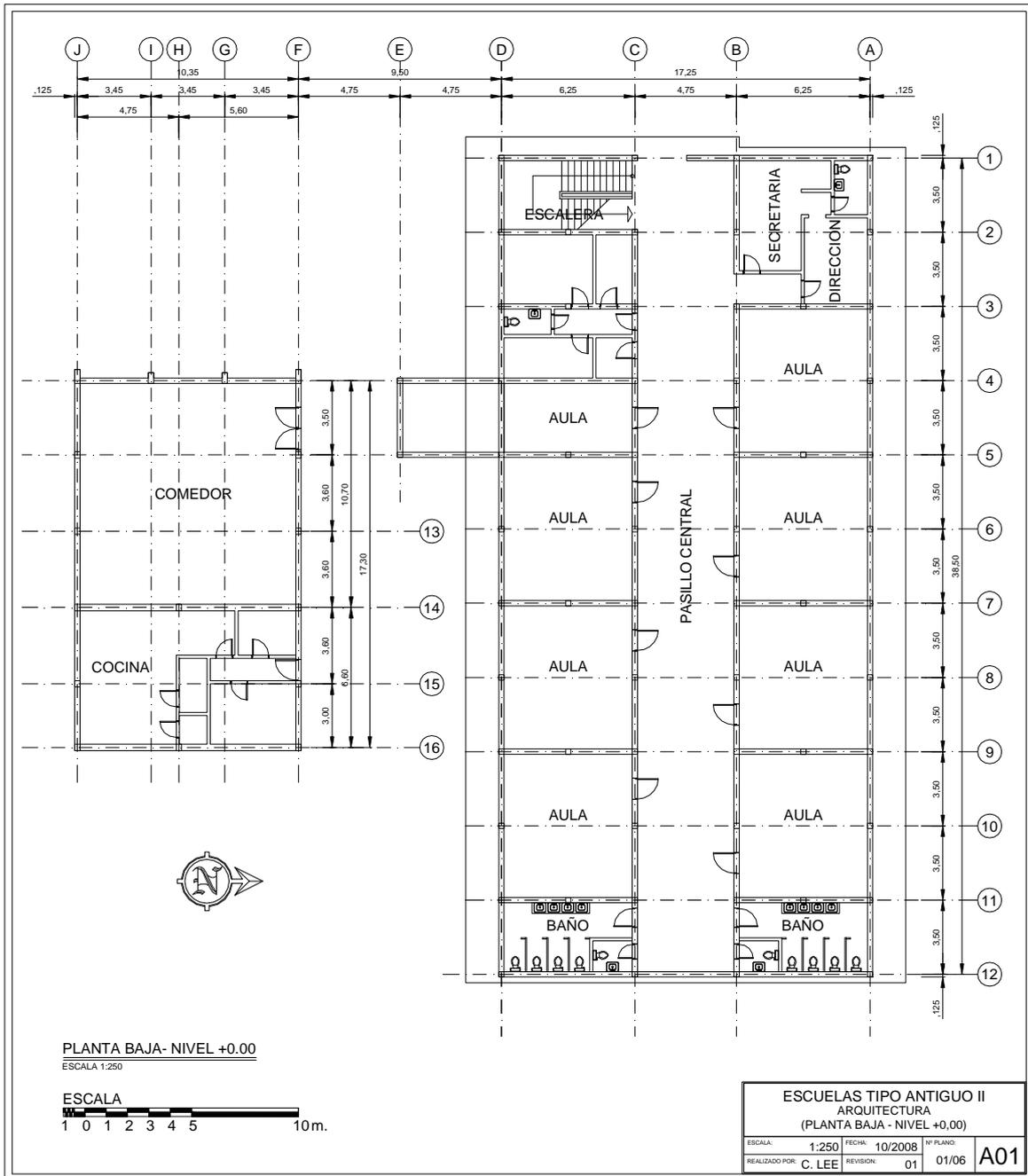


Figura 03. Planta Arquitectónica. Planta Baja del Edificio, mostrando Modulo Principal y Modulo Anexo.

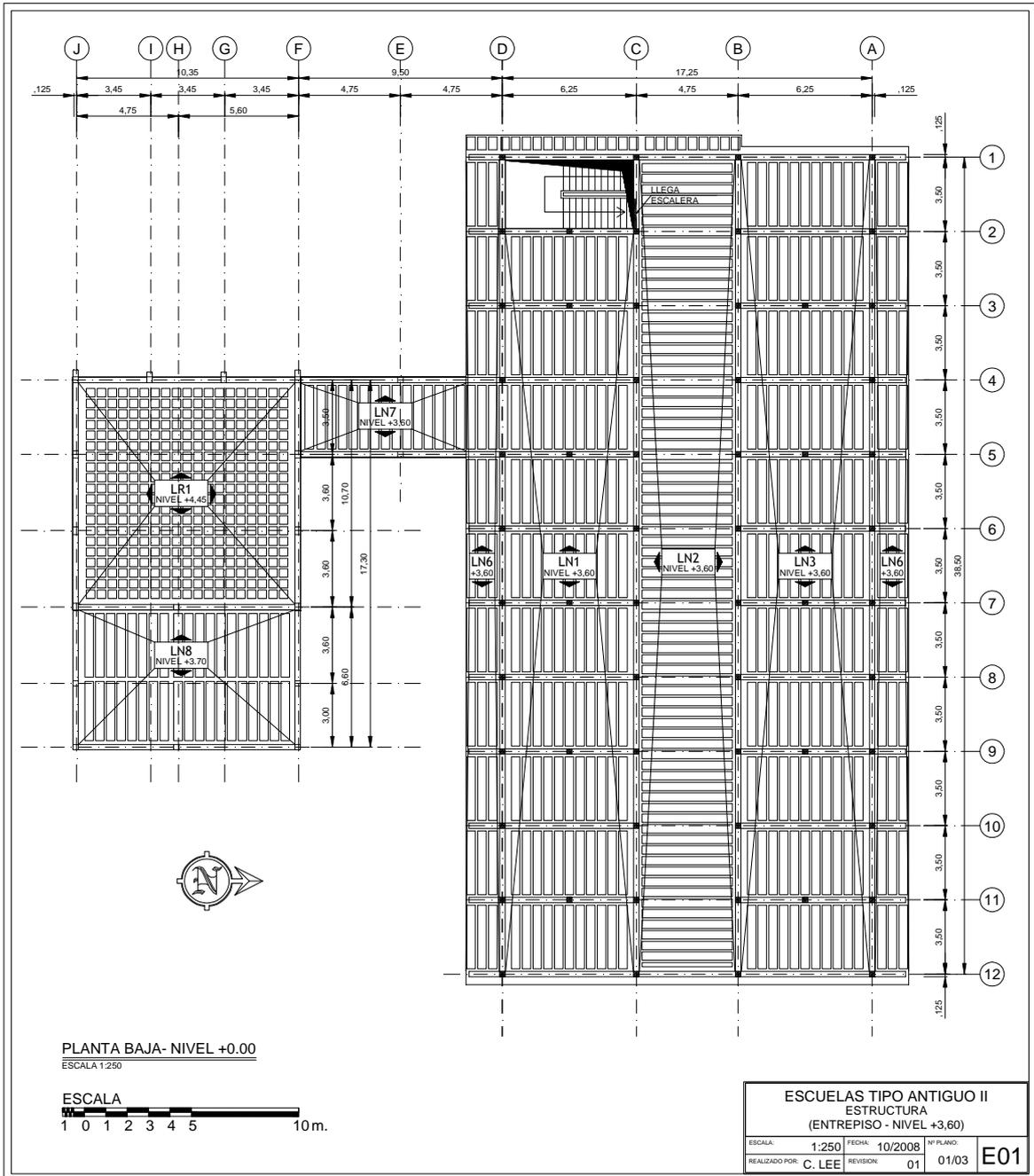


Figura 04. Plano Estructural. Planta Alta o Nivel Entrepiso. Tipología en la cual ambos módulos, el Módulo Principal y el Módulo Anexo está rigidamente conectados.

EVALUACION SISMORRESISTENTE

Modelos Matemáticos

Con la información recabada se elaboraron modelos detallados de la estructura, incluyendo las paredes de mampostería que están enmarcadas por los pórticos. Las cargas variables nominales se toman de la Norma [06], a saber 400 kgf/m² en aulas y 300 kgf/m² en pasillos. Como cargas variables efectivas durante un sismo se considera el 50% de la carga variable de servicio correspondiente a edificaciones educacionales, de acuerdo con la Norma COVENIN 1756 vigente [07]. Se cargó la estructura distribuyendo los pesos propios de losas, paredes, parasoles y la carga variable sobre las vigas correspondientes, incluyendo el peso propio de los elementos estructurales (vigas y columnas). El peso de los estanques fue asignado a las columnas que lo soportan directamente. El peso del edificio es de 1500 toneladas aproximadamente.

Se realizaron ocho modelos de la edificación en los que se variaron algunos elementos para evaluar su influencia en las propiedades dinámicas de la estructura (Ver Tabla 01). Los elementos a variar son: la inclusión de los efectos de rigidez y resistencia de la tabiquería, la conexión del Módulo Anexo al Módulo Principal y la reducción de la inercia de los elementos estructurales.

La rigidez adicionada por la tabiquería se incorporó mediante el uso de bielas equivalentes [10]. Las rigideces de las bielas equivalentes fueron comparadas y ajustadas con las obtenidas en modelos con elementos finitos. Se consideró la estructura empotrada en la base en ambas direcciones. Para definir la longitud de los elementos estructurales se consideró un brazo rígido en la junta del 50% para vigas y columnas. En cuanto a la inercia de los elementos, se utilizó por un lado el 100% de la inercia de la sección gruesa correspondiente a una sección no dañada y por otro lado un valor que corresponda con el estado de agrietamiento esperado durante la respuesta a los sismos según lo estipulado en la Norma COVENIN (para vigas 40% de la inercia de la sección gruesa y para columnas el 60%).

Modelo	Modulo Anexo	Paredes	Inercia
1	No	No	Gruesa
2	Si	No	Gruesa
3	No	Si	Gruesa
4	Si	Si	Gruesa
5	No	Si	Reducida
6	Si	Si	Reducida
7	No	No	Reducida
8	Si	No	Reducida

Tabla 01. Modelos a utilizar para el Análisis.

Acción Sísmica

El espectro utilizado para el análisis posee un Coeficiente de Aceleración Horizontal (A_0) igual a 0,40 correspondiente a una zona sísmica 7 o de peligro sísmico elevado como es el caso de las escuelas ubicadas en Carúpano y Cumaná. El Factor de Importancia (α) usado fue de 1,30 por ser edificación educacional (Grupo A). Las respuestas a ambas componentes sísmicas horizontales definidas por el mismo espectro se combinaron con el criterio de la raíz de la suma de los cuadrados [COVENIN, 2001].

Para la selección del Factor de Reducción de Respuesta (R) se considera que la capacidad global del sistema para disipar energía es baja. Tomando en cuenta la antigüedad de la construcción (década de 1950) se adoptó un valor de R igual a 2, el cual se puede asociar a una ductilidad admisible del edificio del mismo orden.

Con el fin de obtener resultados conservadores aplicables en cualquier escuela Tipo Antiguo II, se estudiaron todos los casos de formas espectrales aplicables eligiéndose el tipo de suelo más desfavorable para cada uno de los modelos realizados.

Respuesta Dinámica, Desplazamientos y Derivas

Se determinó la respuesta sísmica mediante el Método de Superposición Modal con Tres Grados de Libertad por Nivel descrito en la Norma [COVENIN, 2001]. Los cálculos se realizaron con ayuda del programa SAP2000 [CSI, 2004]. En la Tabla 02 se presentan los períodos de los seis primeros modos de vibración de cada modelo del edificio. El efecto de la tabiquería en la rigidez global de la estructura y por consiguiente en el comportamiento dinámico de la misma, es de gran importancia. Comparando los modelos de inercia reducida, sin paredes y con paredes, observamos una disminución del período fundamental de 1,2 a 0,4 segundos respectivamente (Tabla 02).

Modelo	Modos					
	1	2	3	4	5	6
1	0,95	0,93	0,84	0,39	0,38	0,34
2	0,94	0,86	0,65	0,40	0,36	0,36
3	0,35	0,27	0,23	0,15	0,11	0,09
4	0,35	0,27	0,24	0,16	0,12	0,10
5	0,38	0,28	0,23	0,16	0,11	0,09
6	0,38	0,34	0,27	0,17	0,15	0,14
7	1,24	1,20	1,10	0,50	0,50	0,43
8	1,23	1,13	0,86	0,52	0,47	0,46

Tabla 02. Períodos (seg.) de los primeros seis modos de vibración por modelo.

Se determinaron las derivas máximas de cada entrespacio, en cada dirección horizontal del edificio (Tabla 03). En el modelo sin paredes y con inercia reducida, las derivas máximas se encuentran en el orden de 50 por mil, valores que son muy elevados y exceden cuatro veces el valor límite de 12 por mil impuesto por la norma vigente para edificaciones educacionales. En los modelos con paredes e inercia reducida las derivas disminuyen debido al aumento considerable de rigidez ocasionado por el efecto de las paredes de mampostería; estas derivas pasan a estar por debajo de las admisibles, no excediendo el

valor de 8 por mil. En los modelos en los que se considera el efecto del Módulo Anexo conectado al Módulo Principal, se puede observar que el cambio de geometría introduce una disminución apenas perceptible en las derivas máximas de entrepiso, a pesar de la aparición de un importante comportamiento torsional no deseado en la edificación.

Modelos	Descripción (inercia reducida)	Planta Alta		Planta Baja	
		Transv.	Long.	Transv.	Long.
7	Estructura Principal, sin paredes	40	44	48	51
5	+ Paredes	2	8	3	4
6	+Paredes + Modulo Anexo	3	8	4	5

Tabla 03. Derivas máximas (‰) en cada dirección, entrepiso y Modelo.

Análisis Estático No Lineal Aproximado. Relación Demanda Capacidad.

Se determinó el cociente demanda/capacidad en términos del cortante basal. La demanda de fuerza cortante se determinó utilizando un análisis elástico lineal utilizando para ello un espectro reducido con un factor de $R=2$, que es característica en estructuras de esta edad. La capacidad o cortante resistente fue estimada suponiendo un modo de falla global asociado a la falla individual de todas las columnas del entrepiso en consideración. La fuerza resistente de cada columna es la menor entre las fuerzas cortantes asociadas a una falla dúctil (por flexión) o a una falla frágil (por cortante). La fuerza cortante resistente es por tanto la suma de las fuerzas cortantes que resisten sus columnas.

La Tabla 04 presenta el cociente demanda/capacidad para el edificio sin paredes (Modelo 7), con inercia reducida y en cada dirección. Promediando los cocientes se obtiene un valor de 5,5 el cual indica que la demanda excede aproximadamente en seis veces la capacidad considerada como admisible para este edificio. Cuando se consideran las paredes (Modelo 5) dentro de los pórticos, los resultados cambian sustancialmente como se indica en la Tabla 05. El cortante resistente global aumenta debido al incremento de los cortantes resistentes de las columnas, que al ser bastante más cortas no pueden desarrollar su capacidad a flexión y fallan frágilmente por cortante. Como resultado, el valor promedio de la demanda para ambas direcciones es aproximadamente 2,7 veces la capacidad. Debe sin embargo destacarse que la estructura aun siendo más resistente por la presencia de las paredes, posee un comportamiento bastante más frágil que la estructura sin paredes. La capacidad global es únicamente dada por las columnas, no se incorpora la resistencia adicional dada por las paredes, esta resistencia adicional es considerada más adelante. Las paredes solo brindan rigidez a la estructura.

		Demanda T_f	Capacidad T_f	Demanda / Capacidad
Planta Baja	V TRANSVERSAL	753	136	5,5
	V LONGITUDINAL	760	136	5,6

Tabla 04. Tabla Resumen. Cociente Demanda/Capacidad. Estructura Modulo Principal sin Anexo, sin paredes (Modelo 7).

		Demanda T_f	Capacidad T_f	Demanda / Capacidad
Planta Baja	V TRANSVERSAL	789	271	2,9
	V LONGITUDINAL	753	304	2,5

Tabla 05. Tabla Resumen. Cociente Demanda/Capacidad. Estructura Modulo Principal sin Anexo, con paredes (Modelo 5).

Capacidad Sísmica - Análisis Estático No Lineal

Se definieron cada una de las propiedades no lineales de los elementos a partir de su capacidad a flexión, flexo-compresión y fuerza axial. En el caso de las vigas estas propiedades no lineales fueron asignadas en los extremos del miembro considerando una falla por flexión. Para las columnas las propiedades no lineales fueron considerando una falla por flexo-compresión asignadas en los extremos de la altura libre y una falla por corte asignada en el centro de la altura libre. En las bielas equivalentes, que modelan el comportamiento de las paredes, las propiedades no lineales fueron asignadas en la mitad del miembro considerando una falla debida a esfuerzos axiales. La ubicación de estas secciones de fallas corresponde al lugar más probable de incursión en el rango no lineal de cada elemento, para una combinación de carga gravitacional y carga lateral, siendo en las columnas, por citar un ejemplo, el punto en donde con mayor probabilidad ocurrirá la aparición de rotulas por el efecto de columna corta (ver Figura 05).

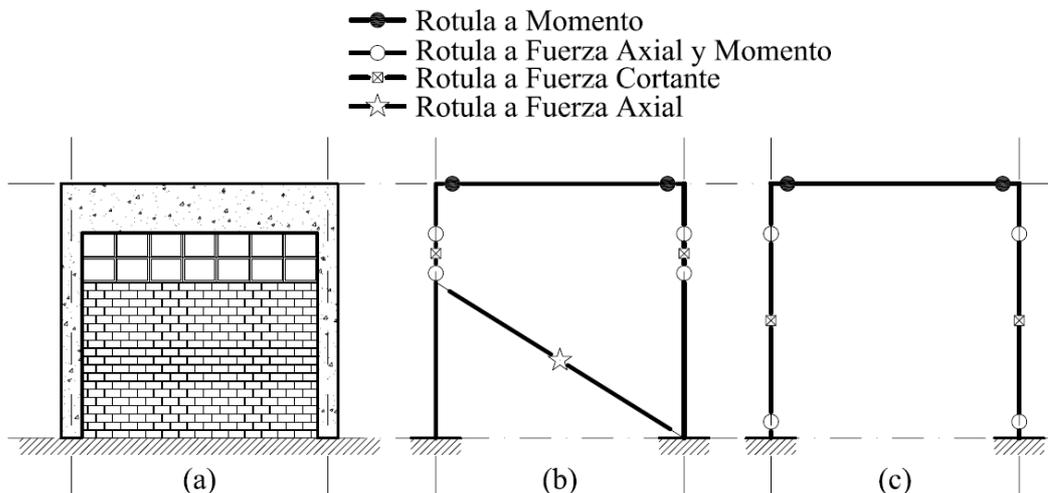


Figura 05. Ubicación y tipo de rotulas de comportamiento no lineal en pórticos. Pórtico Típico (a), Pórtico Idealizado con paredes (b) y Pórtico Idealizado sin Paredes (c).

Para representar la capacidad de las paredes de relleno se consideró el modo de Falla por Compresión Diagonal como el mecanismo de falla indicador de la resistencia última de la tabiquería, calculándose según lo indica la bibliografía consultada [10], estos valores fueron comparados con los recomendados en Normas de mampostería de la región [11], utilizándose conservadoramente como resistencia última valores de 25 a 38 toneladas según la altura de la pared. A partir del armado de las vigas y las propiedades de los materiales se calculó el momento cedente en las vigas M_y , tomándose conservadoramente los valores de

3500 kgf-m para las vigas longitudinales y 17000 kgf-m para las vigas transversales. En las columnas se obtuvo la máxima capacidad a flexo compresión por medio de los diagramas de interacción para cada una de los tipos de secciones.

La capacidad en vigas y en columnas está definida por las graficas de comportamiento no lineal recomendadas por el FEMA 356 [12], FEMA 440 [13], corregidas según lo indicado en el ASCE-SEI 41 [14]. Para las columnas se adoptó dos tipos de curva Momento-Rotación, una con cierta ductilidad (columnas largas sin paredes o paredes llenas) y otra con una falla netamente frágil debido a su geometría (efecto columna corta), a la falta de confinamiento en la sección y su poca ductilidad, similares a las mostradas en las Figuras 06a y 06b respectivamente. Para las vigas se seleccionó una curva Momento-Rotación, similar a la mostrada en la Figura 06c. Para las bielas equivalentes que representan a las paredes de tabiquería se adopta una curva similar a la mostrada en la Figura 06d.

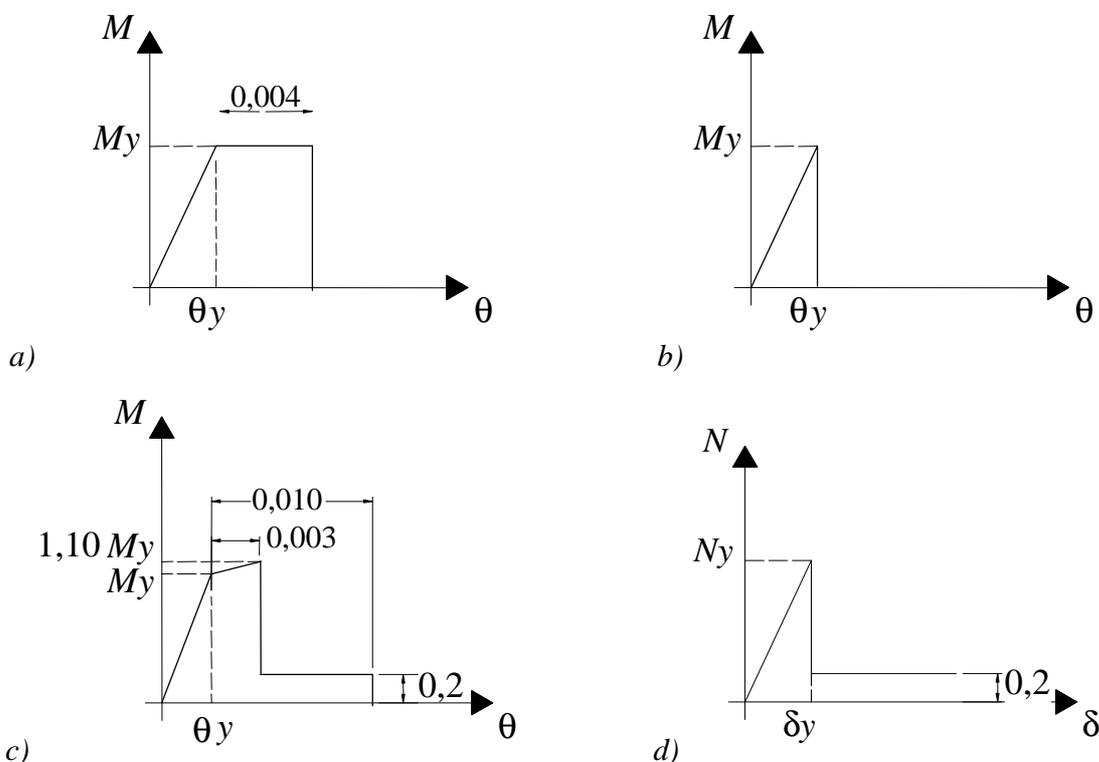


Figura 06. Relación Momento-Rotación: a) para las columnas altas, b) para las columnas cortas, c) para las vigas, y Relación fuerza axial-deformación, d) para las paredes.

Se tomaron para el Análisis Estático No Lineal las cargas provenientes del estudio de cargas gravitacionales, en donde se consideraron las acciones permanentes y variables. Para la acción sísmica, se utilizó un arreglo de cargas, en la dirección a estudiar de la estructura, distribuida de manera triangular creciente hacia arriba, cónsone con la forma del modo fundamental de la estructura.

Se efectuaron varios Análisis Estático No Lineal espacial de la estructura, en ambas direcciones ortogonales de la edificación, tomando en cuenta el efecto de las paredes y además variando la disposición geométrica de dichas paredes dentro del pórtico.

Con los resultados obtenidos (ver Figura 10) se comprobó que en efecto las paredes aumentan drásticamente tanto la rigidez de la estructura al igual que su capacidad a cortante, pero como era de esperarse se pierde enormemente la capacidad para deformarse, fragilizándose el sistema.

REFUERZO ESTRUCTURAL

Según lo muestran los resultados del análisis no lineal, la rigidez y la resistencia adicionada por las paredes es fundamental para la estabilidad de la estructura, debido al pobre desempeño de los pórticos ante la acción de sismos. Pero la capacidad es aún pobre para resistir por sí sola la demanda introducida por un sismo de moderada a alta amenaza.

Se estimó la demanda de desplazamiento requerida para una zona sísmica igual a 7 con el uso del método de los coeficientes estipulado en el FEMA [12][13] para diferentes periodos de retorno (50, 500 y 1000 años), como indicadores del daño a permitir a la estructura.

La opción más expedita de adecuación estructural para estas escuelas consistiría en utilizar las paredes como elementos sismorresistentes. Resolviendo el problema de las indeseadas “columnas cortas” se observa que la capacidad de la estructura aumenta a casi el doble y puede llegar a ser 450 toneladas en el sentido longitudinal y 600 toneladas en el sentido transversal (Ver Figuras 09 y 10), lo cual sería mayor a la demanda hasta para la zona sísmica 3. Por lo tanto, un método rehabilitación consistente en únicamente la eliminación de las columnas cortas podría ser llevado a cabo para escuelas en zona sísmica 0 a 3 (ver Tabla 06).

En este trabajo también se plantea como método de rehabilitación la sustitución de las paredes de mampostería por muros armados a toda la altura del vano, eliminando también las columnas cortas, esta opción brinda mayor rigidez y aumenta la resistencia de la estructura. El método a utilizar se conoce como “mampostería con friso armado”, el cual es una técnica de rehabilitación económica y de sencilla implementación (ver figura 07). Según normativas de mampostería y experiencias realizadas en la región latinoamericana se puede estimar el aumento en la capacidad a compresión de las paredes reforzadas con “friso armado” [15] obteniendo una resistencia adicional de hasta 10 toneladas como valor conservador en cada vano de pared. Esto fue introducido en el modelo no lineal obteniéndose un aumento considerable en cuanto a la capacidad a cortante de la estructura (Ver Figuras 09 y 10). Se observa claramente el como la resistencia de la estructura alcanza las 800 toneladas en ambas direcciones, esto indica que la estructura con paredes reforzadas está en capacidad de resistir la demanda, sólo en términos de cortante basal, de cualquier zona sísmica del país.

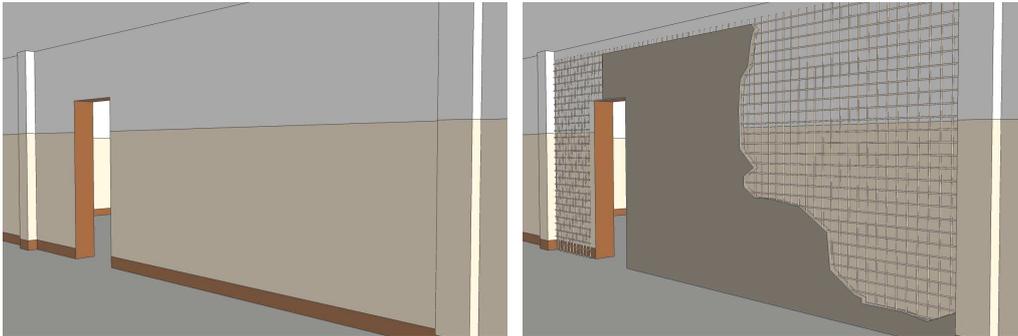


Figura 07. Eliminación de columnas cortas y uso de mampostería con friso armado.

Pero, para lograr que la edificación resista la demanda de una zona sísmica 7, se requiere que posea la capacidad para resistir cortante y además la capacidad a deformarse dúctilmente. Si observamos los resultados obtenidos se ve necesario implementar otros métodos de reforzamiento adicionales en la estructura que brinden un comportamiento menos frágil, den la capacidad de disipar energía dúctilmente y brinde un factor de seguridad mayor. Se propone el uso de un sistema estructural adicional resistente a cargas horizontales, consistente en muros de concreto armado conectados con vigas de acople que colaboren con la estructura a resistir las cargas sísmicas y brinden el comportamiento dúctil esperado (ver figura 08). Este método sería acompañado de la eliminación de las columnas cortas y el uso de la mampostería con friso armado, mencionado anteriormente.



Figura 08. Sistema estructural adicional de muros de concreto armado.

De esta forma y extrapolando los resultados obtenidos a las demás zonas sísmicas del país, se plantea tentativamente tres tipos de niveles de rehabilitación para las escuelas Tipo Antiguo II en todo el país. Un nivel en donde sólo se requeriría la eliminación de las columnas cortas como método de rehabilitación por el bajo peligro, otra en la que se usaría el friso armado para peligro intermedio y por último, en las escuela de mayor peligro, el uso

al unísono de muros adicionales, friso armado y la eliminación de las columnas cortas (ver tabla 06).

En las figura 09 y 10 se muestran las curvas Pushover obtenidas con el programa SAP2000, en donde se muestra el comportamiento de la estructura sin paredes en sus dos direcciones ortogonales, con el efecto de las paredes según el estado actual de la mampostería, eliminando los efectos de columna corta llenando completamente los vanos, y con la adición del friso armado, mostrándose además las demandas de desplazamiento calculadas.

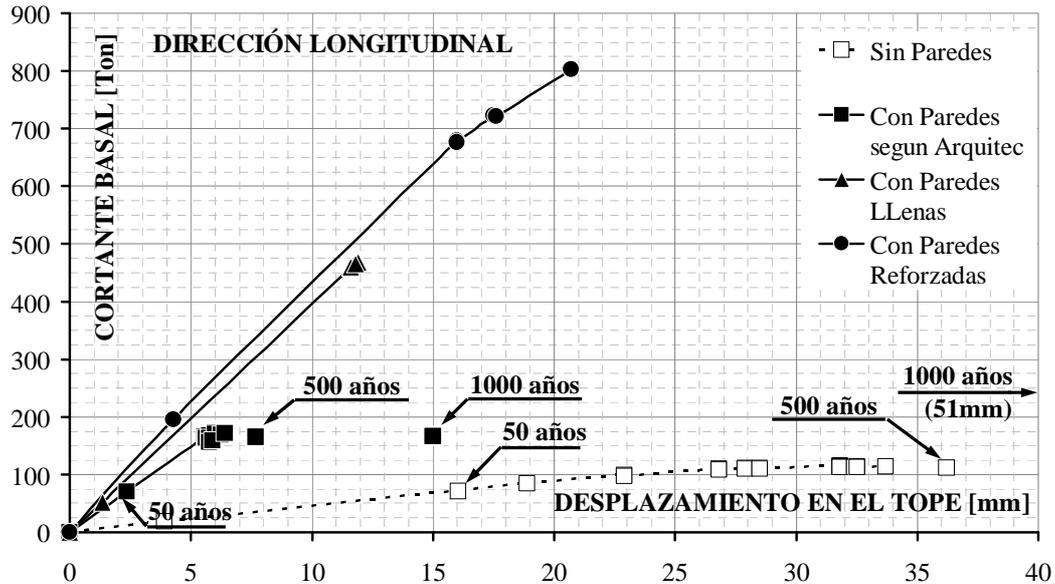


Figura 09. Comportamiento de la estructura en la dirección longitudinal.

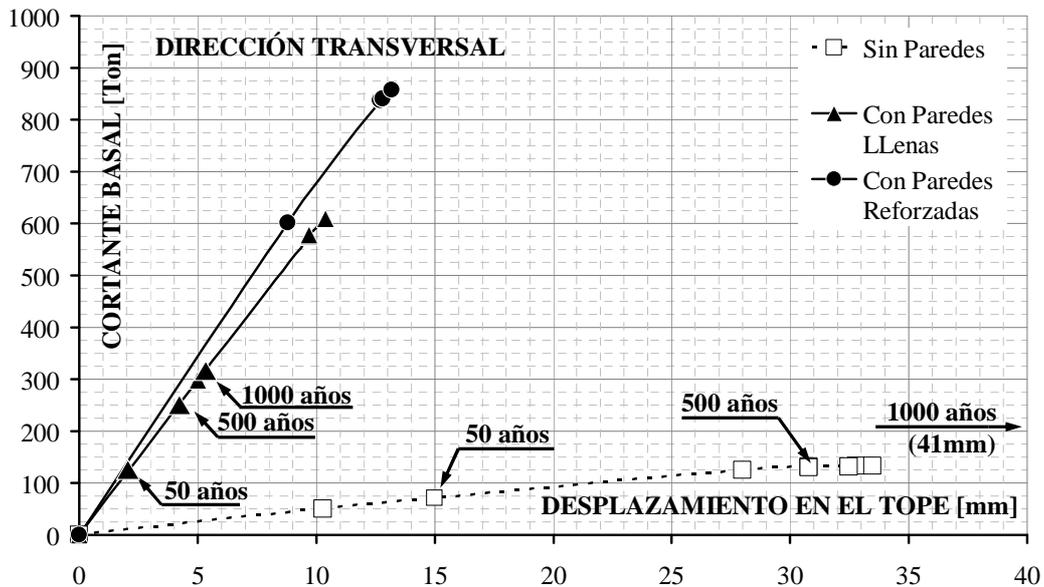


Figura 10. Comportamiento de la estructura en la dirección transversal.

Zona Sísmica	Peligro Sísmico	Ao (g)	Demanda de Cortante Basal (Tf)	Método de Rehabilitación
7	Elevado	0,40	800	Uso de Muros Resistentes, Friso Armado & "ECC"
6		0,35	700	
5		0,30	600	
4	Intermedio	0,25	500	Friso Armado & Eliminación de Columnas Cortas (ECC)
3		0,20	400	
2	Bajo	0,15	300	Eliminación de Columnas Cortas (ECC)
1		0,10	200	
0		0,00	0	

Tabla 06. Métodos de Rehabilitación propuestos para escuelas Tipo Antiguo II a nivel nacional

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con este trabajo queda comprobada la existencia del tipo de edificación escolar, denominado "Tipo Antiguo II", el cual posee carácter repetitivo a nivel nacional. En todas las escuelas estudiadas no se hallaron diferencias estructurales ni arquitectónicas significativas.

Se observó que para una zona sísmica 7 el desplazamiento máximo en el tope estimado es de 32 cm para el modelo sin paredes y de unos 5 cm para los modelos con paredes. Las derivas máximas, en el modelo sin paredes, se encuentran cuatro veces por encima de lo admitido por la normativa vigente. En los modelos con paredes, las derivas cumplen las máximas permitidas, demostrando el efecto de las paredes al aumentar la rigidez global de la estructura.

La relación demanda/capacidad excede casi seis veces la capacidad estimada para el edificio. Por otro lado en los modelos con la rigidez dada por las paredes, en donde no se considera el aumento en resistencia brindado por las mismas, se observan valores de demanda/capacidad cercanos a 3 en ambas direcciones de la estructura, aún cuando debe destacarse que pesar de ser más resistente que el modelo sin paredes, su comportamiento pasa a ser indeseablemente más frágil.

Los resultados del análisis dinámico muestran que el Módulo Principal posee un mejor comportamiento por ser más regular y simétrica cuando se encuentra desconectado del Módulo Anexo, ya que se evitan comportamientos torsionales indeseados. Se recomienda su separación en aquellas escuelas donde se encuentren rígidamente conectadas.

Se concluye con los resultados del análisis no lineal que la rigidez y la resistencia adicionada por las paredes es fundamental para la estabilidad de la estructura, debido al pobre desempeño de los pórticos ante la acción de sismos, se ve notoria la necesidad de reforzar las estructuras ubicadas en zonas con peligro sísmico de intermedio a elevado. Una

opción atractiva de adecuación estructural de estas escuelas consistiría en utilizar las paredes como elementos sismorresistentes, resolviendo previamente las indeseadas situaciones de “columna corta”. La opción estudiada es la sustitución de las paredes de mampostería por muros armados a toda la altura del vano, brindando mayor rigidez y aumentando la resistencia de las mismas por medio del uso del “friso armado”, el cual es un método de rehabilitación económico y de sencilla implementación.

Además de poseer capacidad suficiente para resistir los niveles de carga y esfuerzos debido a sismos, también se deberá permitir a la estructura la capacidad de deformarse dúctilmente. Se propone el uso de un sistema estructural adicional, resistente a cargas horizontales, consistente en muros de concreto armado que colaboren con la estructura a resistir las cargas sísmicas, adicionalmente al uso de la mampostería con el friso armado.

REFERENCIAS

- [01] López O. A., Hernández JJ, Del RE G, Puig J. (2004). *Reducción del Riesgo Sísmico en Escuelas de Venezuela*. Boletín Técnico IMME Vol.42, N° 3.
- [02] Alonso J., Bermúdez, M. (1998) *El Terremoto de Cariaco*. Revista CIV 370, 17-44.
- [03] Rangel A. (1999). *Crónicas de Desastres-Terremoto de Cariaco, Venezuela*. Organización Panamericana de la Salud. Quito.
- [04] Del Re G. (2006) *Evaluación de los Métodos de Análisis Estático No Lineal para verificar el desempeño sísmico en estructuras aporticadas de concreto armado*. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería. UCV. Caracas 2006.
- [05] Fundación Ica. (1999) *Edificaciones de Mampostería para Vivienda*. Ciudad de México. México.
- [06] COVENIN. *Criterios y Acciones Mínimas para el Proyecto de Edificaciones. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Norma 2002-88 (1988)*, COVENIN-MINDUR Caracas.
- [07] COVENIN. *Edificaciones Sismorresistentes. Norma 1756:2001 (2001)*, MCT-MINDUR-FUNVISIS, Caracas.
- [08] COVENIN. *Estructuras de Concreto Armado para Edificaciones. Análisis y Diseño. Norma 1753:1987 (1987)*, COVENIN-MINDUR, Caracas.
- [09] Computer and Structures Inc. CSI (2004). *SAP2000 Nonlinear 8.3.3. Estructural Analysis Program*. Computer and Structures Inc., Berkeley, California, Estados Unidos.
- [10] Pauley T., Priestley M. J. N. (1992). *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*. John Wiley & Sons, INC.
- [11] ININVI (2006). *Norma Técnica de Edificación E-070. Albañilería*. Albañilería Ministerio de Vivienda. Lima.

[12] FEMA (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building. FEMA 356*. Federal Emergency Management Agency. Washington D.C.

[13] FEMA (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. FEMA 440, ATC-55*. Federal Emergency Management Agency. Washington D.C.

[14] ASCE/SEI 41 (2007). *Update to ASCE/SEI 41 Concrete Provisions. Seismic Rehabilitation of Existing Buildings*.

[15] Gobierno del Distrito Federal (2004). *Normas técnicas complementarias para el diseño y construcción de estructuras de mampostería*. Ciudad de México, México