

REPARACIÓN Y REFORZAMIENTO SISMICO DE EDIFICIOS EDUCATIVOS Y HOSPITALES AFECTADOS POR EL TERREMOTO DE JUNIO 2001 EN EL SUR DEL PERÚ

Alejandro MUÑOZ¹, Daniel QUIUN¹, Marcos TINMAN²

1.0 RESUMEN

El terremoto del 23 de junio del 2001 ($M_w=8.4$) causó daños importantes en la infraestructura educativa y de salud del sur peruano. La zona fue declarada en emergencia y las labores de reparación y de reforzamiento tuvieron que efectuarse con celeridad y escasos recursos económicos. Para el desarrollo de los proyectos de reforzamiento, casi nunca se contó con los documentos de obra de los edificios intervenidos y fue imposible seguir sugerencias internacionales en cuanto a niveles de protección y metodología de trabajo. Se adoptaron objetivos de desempeño menores a los indicados como básicos por FEMA y se eligió como estrategia general el incremento de resistencia y rigidez mediante la incorporación de muros de concreto o albañilería.

Hoy la mayoría de los edificios están ya en uso y aunque no fue posible dotarlos de un desempeño óptimo, se ha logrado una importante reducción de su vulnerabilidad. Esta experiencia sugiere la necesidad de desarrollar procedimientos para reforzar edificaciones en países en vías de desarrollo con objetivos más modestos pero viables en términos técnicos y económicos.

2.0 EL SISMO DEL 23 DE JUNIO DEL 2001

A las 3:33 p.m. hora local, el sur del Perú fue sacudido por un fuerte terremoto. La Oficina del Departamento del Interior de los Estados Unidos USGS, asignó al evento una magnitud $M_w = 8.4$. El Instituto Geofísico del Perú (IGP), reportó la magnitud como $M_s = 7.9$ [Ref 1]. Según las cifras difundidas, hubo 75 muertos y 220000 damnificados, concentrados en los departamentos de Arequipa, Moquegua, Tacna y el sur de Ayacucho. Desde el punto de vista de ingeniería y en función de los daños observados y las intensidades reportadas, el sismo puede calificarse como moderado. En la estación de la ciudad de Moquegua del CISMID se obtuvo el único registro de aceleraciones del evento principal, con una aceleración horizontal máxima de 0.3g.

3.0 EVOLUCIÓN DE LAS NORMAS SISMORRESISTENTES

Un modo de falla observado en el terremoto de Nasca, del 12 de noviembre de 1996 ($M_w=7.5$) en locales educativos, fue la falla por columna corta en la dirección longitudinal por la presencia de alféizares de albañilería no estructurales para ventanas altas [Fig. 1, Ref 2]. Este sismo moderado mostró claramente que la estructura de las edificaciones educativas tradicionales en la dirección longitudinal era demasiado flexible.

La Norma Sismorresistente del Perú de 1997 [Ref 3] que reemplazó a la norma anterior de 1977, dio énfasis al aumento de los requerimientos de rigidez. Dentro de la serie de cambios, pueden mencionarse: 1) los desplazamientos laterales calculados con la Norma fueron incrementados; 2) el desplazamiento lateral relativo permitido fue reducido; y 3) los edificios educativos fueron declarados edificaciones esenciales, con un factor de importancia de 1.5 (el más alto de la Norma),

¹ Profesor Principal Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
Socio de Prisma Ingenieros Asesores Consultores, Lima Perú

² Profesor Asociado Departamento de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú.
Socio de Prisma Ingenieros Asesores Consultores, Lima Perú

similar al de hospitales, estaciones de bomberos y otros. Por este motivo, las edificaciones educativas diseñadas y construidas después de 1997, tienen en la dirección longitudinal, columnas de concreto más robustas y fuertes que aquellas construidas antes de la Norma de 1997, con el objetivo de cumplir las limitaciones en desplazamientos relativos y para evitar los efectos de columnas cortas observados en eventos anteriores.

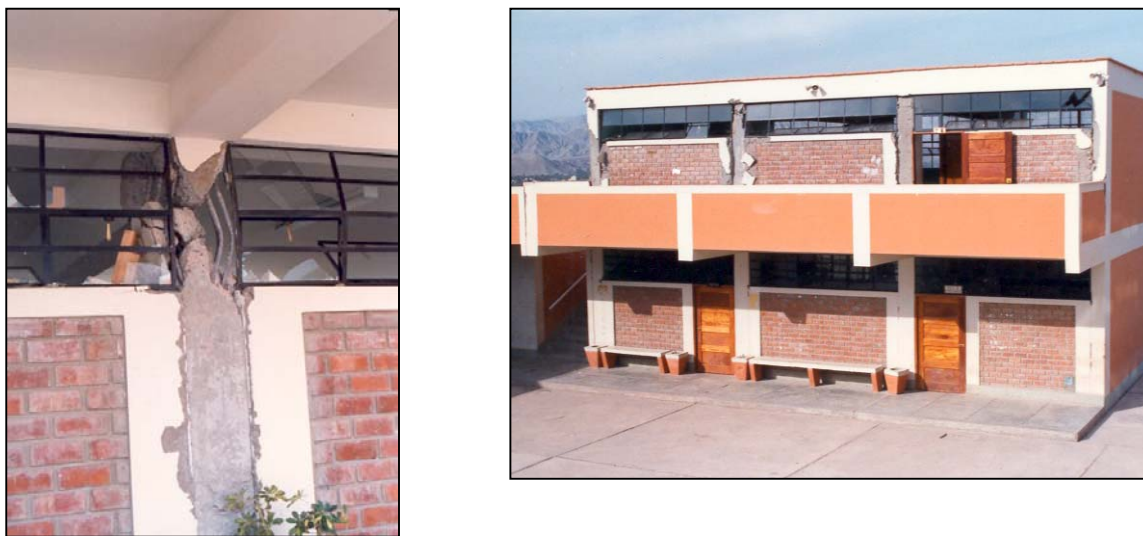


Figura 1. Falla por columna corta en centro educativo, Nazca 1996.

4.0 LOCALES EDUCATIVOS AFECTADOS EN EL SISMO DE JUNIO 2001

La figura 2 muestra el centro educativo Casimiro Cuadros en Arequipa, después del terremoto de junio del 2001. Tiene pabellones que fueron construidos en épocas diferentes, empleando normas y criterios de diseño distintos y con una marcada diferencia en la calidad de construcción. El sistema sismorresistente de estos edificios consiste de muros de albañilería confinada en la dirección transversal y pórticos de concreto armado en la dirección longitudinal.

En este centro educativo, el sismo del 2001 debió mover la cimentación de todos los bloques de manera parecida; sin embargo, cada pabellón tuvo un comportamiento distinto. Los pabellones tradicionales con sistemas de pórticos flexibles, tuvieron fallas de columna corta. En uno de estos pabellones, la mala calidad de la construcción agudizó el problema a tal extremo que se decidió su demolición (Figura 3). En cambio, el pabellón rígido, construido con los criterios de la Norma Sismorresistente de 1997, no presentó daño.



**Figura 2.
Centro Educativo Casimiro Cuadros en Arequipa.**



**Figura 3.
Falla de columna corta en un pabellón antiguo.**

Lo que se encontró en el Colegio “Casimiro Cuadros” es un buen ejemplo de lo observado en otros centros educativos de la zona afectada: pabellones con daños por problemas de columna corta formados por pórticos flexibles de concreto armado en la dirección longitudinal; por otro lado, pabellones sin daños formados por pórticos robustos de concreto armado en la dirección longitudinal. En la dirección transversal usualmente se tienen muros de albañilería sin daños; sin embargo, sí se notaron daños cuando en algunos casos la estructura en esta dirección está formada por pórticos de concreto armado rellenos de albañilería (tabique no portante). La fig. 4 ilustra el caso de una edificación de un piso con columna corta en ambos ejes longitudinales.



Figura 4. Falla por columna corta en ambos ejes longitudinales de centro educativo, Arequipa 2001.

En la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa, los daños también se debieron a la excesiva flexibilidad de los edificios, lo que ocasionó la falla de columna corta en muchos pabellones. En el pabellón de Ingeniería Electrónica se había tratado de evitar el problema de columna corta empleando ventanas entre la columna y los tabiques; sin embargo la poca rigidez del edificio y el marco de la ventana fueron suficientes para que se iniciara la falla (Figura 5).



Figura 5. Daño típico de columna corta en edificios de la Universidad Nacional San Agustín de Arequipa.

En toda la región afectada, los edificios educativos construidos según los criterios de la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente de 1997 no presentaron daño, ni en la estructura, ni en tabiques, puertas o ventanas. El sistema estructural de estas edificaciones consiste en muros de albañilería portante en la dirección transversal y pórticos robustos con columnas de peralte importante en la dirección longitudinal como se muestra en la figura 6.



Figura 6. Edificios educativos modernos construidos con la Norma de 1997, sin daños

5.0 HOSPITALES AFECTADOS EN EL SISMO DE JUNIO 2001

Durante el sismo de junio 2001, se produjeron daños muy pequeños en las estructuras de los hospitales de la zona afectada. Sin embargo, dos hospitales importantes tuvieron que ser evacuados, debidos al daño extendido en elementos no estructurales. El pabellón más alto (7 pisos, ver figura 7) del Hospital Nacional “Carlos Alberto Seguí Escobedo” de Arequipa no tuvo daño estructural; pero, debido al daño generalizado en los muros divisorios de tabiquería de ladrillo, se desalojaron todos los pisos salvo el primero (figura 8).



Figura 7. Hospital en Arequipa-Edif. de 7 pisos Figura 8. Tabiques dañados en Hospital

En el Hospital Hipólito Unanue en Tacna (Figura 9), además de los daños en la tabiquería, se produjeron daños en las redes de agua y desagüe (Figura 10). Se desalojaron todos los pisos superiores del edificio más alto y se improvisaron instalaciones de emergencia.



**Figura 9.
Hospital Hipólito Unanue de Tacna con daño en tabiquería, se desalojó los pisos superiores.**



**Figura 10.
Daños en instalaciones sanitarias en el Hospital Hipólito Unanue de Tacna.**

El hospital Juan Noé Crevani de la ciudad de Arica comprende un edificio de seis pisos que tuvo importantes daños en tabiques y servicios a raíz del sismo de junio 2001. Su estructura está conformada por pórticos de concreto armado más las cajas de ascensores y escaleras (que son muros de albañilería), con excesiva flexibilidad lateral. El edificio fue construido hace más de 30 años y por su cercanía al mar ya tenía problemas de corrosión en las armaduras de columnas. Esta circunstancia ya hubiera ameritado la ejecución de un proyecto de reforzamiento. El sismo ha venido a agravar el estado de la edificación, por la fisuración de una gran cantidad de tabiques, especialmente en las fachadas, y la falta de operatividad de los ascensores producto de la deformación ocurrida en los rieles apoyados en muros de albañilería (fig. 11).



Figura 11. Daños en el Hospital Juan Noé Crevani de Arica: muros de fachada fisurados (izq.) y ascensor fuera de servicio (der.)

La estructura de estos hospitales consiste en pórticos de concreto armado, más los muros de las cajas de ascensores y escaleras. Esto significa que hospitales importantes de la zona afectada, que se construyeron hace varias décadas no cuentan con los criterios de seguridad ni los conocimientos de Ingeniería de hoy en día. Los pórticos de concreto armado sólo se diseñaron básicamente para tomar cargas de gravedad, razón por la cual no tienen la resistencia, ductilidad ni rigidez adecuadas frente a sismos. Sin embargo, en ambas direcciones de estos edificios, existe una cantidad importante de tabiques adosados a la estructura de concreto, los cuales redujeron los desplazamientos laterales, disiparon energía y protegieron el sistema resistente de carga vertical.

6.0 OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y ESTRATEGIA DE REFORZAMIENTO

6.1 Objetivos

Cuando se desarrollaron los proyectos de reparación y de reforzamiento de edificios educativos y de salud en el periodo 2001-2002, la norma peruana de diseño sismorresistente en vigencia desde 1997, establecía que toda estructura reforzada debía tener igual desempeño que una edificación nueva. En cambio la última revisión de esta norma, por entonces aún no oficializada, aceptaba la posibilidad de emplear otros criterios en este tipo de intervenciones. A pesar que recién en el 2003 esta nueva versión se oficializó [Ref 4], el documento de alguna manera amparó muchas de las decisiones que tuvieron que tomarse durante la planificación de las obras.

La zona en que se ubican los edificios afectados es de alta sismicidad, la Tabla 1 muestra la aceleración esperada en roca para sismos con 75 y 500 años de periodo de retorno [Ref 5].

Tabla 1. Aceleración en roca para la zona afectada

Sismo	Tr (años)	Aceleración pico en roca (g)
Frecuente	75	0.2
Raro	500	0.4

Los recursos económicos limitados, la poca información disponible, y la celeridad con que se debían ejecutar los trabajos, obligaron a la elección de objetivos de desempeño menores que los consideramos como básicos por FEMA [Ref 6] ó ATC [Ref 7]. Se fijó como objetivo central el resguardo de la vida para un sismo de 500 años de periodo de retorno y sólo en algunos casos fue posible lograr un desempeño funcional ante las demandas de los sismos frecuentes (Tabla 2).

Tabla 2. Objetivos de desempeño

Sismo	Desempeño	
	Funcional	Resguardo de la vida
Frecuente	☹ ?	
Raro		☺

6.2 Metodología

Definidos los objetivos de manera general, la metodología de trabajo para cada obra en particular se redujo a la lista siguiente:

- . Recopilación de la escasa información de obra y condiciones locales.
- . Levantamiento de información en el sitio. Estudio de mecánica de suelos, elaboración de planos de daños y esquemas estructurales. Identificación de la configuración estructural y defectos de forma.
- . En contadas ocasiones se ensayaron probetas diamantinas de concreto.
- . Definición del sistema de reforzamiento.
- . Análisis del sistema reforzado por procedimientos elásticos.
- . Verificación general del diseño sólo para sismo raro mediante el control de la deriva y los cocientes demanda capacidad para acciones internas.
- . Diseño y detallado del sistema de reforzamiento.
- . Presupuesto

6.3 Estrategia general de reforzamiento

Las edificaciones intervenidas tenían poca rigidez lateral, poca resistencia y ductilidad limitada. La estrategia general consistió en incrementar la resistencia general de las edificaciones y en reducir la deriva para controlar las demandas de ductilidad sobre los elementos existentes. Se emplearon en general nuevos muros de concreto y de albañilería generalmente acoplados, y sólo en pocas ocasiones se recurrió al reforzamiento general de elementos.

7.0 TÉCNICAS DE REFORZAMIENTO PARA EDIFICACIONES ESCOLARES.

El reforzamiento se orientó a reforzar la dirección longitudinal de estas edificaciones, originalmente conformada por pórticos flexibles de concreto armado. En general no fue necesario reforzar la dirección transversal debido a la buena densidad de muros de albañilería confinada existentes.

Para edificaciones de un piso se optó por incorporar muros de albañilería en la dirección longitudinal, debidamente confinados por las columnas reforzadas de los pórticos existentes y por vigas nuevas en el techo. Las figuras 12 y 13 ilustran el sistema de reforzamiento típico empleado.



Figura 12.
Edificio de un piso antes de la intervención



Figura 13
Sistema de Reforzamiento para edificios de un piso

Los edificios de dos a cuatro pisos se reforzaron incorporando muros de concreto y vigas de acoplamiento. Los muros de concreto generalmente se construyeron incorporando a las columnas existentes; las vigas de acoplamiento, de peralte importante, se dispusieron sobre las losas de cada piso. Las figuras 14 y 15 muestran el esquema de reforzamiento para un edificio de dos niveles.



Figura 14.
Edificio de dos pisos antes del reforzamiento.



Figura 15
Sistema de Reforzamiento para edificios de dos a cuatro pisos

En algunos casos, por razones económicas, los muros de corte se tuvieron que reducir en altura o sustituir por muros de albañilería en los pisos superiores, con la consiguiente reducción del desempeño global. Sin embargo, gracias a decisiones como ésta, es que fue posible reforzar muchos edificios para los cuales la intervención se habría reducido a simples reparaciones de acabados e instalaciones.

Los costos de reparación general y reforzamiento en edificios educativos estuvieron entre 75 y 150 dólares americanos por metro cuadrado de área construida.

8.0 REFORZAMIENTO DEL HOSPITAL MÁS IMPORTANTE DE LA ZONA AFECTADA

El Hospital Nacional Carlos Alberto Seguín Escobedo de la ciudad de Arequipa se desarrolla en un terreno de 47000 m² y sus 12 edificios de entre 1 y 7 pisos hacen un total de 32 000 m² de área construida. Sólo se contó con los planos incompletos de algunos edificios, los que en muchos casos fueron sólo referenciales, ya que durante el desarrollo del trabajo se encontraron cambios en arquitectura e instalaciones y algunas modificaciones y reparaciones estructurales no documentadas.

El edificio más alto del hospital, destinado a hospitalización y consultorios, es de 7 pisos con un área construida de 14 000 m² y está separado en dos bloques por una junta (figura 7). La estructura del edificio fue concebida fundamentalmente para tomar cargas de gravedad y consistía de pórticos de concreto armado; además, existen algunos muros de concreto en las cajas de ascensores y escaleras. Las limitaciones arquitectónicas y de equipamiento prácticamente limitaron la intervención a las fachadas longitudinales y algunos ejes interiores. El sistema de reforzamiento consistió en formar pórticos longitudinales rígidos y dúctiles, encamisetando las columnas y vigas de ambas fachadas. En la dirección transversal se incorporaron algunos muros de concreto. La figura 16 muestra la planta del bloque izquierdo con los elementos de reforzamiento en otro color.

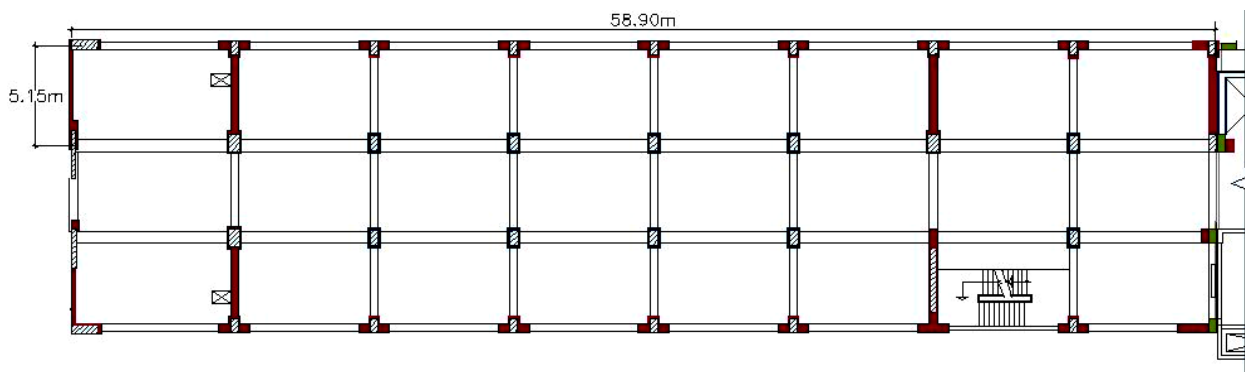


Figura 16.

Esquema general de reforzamiento del edificio de 7 pisos del Hospital en Arequipa.

La tabla 4 muestra los resultados de la evaluación de la estructura con reforzamiento. Los periodos fundamentales de cada dirección se redujeron a la tercera parte y los desplazamientos laterales a la mitad. La resistencia lateral aumentó hasta cuatro veces el valor antes del reforzamiento.

Tabla 4. Evaluación del esquema de reforzamiento por control de deriva

	Dirección Longitudinal		Dirección Transversal	
	Sin Reforzar	Reforzado	Sin Reforzar	Reforzado
Periodo (seg)	1.2	0.4	1.5	0.8
Desplazamiento del techo (cm)	18	8	22	14
Deriva máxima de entrepiso (%)	1.0	0.5	1.2	0.7

A pesar del reforzamiento proyectado, la junta entre los bloques del edificio fue insuficiente y se tuvo que ampliar. En la zona de la junta se construyeron nuevas columnas para poder demoler las existentes al ampliar la junta. El monto del reforzamiento proyectado para todos los edificios fue cercano a los tres millones de dólares americanos (aproximadamente US.\$ 95 /m²). En la figura 17 se puede apreciar el estado del trabajo de reforzamiento del edificio del hospital dos años después del evento y cuatro años después, ya en funcionamiento.



Figura 17. Reforzamiento sísmico del edificio del hospital de 7 pisos en 2003 (izq.) y 2005 (der.).

9.0 DAÑOS POR SISMOS RECIENTES EN EDIFICIOS EDUCATIVOS Y HOSPITALES EN OTROS PAÍSES DE SUDAMERICA

En los últimos ocho años han ocurrido varios sismos en los países de Sudamérica que han producido daños e incluso colapsos de edificios educativos y de salud. Esto implica que hay mucho que trabajar aún para dotar de seguridad a estas edificaciones esenciales e importantes, aumentando su rigidez y resistencia sísmica. Los casos más conocidos de daños y colapsos son: 1) terremoto de Cariaco, Venezuela (Ref 8, fig. 18 izq.) de julio 1997, donde dos centros educativos colapsaron con varios alumnos y profesores muertos; 2) terremoto de Bahía de Caráquez, Ecuador (Ref 9) de agosto 1998, con daños de columnas cortas en el Hospital Regional; y 3) terremoto de Quindío, Colombia (Ref 10, fig. 18 der.) de enero 1999 con daños en centros educativos, clínicas, y colapsos de estaciones de policías y de bomberos. Estos sismos se suman al de junio 2001 que afectó el sur de Perú y el norte de Chile, para configurar una serie de países vecinos con sismos moderados pero con daños inaceptables en edificaciones de salud y edificaciones educativas.



Figura 18. Edificios educativos con daño severo en Cariaco, Venezuela 1997 (izq.) y en Armenia, Colombia 1999 (der.).

10.0 CONCLUSIONES

- Las edificaciones educativas que sufrieron daño en el terremoto de junio del 2001 fueron edificaciones de pórticos flexibles de concreto armado, casi todas por columnas cortas.
- Las edificaciones hospitalarias construidas hace 30 o más años, con estructura conformada por pórticos de concreto armado, son demasiado flexibles y vulnerables ante sismos. Si bien prácticamente no tuvieron daños estructurales, muchas de ellas sufrieron agrietamiento de la tabiquería y daños en las instalaciones, quedando áreas importantes fuera de servicio.
- Al proyectar el reforzamiento de los edificios afectados se debió proceder con gran celeridad y escasos recursos. Casi nunca se contó con planos de obra, ni estudios de sitio.
- No fue posible seguir las sugerencias de organismos como FEMA o ATC en cuanto a procedimientos y objetivos generales debido a la poca información de partida, al corto tiempo disponible para proyectar los trabajos y fundamentalmente a fuertes condicionamientos económicos.
- Los trabajos se orientaron fundamentalmente a garantizar un desempeño de resguardo de la vida para un evento con 475 años de periodo de retorno. Sólo en algunos casos fue posible garantizar el nivel funcional para sismos de 75 años de periodo de retorno.
- La estrategia general de reforzamiento consistió en incrementar la resistencia global de los edificios y la rigidez lateral, reduciendo la deriva.
- En la mayoría de las edificaciones reforzadas se incorporaron muros de albañilería o de concreto acoplados por vigas de peralte importante. En el edificio principal del Hospital más importante de la zona afectada no fue posible incorporar muros de concreto en ambas direcciones, por lo que se emplearon muros en la dirección transversal y pórticos dúctiles en la dirección longitudinal.

- Las sugerencias de FEMA, ATC o SEAOC para el reforzamiento de edificaciones constituyen un marco referencial de poca aplicabilidad en países con dificultades económicas. Es necesario desarrollar una metodología para la reparación de edificaciones con objetivos de protección acordes a las posibilidades económicas y a las condiciones de trabajo de países en vías de desarrollo.

11.0 REFERENCIAS

1. Instituto Geofísico del Perú (IGP). “El Terremoto de la Región Sur del Perú del 23 de junio del 2001”, Lima, Perú, 2002.
2. Quiun, San Bartolomé, Torrealva, Zegarra. “El Terremoto de Nasca del 12 de noviembre de 1996”, Pontificia Universidad Católica del Perú, Departamento de Ingeniería, Sección Ingeniería Civil, Lima, Perú, 1997.
3. SENCICO. “Reglamento Nacional de Construcciones, Norma Técnica de Edificación E.030 – Diseño Sismorresistente”, Lima, Perú, 1997.
4. SENCICO. “Reglamento Nacional de Construcciones, Norma Técnica de Edificación E.030 – Diseño Sismorresistente”, Lima, Perú, 2003.
5. Muñoz A. “Fuerzas de Diseño y Control de Desplazamientos en la Norma Peruana de Diseño Sismorresistente”, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 1997.
6. Building Seismic Safety Council. “FEMA 356 - Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings.” Washington D.C.: Federal Emergency Management Agency, 2000.
7. Apply Technology Council (ATC). “Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. ATC-40.” Redwood City, California: Apply Technology Council, 1996.
8. EERI “M6.9 Cariaco, Venezuela Earthquake July 9, 1997” EERI Special Earthquake Report, http://www.eeri.org/lfe/pdf/venezuela_cariaco_eeri_preliminary_report.pdf, 1997.
9. EERI M7.0 Bahia de Caraquez, Ecuador Earthquake August 4, 1998 EERI Special Earthquake Report, http://www.eeri.org/lfe/pdf/ecuador_caraquez_eeri_preliminary_report.pdf, 1998.
10. EERI M6.2 Quindio, Colombia Earthquake January 25, 1999 EERI Special Earthquake Report, http://www.eeri.org/lfe/pdf/colombia_el_quindio_eeri_preliminary_report.pdf, 1999.