

Procedimiento de Evaluación Sísmica y Refuerzo Estructural Aplicados a un Edificio Escolar

Seismic Assessment and Structural Retrofit Procedure Applied to a School Building

Palazzo Gustavo^{1*}, Roldan Víctor², Guzmán Marcelo³, y Calderón Francisco⁴

RESUMEN

En regiones con peligrosidad sísmica se tienen muchos edificios existentes que podrían sufrir daño o colapso ante un evento sísmico de importancia. Entre esos edificios, se encuentran los edificios que albergan centros educativos. En ellos es necesario desarrollar un procedimiento de evaluación sísmica y en los casos que se requiera, proponer estrategias de refuerzo. El desarrollo de esta temática es el objetivo del presente trabajo. Para ello se estudia un edificio escolar en particular, y se presenta la evaluación sísmica aplicada, con base en el código ASCE/SEI 7-10 y el reglamento argentino INPRES-CIRSOC 103-13. Con este procedimiento se definen las deficiencias estructurales de la construcción. Además, se plantea una estrategia de rehabilitación, que incluye el uso del refuerzo mediante polímero combinado con fibra de carbono (por sus siglas en inglés, FRP, Fiber Reinforced Polymer) y riostras metálicas. En las conclusiones se destacan las ventajas y limitaciones del procedimiento aplicado.

Recibido: septiembre 2018
Aceptado: enero 2019
Publicado: febrero 2019

ABSTRACT

Palabras Clave:

Evaluación Sísmica, Refuerzo Estructural, Fibra de Carbono, Polímero, Riostras Metálicas

Keywords:

Seismic Assessment, Structural Retrofit, Carbon Fiber, Polymer, Steel Braces

There are many existing buildings that could suffer damaged or collapse in a major seismic event in regions under seismic hazard. Among those buildings, we can find the educational centers. The aim of this work is to develop a seismic assessment and structural retrofit procedure applied to school buildings. A two story school building is studied to applied the proposed procedure, which is based on the ASCE / SEI 7-10 code and the Argentine standard INPRES-CIRSOC 103-13. The procedure defines the structural deficiencies of the selected school building. Then a retrofit strategy is considered, which includes the use of fiber reinforced polymer (FRP) and steel braces. The conclusions highlight the advantages and limitations of the procedure applied.

1. INTRODUCCIÓN

Las construcciones existentes en zonas con peligrosidad sísmica podrían ser vulnerables, ya sea porque fueron diseñadas y construidas sin reglamentos sísmorresistentes o con reglamentos desactualizados. En estos casos es necesario tener una estrategia para realizar tanto la evaluación sísmica como el refuerzo estructural. Especial atención requiere este estudio en edificios de importancia pública como son las escuelas. Por tal motivo, en este trabajo se presenta una metodología de evaluación sísmica y refuerzo estructural basado en la norma americana ASCE/SEI 7 (2017) y en los requerimientos del reglamento argentino INPRES – CIRSOC 103 (2013).

*Autor para correspondencia.

Dirección de correo electrónico: Palazzo Gustavo, gpalazzo@frm.utn.edu.ar

1 y 3 Ingeniero en Construcciones, PhD; 2 Ingeniero Civil, PhD; 4 Ingeniero Civil, Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional Mendoza, Argentina, y SOLIDUS Ingenieros Consultores.

La metodología general se implementa en un edificio escolar de planta rectangular que tiene 2 niveles, con una superficie cubierta por planta de 362.40 m², y una superficie cubierta total de 724.80 m². El primer nivel posee un diafragma rígido compuesto por un sistema de losa aligerada, y el segundo un diafragma flexible conformado por una cubierta metálica.

El sistema de cimentación está constituido por 45 zapatas aisladas casi cuadradas, de 2.00 m x 2.10 m, desplantadas a 1.20 m desde el terreno natural. Los muros están desplantados sobre cimientos de 0.30 m de ancho por 0.80 m de profundidad.

La estructura sismorresistente se compone de:

(i) En la dirección longitudinal

PB (planta baja)

Un plano estructural de muro encadenado de ladrillo cerámico macizo (fachada sur), interrumpido por marco en zona de ingreso; un plano estructural de marco con relleno parcial de muro no estructural de ladrillo cerámico macizo (límite norte de aulas); y un plano de marco (límite norte de galería). Los muros tienen un espesor de 0.18 m; y originan en los dos primeros planos estructurales antes mencionados el fenómeno de columna corta, dada la posición de las ventanas (según se observa en Figuras 1 y 2). Las columnas de encadenado tienen 0.20 m x 0.40 m.

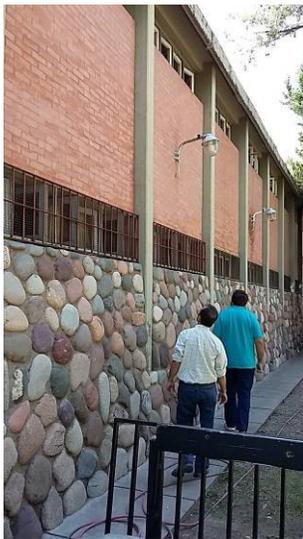


Figura 1 (a). Edificio escolar (fachada y sector galería)



Figura 1 (b). Edificio escolar (muro perimetral este)

PA (planta alta)

Dos planos estructurales de columnas aisladas con relleno parcial de muro no estructural de bloques huecos cerámicos (límite norte y sur de aulas); y un plano de marco (límite norte de galería). Los muros tienen un espesor de 0.18 m; los cuales no originan el fenómeno de columna corta, debido a la cubierta metálica en este nivel. Las columnas de encadenado también tienen 0.20 m x 0.40 m.

(ii) En la dirección transversal

PB: Quince planos estructurales con dos muros encadenados de 0.30 m de espesor en los límites este y oeste, cinco muros de encadenado de 0.18 m de espesor que cubren completamente el vano, y ocho marcos (los muros están constituidos por ladrillos cerámicos macizos).

PA (planta alta): Quince planos estructurales con dos muros encadenados de 0.30 m de espesor en los límites este y oeste, seis muros de encadenado de 0.18 m de espesor que cubren completamente el vano, y siete columnas aisladas (los muros también están constituidos por ladrillos cerámicos macizos). Adicionalmente, dos escaleras que se conectan con la estructura del edificio principal mediante dos vigas de concreto reforzado que cumplen también las funciones de barandas. Estas vigas tienen apoyos de tipo simple sobre la viga del marco en la galería.

La cubierta metálica del patio que se muestra en la Figura 1, fue construida con posterioridad a la estruc-

tura principal. Las correas principales de esta cubierta apoyan sobre el capitel de las columnas de PA.

Con el propósito de lograr los objetivos de este trabajo, se presentan en las secciones siguientes los estudios dirigidos a evaluar la calidad de los materiales que integran la estructura (sección 2); una metodología de evaluación sísmica (sección 3); un procedimiento de refuerzo estructural (sección 4). En la sección final de conclusiones (sección 5), se destacan las fortalezas y debilidades de las metodologías implementadas.

2. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS MATERIALES DE LA ESTRUCTURA

2.1 Concreto

Los estudios de la construcción se iniciaron con la evaluación de la calidad del concreto que conforma la estructura sismorresistente. Estos estudios, que se mencionan a continuación, se realizaron considerando el manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado (Rincón et al., 1998). El manual de rehabilitación de estructuras de hormigón (Helene y Pereira, 2007), y la Guía para la durabilidad del hormigón del Comité ACI 201 (ACI 201.2R, 2001).

(i) Esclerometría

La esclerometría se realizó, como se observa en la Figura 2, para estimar la resistencia a compresión del concreto estructural. Se utilizó un equipo Controls N° LE-187, de acuerdo con el procedimiento indicado en la Norma IRAM 1694 (1989).



Figura 1 (c). Edificio escolar (escalera)



Figura 2. Ensayo de esclerometría

(ii) Carbonatación

La evaluación del frente de carbonatación, como el que se muestra en la Figura 3, se realizó con fenof-taleína.



Figura 3. Ensayo de carbonatación

(iii) Ultrasonido

Se realizó el ultrasonido según la Norma IRAM 1683 (1990), con un equipo Controls Modelo 48 N° 21046, tal como se observa en la Figura 4.



Figura 4. Ensayo de ultrasonido

(iv) Extracción de testigos

Se extrajeron 4 testigos de concreto, como lo indica del reglamento argentino CIRSOC 201 (2005): uno en columna de PA, dos en columnas de PB, y uno en zona de escalera.

Las consideraciones resultantes de estos estudios fueron:

El frente de carbonatación tenía un avance de aproximadamente 20 mm, alcanzando la ubicación de la armadura. No obstante, la armadura se encontraba íntegra, sin un proceso de corrosión en evolución.

En cuanto a los resultados de los ensayos esclerométricos, se pudo estimar que el concreto presentaba, en general, la misma calidad en términos de dureza superficial. No se encontraron dispersiones significativas entre los distintos resultados obtenidos. De acuerdo con la correlación prevista entre el índice esclerométrico, la profundidad del avance del frente de carbonatación, y la resistencia a compresión del concreto, se pudo estimar que la calidad del concreto de las columnas en términos de resistencia a compresión sería del orden de los 20 + 6 MPa. Mientras que la resistencia a compresión obtenida según los 4 testigos fue de 12.35, 20.56, 23.01 y 28.32 MPa, respectivamente.

En lo que respecta a los ensayos de ultrasonido, la velocidad del pulso resultó, en términos generales, del orden de los 3.0 km/s, lo cual correspondería a un concreto de calidad de regular a bueno.

Para las simulaciones computacionales se consideró para el concreto una resistencia especificada a la compresión f'_c de 20.00 MPa, y un módulo de elasticidad longitudinal E de 21019.00 MPa.



Figura 5. Ensayo de detección de armadura con pachómetro



Figura 6. Estudio de verificación de armadura

2.2 Armadura

Con la utilización de pachómetro se procedió a la identificación de presencia y ubicación de armadura longitudinal y transversal en distintos elementos estructurales (Figura 5). También, en algunas zonas, se verificó la armadura existente, eliminando el recubrimiento de la misma, según se observa en Figura 6.

La armadura longitudinal estaba conformada por acero nervado estirado en frío, ADM 520; mientras un acero liso, del tipo AL 220, constituía la armadura transversal.

2.3 Mampostería

La mampostería maciza se supuso integrada por ladrillo cerámico macizo, clase B; y mortero de resistencia normal; con resistencia básica a la compresión de 1.5 MPa y resistencia básica a corte de 0.25 MPa. Se consideró un módulo de elasticidad longitudinal de 1700.00 MPa, y módulo de corte de 510.00 MPa.

Como no se realizaron pruebas en este material, los valores indicados se tomaron del reglamento argentino-INPRES – CIRSOC 103 (2018).

La mampostería hueca se supuso integrada por bloque hueco portante cerámico, clase B; y mortero de resistencia normal; con resistencia básica a la compresión de 1.2 MPa y resistencia básica a corte de 0.20 MPa. Se consideró también un módulo de elasticidad longitudinal de 960.00 MPa, y módulo de corte de 288.00 MPa. Como en el caso de la mampostería con ladrillo macizo, los parámetros mecánicos se obtuvieron del reglamento argentino antes mencionado.

2.4 Suelo

Según los estudios realizados, y los antecedentes de la zona, se constató que existe un perfil muy similar y homogéneo en toda la fundación de la edificación. Con base en la velocidad media de la onda de corte ($V_{sm} = 182.60$ m/s), y al número de golpes medio del ensayo de penetración normalizado ($N_m = 4.0$), se consideró un sitio Tipo 3 – SE – Suelo cohesivo blando de baja plasticidad (según INPRES-CIRSOC 103, 2013).

Los parámetros promedios obtenidos entre la cota -0.90 a -1.60 fueron: presión máxima neta (última) del suelo natural 128.90 kN/m² para cimientos y 187.00 kN/m² para bases aisladas; cohesión 0.013 MPa; ángulo de fricción interna $\phi 15^\circ$; densidad natural húmeda/seca $\gamma 14.30/15.88$ kN/m³; y módulo de deformación E_o (a 1.2 m de profundidad) 2000.00 kN/m².

3. EVALUACIÓN SÍSMICA

Con el modelo computacional que se muestra en la Figura 7 se realizó la evaluación sísmica de la construcción existente, mediante un programa comercial

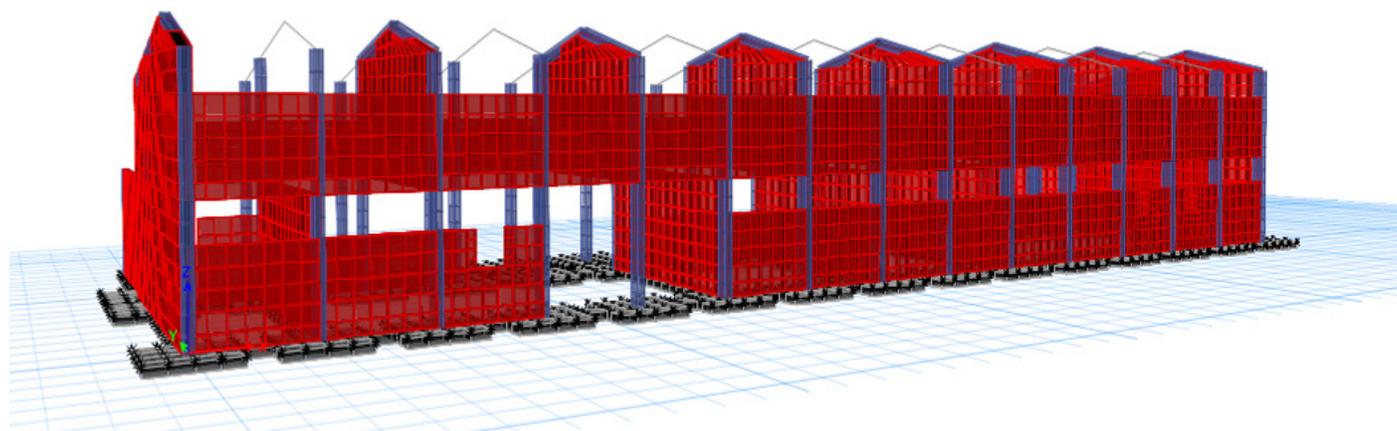


Figura 7. Modelo computacional del edificio escolar

de elementos finitos. Los elementos estructurales lineales (vigas y columnas) fueron representados con elementos tipo frame de dos nodos, en tanto que los elementos estructurales y no estructurales planos (muros y bases) fueron representados con elementos tipo shell de cuatro nodos.

Para la estructura se utilizaron como método de análisis modal: el método estático y el método dinámico (procedimiento de respuesta lineal en el tiempo) según el INPRES-CIRSOC 103 (2013). Como demanda sísmica se consideró el sismo de diseño del reglamento argentino, modificado en función del factor de riesgo correspondiente a escuelas.

Las evaluaciones de los requerimientos reglamentarios del INPRES-CIRSOC se tabularon tomando como referencia el procedimiento 1 del ASCE/SEI 41-17, para determinar con mayor facilidad el cumplimiento de los requisitos de diseño para la estructura. Una muestra de esta evaluación se presenta en la Tabla 1, ejemplificado para el caso de las verificaciones relativas a los encadenados de los muros resistentes. En esa Figura, una X en la columna “C” indica que el requisito se cumple, en la columna “NC” que no cumple, en la “NA” que no es aplicable, y en la “D” que la respuesta es desconocida.

Del análisis estructural, para el modelo del edificio original con un corte basal de 2571.00 kN en dirección longitudinal y de 2126.00 kN en la transversal, se destaca: (i) la demanda máxima en columnas cortas de fachada fue de 123.00 kN; (ii) la demanda máxima de corte en muros exteriores en la dirección transversal fue de 492.00 kN; y (iii) la distorsión horizontal máxima para las columnas cortas en la dirección longitudinal fue del 1.36%.

En función del estudio antes descrito se determinaron las siguientes deficiencias en la estructura primaria:

—Capacidad a corte insuficiente del sistema sismorresistente longitudinal.

—Capacidad a corte insuficiente de columnas cortas.

—Estribos insuficientes en columnas aisladas.

Con base en las consideraciones anteriores, se concluyó que la estructura existente en su estado actual era sísmicamente vulnerable, siendo necesario diseñar un sistema de refuerzo.

Se destaca que el presente estudio no contempló una evaluación detallada de la vulnerabilidad sísmica de elementos no estructurales.

4. REFUERZO ESTRUCTURAL

4.1 Características generales del refuerzo

La estructura existente original se mantuvo completa. No se reforzaron planos estructurales en la dirección transversal, ya que la capacidad sismorresistente de la estructura original fue superior a la demanda sísmica.

Como estrategia de refuerzo se consideró:

—Un sistema de refuerzo local, materializado con polímeros reforzados con fibra (FRP), para aumentar la capacidad a corte de las columnas cortas, y contribuir a la restricción lateral de armadura longitudinal en las columnas aisladas; y

—Un sistema de refuerzo global de la capacidad sismorresistente, constituido por un sistema de riostras que se incorporaron en los extremos de los planos estructurales de fachada, en la dirección longitudinal. Este refuerzo fue diseñado según la norma americana ACI 440.2R (2008).

No fue necesario reforzar las cimentaciones de la estructura original; aunque se agregó un nuevo sistema de cimentación para el sistema de riostras, conformado por una viga y dos pozos para cada grupo de diagonales.

El mecanismo de colapso buscado en la dirección longitudinal consistió en lograr: una eventual formación de zonas de plastificación de riostras; y rótulas plásticas en base y capitel de columnas cortas (sin falla de corte).

De esta manera, el refuerzo propuesto no modificó la regularidad estructural de la obra primaria.

Del análisis estructural, para el modelo del edificio rehabilitado con un corte basal de 2126.00 kN en ambas direcciones, se destaca: (i) la demanda máxima en columnas cortas de fachada fue de 61.00 kN; (ii) la demanda máxima de corte en muros exteriores en la dirección transversal fue de 503.00 kN; y (iii) la distorsión horizontal máxima para las columnas cortas en la dirección longitudinal fue de 0.80%. Con el nivel de demanda que resulta de la simulación computacional se verificó el cumplimiento de los requerimientos del reglamento argentino INPRES – CIRSOC 103 (2013).

En las secciones siguientes se muestran detalles del proceso constructivo de ambas estrategias de refuerzo.

4.2 Refuerzo con FRP

Como metodología implementación del refuerzo con FRP se consideró: la limpieza del sustrato, reparación de las zonas dañadas del mismo, preparación del

Tabla 1. Ejemplo de tabulación de requisitos reglamentarios del INPRES-CIRSOC 103 (2013)

Ítem	C	NC	NA	D
Ubicación de las vigas de encadenado (4.1.4.)	X			
Ubicación de las columnas de encadenado (4.1.5.)	X			
Inexistencia de columnas cortas		X		
Resistencia mínima del concreto para los encadenados La mínima resistencia especificada a la compresión del concreto a utilizar en la ejecución de los encadenados de concreto reforzado será de 20 MPa (4.2.1.)	X			
Armadura longitudinal mínima y separación máxima en encadenados (4.4.4. y 4.5.4.)	X			
Armadura transversal (4.4.5. y 4.5.5.) El diámetro mínimo de los estribos, y la separación máxima cumple 4.4.5. y 4.5.5. tanto para: Las zonas críticas (en una longitud de 600 mm medida a partir del borde interno del elemento correspondiente, y para nudos de encadenado), como para las zonas normales (longitud de viga comprendida entre zonas críticas).	X			
Clase de Acero para los encadenados Para las barras longitudinales y estribos de los encadenados de concreto reforzado podrán utilizarse los siguientes tipos de acero: ADN 420 y ADN 420 S (4.2.2.)	X			
Resistencia de diseño axial > resistencia requerida en encadenados (4.4.2. y 4.5.2.)	X			
Capacidad de vigas de encadenado en cubierta flexible Deberán diseñarse tanto para las acciones contenidas en el plano del muro como en el plano perpendicular al muro de acuerdo con el Capítulo 8 de la parte III (4.1.4.2.-c).			X	

adhesivo y su colocación, y aplicación del tejido FRP impregnado del adhesivo. Las tareas mencionadas se muestran en la Figura 8.

4.3 Refuerzos con riostras

Para el refuerzo con riostras se consideró, como se presenta en la Figura 9: excavación de cimentaciones, armado y llenado de viga de cimentación y bases, instalación de marco metálico anclado en estructura de concreto reforzado, y colocación de las riostras.



Figura 8 (a). Sistema de refuerzo con FRP (limpieza del sustrato en concreto reforzado)



Figura 8 (b). Sistema de refuerzo con FRP (limpieza del sustrato en mampostería)



Figura 8 (c). Sistema de refuerzo con FRP (reparación del sustrato dañado)



Figura 8 (d). Sistema de refuerzo con FRP (preparación del adhesivo y colocación)

Figura 8 (e). Sistema de refuerzo con FRP (colocación del sistema FRP + adhesivo)





Figura 8 (f). Sistema de refuerzo con FRP (colocación de conectores)

5. CONCLUSIONES

La vulnerabilidad sísmica de construcciones existentes en regiones de moderada y alta peligrosidad, así como las posibles estrategias de refuerzo estructural, constituyen un problema a nivel mundial. Entre estas construcciones se debe prestar especial atención a los edificios escolares, dada la función particular que ellos tienen. Si bien, se tienen normas internacionales que presentan procedimientos para la evaluación sísmica, tal como el ASCE/SEI 41 -17, en este trabajo se propuso una metodología de evaluación inicial basada en el primer nivel desarrollado en la norma americana, pero adaptado a los requerimientos del reglamento argentino (INPRES-CIRSOC 103, 2013). Este procedimiento permite realizar una evaluación inicial para detectar las principales deficiencias que presenta la construcción, la cual se completa con una evaluación mediante la simulación computacional del edificio sometido a la demanda sísmica correspondiente al lugar donde se emplaza la obra (considerada en forma estática y dinámica).

Para poder realizar una evaluación completa, es necesario ampliar la metodología propuesta a la consideración de los elementos no estructurales (no considerados en este trabajo). Además, considerando que el procedimiento de evaluación preliminar podría implementarse en varios edificios, sería conveniente obtener una cuantificación que permita establecer un orden de construcciones según su nivel de vulnerabilidad.

La metodología de rehabilitación adoptada en este trabajo se materializó mediante dos estrategias: una local y la otra global.

La local consistió en la aplicación de tejido de FRP para aumentar la capacidad a corte de columnas cortas, y para suplir la falta de estribos necesarios para evitar el pandeo de armadura en columnas. Si bien, esta metodología implica un costo alto de materiales y de mano de obra especializada, pudo concretarse con la escuela en funcionamiento. Se evitó así sacar de servicio al edificio, y los costos y complicaciones asociados a esa acción. Aunque, en el reglamento argentino esta estrategia de refuerzo no está incluida, el organismo que contrala de la obra no indicó objeciones, ya que la documentación técnica del refuerzo incluyó la normativa internacional, y bibliografía que avala su eficiencia.

La estrategia de refuerzo global consistió en la incorporación de riostras metálicas para reducir principalmente los desplazamientos de piso del edificio. Para evitar la concentración de esfuerzos en la zona de vínculo de la riostra a la estructura existente, las diagonales metálicas se vincularon a un marco metálico anclado a la estructura en todo su perímetro. Como todos los elementos que integran esta estrategia de refuerzo se realizaron en taller, los tiempos de implementación en obra fueron reducidos, contribuyendo también a lograr una metodología de refuerzo realizada en poco tiempo, y con la escuela en funcionamiento.



Figura 8 (g). Sistema de refuerzo con FRP (columnas cortas de fachada)

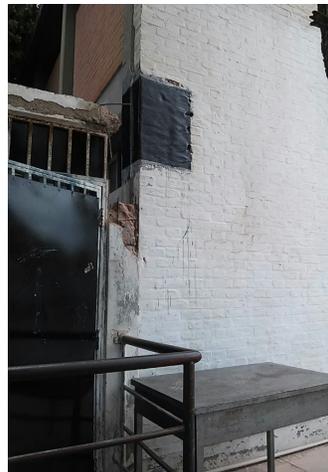


Figura 8 (h). Sistema de refuerzo con FRP (refuerzo de columna corta en extremos)



Figura 8 (h). Sistema de refuerzo con FRP (columnas aisladas con refuerzo)



Figura 9 (a). Sistema de refuerzo con riostras (viga de cimentación y bases).



Figura 9 (b). Sistema de refuerzo con riostras (viga de cimentación y base).



Figura 9 (c). Sistema de refuerzo con riostras (preparación de anclajes en losa)



Figura 9 (d). Sistema de refuerzo con riostras (marco metálico anclado)

En investigaciones futuras es necesario considerar estrategias de diseño, con baja relación costo – eficiencia, que puedan implementarse en varios edificios escolares con tipologías estructurales similares. También es necesario desarrollar estrategias de reducción de vulnerabilidad de los elementos no estructurales que comúnmente integran un edificio escolar.

Se destaca que, si bien la metodología de evaluación sísmica y refuerzo propuesto necesita mejoras, constituye un procedimiento inicial eficiente para considerar la vulnerabilidad de edificios escolares existentes, con una propuesta de refuerzo que considere dos deficiencias comunes en estos edificios, como son las columnas cortas y la cantidad de estribos insuficientes en columnas.



Figura 9 (e). Sistema de refuerzo con riostras (riostroas instaladas)



Figura 9 (f). Sistema de refuerzo con riostras (riostroas instaladas)

REFERENCIAS

ACI 201.2R (2001). Guía para la Durabilidad del Hormigón. Comité ACI 201.

ACI 440.2R (2008). Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures. American Concrete Institute.

ASCE/SEI 7 (2017). Minimum design loads for buildings and other structures. American Society of Civil Engineers

CIRSOC 201 (2005). Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. INTI - CIRSOC.

Helene, P.; y Pereira, F. (2007). Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón: Reparación, refuerzo, y protección. CYTED.

INPRES-CIRSOC 103 (2013). Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes. Parte I: Construcciones en general. INTI - CIRSOC.

INPRES-CIRSOC 103 (2018). Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes. Parte III: Construcciones de mampostería. INTI - CIRSOC.

IRAM 1694 (1989). Hormigón de cemento pórtland. Método de ensayo de la dureza superficial del hormigón endurecido mediante la determinación del número de rebote empleando el esclerómetro de resorte. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

IRAM 1683 (1990). Hormigón de cemento pórtland. Método para la determinación de la velocidad de pulsos ultrasónicos. Instituto Argentino de Normalización y Certificación.

Rincón, O; Carruyo, A.; Andrade, C; Helene, P.; y Díaz, I. (1998). Manual de inspección, evaluación y diagnóstico de corrosión en estructuras de hormigón armado. CYTED. ISBN 980-296-541-3.