

COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE PAREDES DE CONCRETO REFORZADAS CON ACERO DE ALTA RESISTENCIA

Expositor e investigador

Erick A. Burgos

Departamento de Mecánica Estructural

Las paredes estructurales de concreto reforzado se han utilizado como un mecanismo muy eficiente para resistir fuerzas en zonas con una sismicidad de moderada a elevada. Estos elementos estructurales tienen una excelente capacidad de resistir deformaciones inelásticas si son detalladas apropiadamente. Sin embargo, daños en paredes se han observado en sismos recientes: Maule, Chile, en 2010 (Saatcioglu y otros, 2013); Christchurch, Nueva Zelanda (Elwood, 2013); y Tohoku, Japón, en 2011 (Wallace, 2012). Para promover un adecuado comportamiento estructural, los códigos de diseño han limitado el rango de valores de las propiedades mecánicas de los materiales, principalmente en el acero de refuerzo (ACI, 2014). Así, para evitar fallas frágiles se ha limitado el esfuerzo de fluencia, la relación de esfuerzo de tensión a esfuerzo de fluencia y la deformación a la fractura. De esta manera, el acero de refuerzo recomendado en zona sísmica para resistir flexión se ha limitado a acero Grado 60 ($f_y=60$ ksi o 420 MPa). El acero de alta resistencia no había sido implementado en los códigos por la ausencia de evidencia experimental del comportamiento de elementos estructurales con este tipo de refuerzo. En años recientes, se han realizado esfuerzos para comprender el comportamiento de vigas (Travallali y otros, 2014) y columnas reforzadas (Rautenberg y otros, 2013) con acero de alta

resistencia. La presente investigación busca comprender el comportamiento de paredes de concreto reforzadas con acero de alta resistencia sometidas a carga cíclica reversible.

El estudio investiga los efectos de las propiedades mecánicas del acero de alta resistencia en el comportamiento sísmico de paredes de concreto reforzado. Las variables principales estudiadas fueron el esfuerzo de fluencia del acero (f_y) y la relación del esfuerzo último al esfuerzo de fluencia (f_t/f_y). Dos tipos de acero fueron utilizados: acero Grado 100 con una fluencia de 100 ksi (690 MPa) y Grado 120 con fluencia de 120 ksi (830 MPa). Fueron seleccionadas relaciones de esfuerzos nominales de 1.2 y 1.3. Adicionalmente, la influencia de la deformación unitaria longitudinal y la deformación a la fractura fueron analizadas. El comportamiento se midió a través del ensayo de dos paredes con una escala de 1:2, las cuales fueron sometidas a carga cíclica reversible para medir la capacidad de deformación. Para imponer la máxima demanda en el acero de refuerzo, la única carga axial aplicada fue el peso propio de la pared y el peso del equipo de aplicación de cargas.

Los especímenes ensayados consistieron en paredes en forma de T de 0.25 m de espesor, 2.50 m de largo y 7.5 m de alto, con lo cual se obtuvo una relación de aspecto de 3. La misma

relación de aspecto fue utilizada en la pared perpendicular. Elementos de borde con detallado especial fueron utilizados en los extremos de la pared (tres en total), cuyo refuerzo consistió en barras longitudinales D19 con estribos D10. El espaciamiento de los estribos en los elementos de borde fue de 10 cm, es decir, 4 veces el diámetro del refuerzo longitudinal. El refuerzo longitudinal y transversal en el alma de la pared consistió en barras D13. La Figura 1 muestra la geometría de las paredes ensayadas. La resistencia nominal a la compresión del concreto fue de 8 ksi (55 MPa). Tanto la geometría, como la cantidad de refuerzo y la capacidad a compresión del concreto se mantuvieron constantes en ambos especímenes. La Figura 2 muestra la configuración utilizada para los ensayos.

La carga lateral fue aplicada por medio de dos actuadores de 150 toneladas cada uno que

fueron instalados en la parte superior de la pared. El equipo para medir deformaciones fue instalado en la línea de acción de los actuadores, en la base de la pared y en la base del bloque de fundación para medir desplazamientos relativos entre la pared, el bloque y la losa de reacción. El campo de deformaciones en la zona de rótula plástica fue medido por medio de sensores ópticos instalados en una cara del alma y del patín de la pared. Asimismo, la deformación del acero fue medida por medio de strain gauges instalados en varios puntos del refuerzo.

Las paredes fueron diseñadas siguiendo los requisitos del ACI 318-14. Un comportamiento a flexión fue seleccionado a un esfuerzo cortante máximo de aproximadamente $0.33\sqrt{f_c}$. Sin embargo, la separación de los estribos en los elementos de borde fue menor a la especificada en dicho documento.

Figura 1. Geometría de los especímenes ensayados (Burgos, 2018).

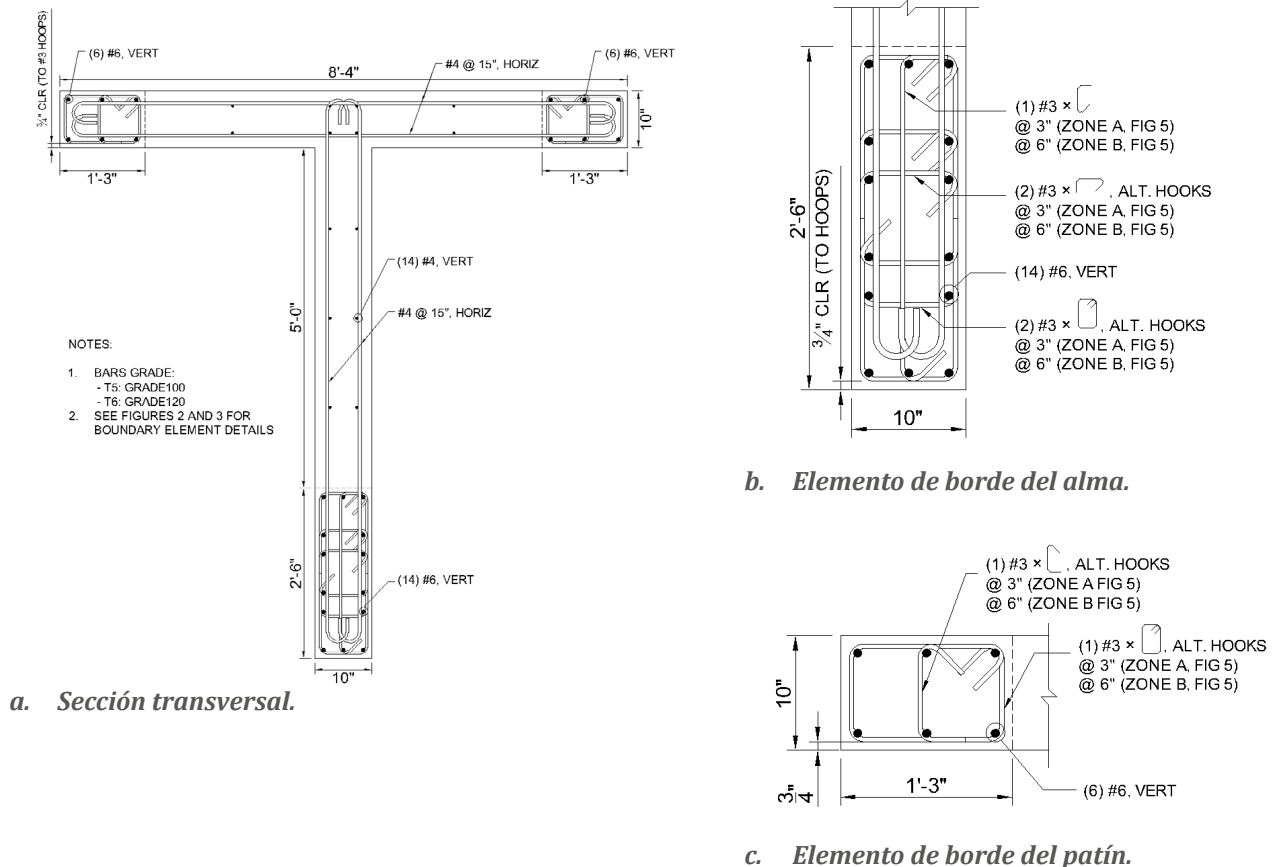
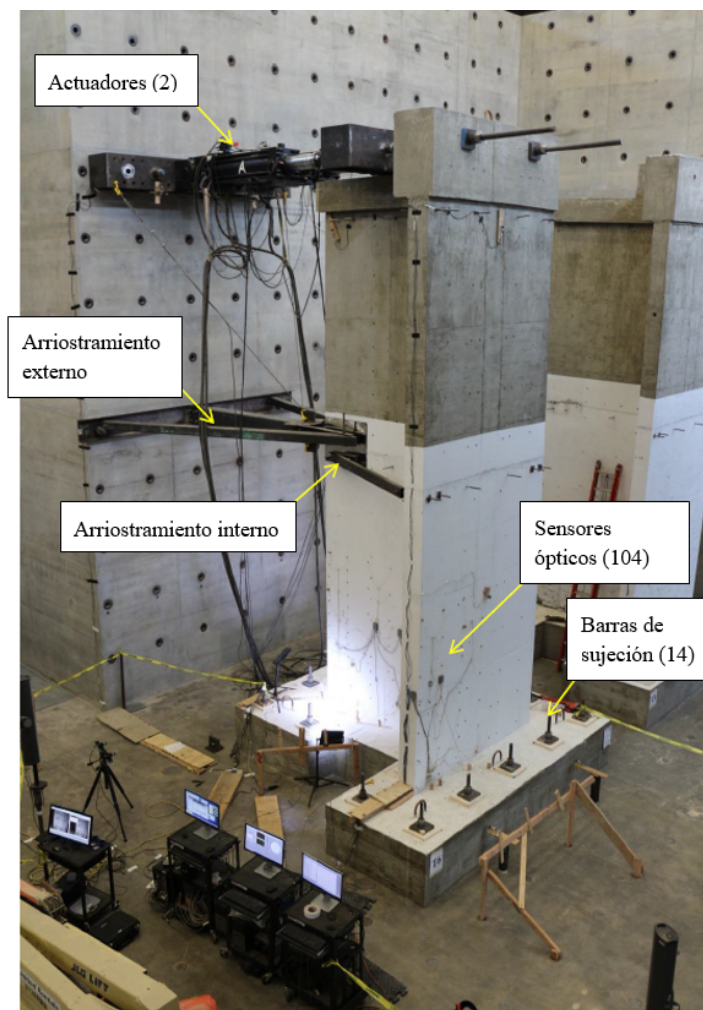
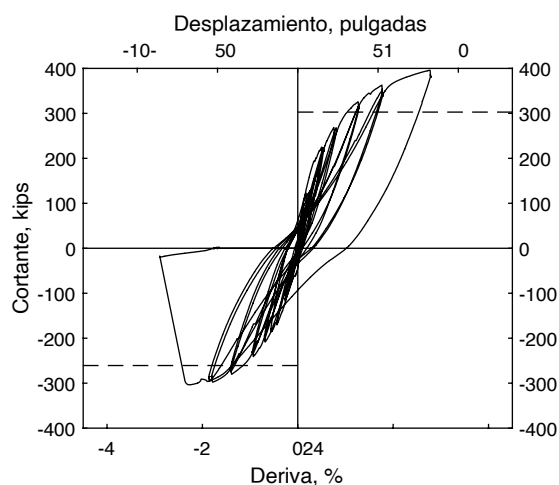


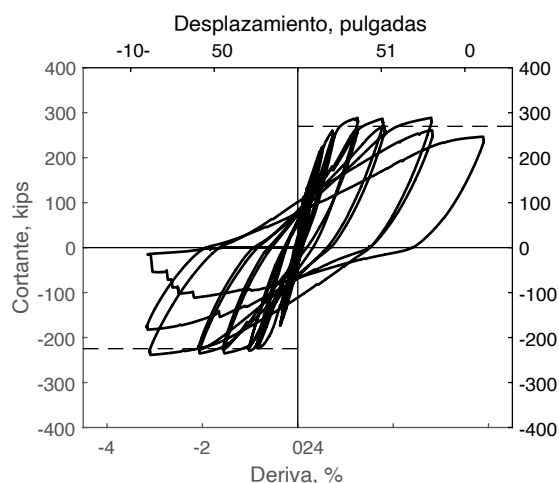
Figura 2. Configuración del ensayo y resultados obtenidos (Burgos, 2018).



a. Vista general del ensayo.



b. Pared Grado 100.



c. Pared Grado 120.

Los ensayos en el acero de refuerzo longitudinal de las paredes permitieron determinar las relaciones de esfuerzos de 1.18 y 1.32 para el acero Grado 100 y 120, respectivamente. Las últimas deformaciones medidas fueron de 7.1% y 5.3%, mientras que los valores de 9.7% y 8.6% fueron obtenidos para la deformación a la fractura.

Los resultados del ensayo de las paredes (ver Figura 2b y 2c) indicaron que la capacidad a deformación lateral de la pared con acero Grado 100 es similar a la deformación de paredes reforzadas con acero Grado 60, 3.7% (Huq y

otros, 2018). Por tanto, el uso de acero de alta resistencia permite obtener deformaciones laterales de hasta 3% si se cumplen las siguientes condiciones: a) la relación f_t/f_y del refuerzo longitudinal de flexión es más grande de 1.18, b) la deformación última del acero es más grande de 6%, y c) la deformación a la fractura es más grande de 10%.

Independientemente de la relación de esfuerzos de tensión-a-fluencia, el acero de alta resistencia con deformaciones últimas menores a 6% no puede desarrollar capacidades a deformación mayores a las obtenidas en paredes reforzadas

con acero convencional (Grado 60). Lo anterior se evidenció con los resultados obtenidos de ensayos de paredes reforzadas con acero con estas características. Las deformaciones de 2.3% fueron obtenidas en la pared reforzada con acero Grado 120 (relación de esfuerzos de 1.32) y de 1.8% en una pared Grado 100 ensayada por Huq y otros (2018), cuya relación de esfuerzos fue de 1.1.

A pesar de que el espaciamiento de los estribos en los elementos de borde fue de 4 veces el diámetro del refuerzo longitudinal, el pandeo lateral fue observado a deformaciones de 3.1% en la pared con acero Grado 100. Dicha deformación es ligeramente menor que la observada en la pared con refuerzo convencional. Entonces, debido a que la deformación última de la pared con refuerzo Grado 120 fue menor del 6%, las

varilla fracturaron a deformaciones menores sin pandeo lateral.

Los resultados anteriores junto con los obtenidos por Huq y otros (2018) permitieron realizar modificaciones al código de diseño de estructuras de concreto reforzado ACI 318 (ACI, 2019). En la nueva edición del código, el diseño de paredes estructurales ubicadas en regiones con una sismicidad alta, como El Salvador y la costa oeste de los Estados Unidos de América, el esfuerzo de fluencia se incrementó de 60 ksi a 100 ksi, tanto para el refuerzo longitudinal y transversal. Adicionalmente, se consideró que el espaciamiento máximo del acero de refuerzo de alta resistencia debe de ser igual a 4 veces el diámetro de la varilla de refuerzo longitudinal del elemento de borde.

Referencias bibliográficas

ACI 318. (2014). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (318R-14)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

ACI 318. (2019). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (318R-14)*. American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

Burgos E. A. (2018). *Earthquake-Resistant T-Shaped Concrete Walls with High-Strength Steel Bars*. (Disertación para optar al grado de Doctor en Filosofía). The University of Kansas, Lawrence, Kansas, EE.UU.

Elwood K. J. (2013). Performance of Concrete Buildings in the 22 February 2011 Christchurch Earthquake and Implications for Canadian Codes. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40 (3), pp. 759-776.

Huq M. S., Weber-Kamin A., Ameen S., Lequesne R., and Lepage A. (2018). *High-Strength Steel Bars in Earthquake-Resistant T-Shaped Concrete Walls. SM Report N° 128*. The University of Kansas, Center for Research Inc., Lawrence, Kansas, EE.UU.

Rautenberg J. M., Pujol S., Travallali H., y Lepage A. (2013). Drift Capacity of Concrete Columns Reinforced with High-Strength Steel. *ACI Structural Journal*, 110 (2), pp. 307-317.

Saatcioglu M., Palermo D., Ghobarah A., Mitchell D., Simpson R., Adebar P., Tremblay R., Ventura C., and Hong H. (2013). Performance of Reinforced Concrete Buildings During the 27 February 2010, Maule (Chile). Earthquake. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 40 (8), pp. 693-710.

Travallali H., Lepage A., Rautenberg J. M. y Pujol S. (2014), *Concrete Beams Reinforced with High-Strength Steel Subjected to Displacement Reversals*. *ACI Structural Journal*, 111 (5), pp. 1,037-1,047.

Wallace J. W. (2012). Behavior, Design, and Modeling of Structural Walls and Coupling Beams- Lessons from Recent Laboratory Tests and Earthquakes. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6 (1), pp. 3-18.