

COMPORTAMIENTO A FUERZA CORTANTE DE MUROS DELGADOS DE CONCRETO REFORZADOS EN SU ZONA CENTRAL CON BARRAS DE ACERO, FIBRA DE POLIPROPILENO Y CON FIBRA DE ACERO

Ángel San Bartolomé¹ y Rafael Ríos¹

RESUMEN

Los muros delgados de concreto armado presentan el problema de congestión del refuerzo que, por lo general, conduce a la formación de cangrejeras y segregación del concreto. Para controlar el problema señalado, se pensó en la posibilidad de reemplazar en la zona central del muro a las barras de refuerzo por fibra de polipropileno y metálica. Para verificar la hipótesis planteada, se efectuaron ensayos de carga lateral cíclica en muros reforzados por corte con los tres tipos de refuerzos indicados, mientras que el refuerzo dúctil por flexión se mantuvo constante.

Palabras claves: concreto armado, fibra de polipropileno, fibra de acero, sismo, muro, ensayo.

ABSTRACT

The thin reinforced concrete walls present the problem of reinforcement congestion that usually leads to the formation of voids and segregation of the concrete. To control the problem described, it was considered the possibility of replacing the conventional bars mesh located at the central part of the wall for polypropylene and metallic fiber. To verify the hypothesis, tests were conducted of cyclic lateral loading applied to shear walls with the three types of reinforcement indicated, while ductile bending reinforcement remained constant.

Keywords: reinforced concrete, polypropylene fiber, steel fiber, earthquake, wall, test.

RESUMO

Os muros estreitos de concreto armado apresentam o problema de congestão do reforço que, em geral, conduz à formação de rachaduras e segregação do concreto. Para controlar o problema assinalado, pensou-se na possibilidade de substituir na zona central do muro as barras de reforço por fibra de polipropileno e metálica. Com a intenção de verificar a hipótese defendida, foram feitos ensaios (testes) de carga lateral cíclica em muros reforçados por corte com os três tipos de reforços indicados, enquanto que o reforço dúctil por flexão manteve-se constante.

Palavras-chave: concreto armado, fibra de polipropileno, fibra de aço, sismo, muro, ensaio (teste).

INTRODUCCIÓN

En Lima abundan los edificios estructurados por muros delgados de concreto armado, donde por el pequeño espesor (10 a 12 cm) es imposible confinar sus extremos con estribos a corto espaciamiento, por lo que a estos elementos se les denomina "Muros de Ductilidad Limitada". En adición, el pequeño espesor de estos muros crea congestión del refuerzo y de tuberías, que a su vez conduce a una mala compactación del concreto, generándose muchas veces cangrejeras y segregación del concreto (Fig. 1), que son solo resanadas superficialmente. Otro defecto que presentan estos muros es la formación de fisuras por contracción de secado del concreto.

Los defectos mencionados en el párrafo anterior y que deben ser reparados adecuadamente involucran costo, tiempo y reducción de resistencia y rigidez sísmica, pero podrían controlarse tratando de descongestionar al muro. Por ejemplo,

⁽¹⁾ Departamento de Ingeniería. Pontifícia Universidad Católica del Perú, Av. Universitaria, Cdra.18, San Miguel, Lima, Perú.
E-mail: asanbar@pucp.edu.pe, ralphrios@hotmail.com

mediante la hipótesis de reemplazar a la malla central de refuerzo convencional por fibra de polipropileno o metálica; manteniéndose constante al refuerzo vertical dúctil por flexión, alojado en los extremos del muro y adicionando espigas de acero dúctil distribuidas en la base central del muro para evitar la falla por deslizamiento.



Fig. 1: Defectos ocasionados por la congestión de refuerzo y conductos en muros delgados: cangrejera y segregación del concreto.

Bajo el contexto señalado y a fin de verificar la hipótesis planteada, se construyeron tres muros empleándose los refuerzos indicados en el párrafo anterior, para luego ensayarlos en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP a carga lateral cíclica y de esta manera observar, a nivel de resistencia y ductilidad, si era o no posible reemplazar a la malla central de refuerzo convencional por fibra de polipropileno o de acero.

ANTECEDENTES

Con San Bartolomé *et al.* (2007) se analizó el efecto de la fibra metálica Dramix sobre la resistencia a tracción diagonal de muretes de concreto sujetos a compresión diagonal (Fig. 2). Estos muretes tuvieron un problema de falla local en una de sus esquinas comprimidas después que se produjo el agrietamiento diagonal. No obstante, pudo observarse que los muretes que carecían de refuerzo fallaban en forma explosiva, en cambio, los muretes reforzados con fibra metálica, si bien no aumentaron su resistencia a corte puro, incrementaron su ductilidad.



Fig. 2: Murete sin refuerzo (izquierda) y reforzado con fibra metálica (derecha).
San Bartolomé *et al.* (2007).

1. DESCRIPCIÓN DE LOS MUROS Y NOMENCLATURA

Los tres muros analizados fueron de forma cuadrada, de 1.2 m de lado y 8 cm de espesor. Se varió sólo el refuerzo localizado en la zona central:

- Muro MAC: reforzado con Malla de Acero Convencional Dúctil.
- Muro MFP: reforzado con Fibra de Polipropileno TUF-STRAND SF.
- Muro MFA: reforzado con Fibra de Acero Dramix.

El muro reforzado con acero convencional (MAC), sirvió como patrón de comparación para analizar la influencia en la resistencia y ductilidad a carga lateral, respecto a los reforzados con fibra de polipropileno y de acero, en una falla intencionalmente provocada por fuerza cortante.

La cuantía de la fibra de polipropileno utilizada (11.5 kg/m^3 de concreto, [TUF-STRAND SF]), fue la máxima permitida por el fabricante, mientras que la cuantía de la fibra de acero correspondió a un valor promedio entre el mínimo y el máximo especificado por el fabricante (oscila entre 20 y 50 kg/m^3 de concreto, [Fibra de acero Dramix]). En la Tabla 1 y en la Fig. 3 se indica el refuerzo empleado.

Tabla 1: Refuerzo utilizado en los tres muros.

Muro	MAC	MFP	MFA
Refuerzo vertical en los extremos	2 ϕ 5/8"	2 ϕ 5/8"	2 ϕ 5/8"
Espigas en la base	---	1 ϕ 3/8" @ 25 cm	1 ϕ 3/8" @ 25 cm
Refuerzo en la zona central	Vertical: 1 ϕ 3/8" @ 25 cm Horizontal: 1 ϕ 8 mm @ 25 cm	Fibra de Polipropileno 11.5 kg/m^3	Fibra de Acero 35 kg/m^3
Viga solera	15 x 20 cm reforzada con 4 ϕ 1/2", estribos: ϕ 1/4", 1 @ 5, 2 @ 10, r @ 20 cm		

El refuerzo vertical colocado en los extremos (2 ϕ 5/8") de los tres muros es importante en magnitud, mientras que el refuerzo horizontal utilizado en el muro MAC corresponde a la cuantía mínima reglamentaria (0.0025, [Norma Técnica de Edificaciones E.060]). Esto se hizo intencionalmente con el objeto de provocar en los muros una falla por corte, ya que se pretendía analizar al refuerzo de la zona central.

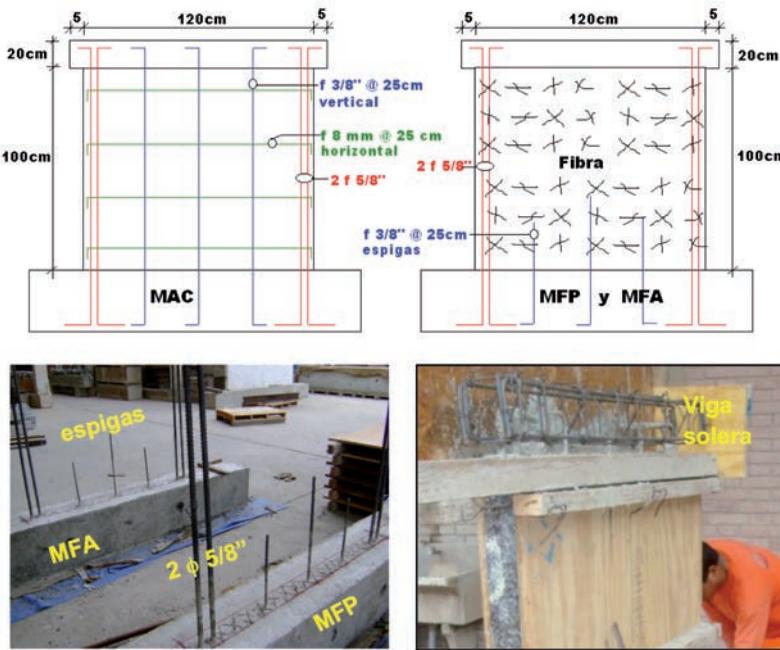


Fig. 3: Refuerzos utilizados.

1.1 Propiedades del Muro Patrón MAC

Para evaluar teóricamente al muro MAC, se hizo uso de los siguientes parámetros:

$f'c$ = resistencia a compresión del concreto = 259 kg/cm² (ensayo de probetas).

fy = esfuerzo de fluencia del refuerzo dúctil = 4200 kg/cm².

E = módulo de elasticidad del concreto = $15000 \sqrt{f'c} = 241000$ kg/cm² [Norma Técnica de Edificaciones E.060].

G = módulo de corte del concreto = $E / 2.3 = 105000$ kg/cm² [Norma Técnica de Edificaciones E.060].

L = longitud del muro = 120 cm.

h = altura desde la base del muro = 120 cm.

t = espesor del muro = 8 cm.

I = momento de Inercia de la sección transversal = $t L^3 / 12 = 1152000$ cm⁴.

f = factor de forma de la sección rectangular = 1.2

A = área de la sección transversal = $t L = 960$ cm².

M = Momento flector en la base del muro = $V h$.

y = distancia desde el centroide del muro a la fibra extrema en tracción = $\frac{1}{2} L = 60$ cm.

1.1.1 Rigidez lateral (K)

La rigidez lateral elástica se calculó con la siguiente fórmula, válida para muros en voladizo:

$$K = \frac{E}{\frac{h^3}{3I} + \frac{f h E}{G A}} \quad (1)$$

Reemplazando valores resulta: $K = 28520$ kg/mm

1.1.2 Resistencia a la fisura de tracción por flexión (Vf)

Esta fisura se presenta en la base del muro cuando el esfuerzo normal actuante (σ) se iguala a la resistencia a tracción por flexión aportada por el concreto ($2\sqrt{f'c}$, [Norma Técnica de Edificaciones E.060]).

$$\sigma = M y / I = (Vf h) y / I = 2\sqrt{f'c} \quad (2)$$

Con lo cual: $Vf = 5150$ kg

1.1.3 Resistencia al agrietamiento diagonal (Vc)

La resistencia que ofrece el concreto a la fisura diagonal (Vc , [Norma Técnica de Edificaciones E.060]) está dada por:

$$Vc = 0.53 \sqrt{f'c} L t \quad (3)$$

De esta manera: $Vc = 8189$ kg

1.1.4 Resistencia máxima a corte (Vm)

La resistencia máxima a fuerza cortante del muro patrón, se calculó sumando el aporte del concreto ($Vc = 8189$ kg) y la resistencia proporcionada por el refuerzo horizontal (Vs , [Norma Técnica de Edificaciones E.060]):

$$Vm = Vc + Vs = Vc + As fy d / s \quad (4)$$

Donde:

As = área de acero horizontal ($\phi 8$ mm) = 0.5 cm²

d = peralte efectivo del muro = $0.8 L = 96$ cm [Norma Técnica de Edificaciones E.060].

s = espaciamiento entre barras horizontales = 25 cm

Con lo cual, reemplazando valores se obtiene: $Vm = 16253$ kg

1.1.5 Resistencia máxima a flexión (Vn)

Esta resistencia fue calculada despreciando el peso propio del muro, considerando que las barras extremas ($2 \phi 5/8'' \rightarrow As = 4$ cm²) entraban en fluencia y que el refuerzo vertical alojado en el alma ($1 \phi 3/8'' @ 25$ cm) se destinaba a evitar la falla por deslizamiento. Con ello, el momento nominal de la sección resulta: $Mn = As fy (L - \frac{1}{2} a) = 1851864$ kg-cm.

En la base del muro el momento es: $Mn = Vn h$, con lo cual se obtiene: $Vn = 15432$ kg.

1.1.6 Predicción de la forma de falla del muro patrón MAC

De acuerdo a las resistencias evaluadas, se concluye que primeramente se presentarán fisuras de tracción por flexión en la base del muro, para una fuerza de 5150 kg, luego se presentarán fisuras diagonales por fuerza cortante, para una fuerza de 8189 kg. Finalmente, el muro tendrá una falla por fuerza cortante, en vista que su resistencia máxima a corte (16253 kg) si bien es ligeramente mayor que la resistencia máxima a flexión (15432 kg), es alcanzada paulatinamente con el incremento de los desplazamientos laterales, mientras que el refuerzo vertical extremo trabaja prematuramente desde antes que se forme la primera fisura de tracción por flexión.

2. CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES

2.1 Concreto

Debido al delgado espesor de los muros (8 cm), para el diseño de la mezcla de concreto se consideró un revestimiento de 4.5" (Fig. 4).



Fig. 4: Revestimiento del concreto con fibra de polipropileno (izquierda) y con fibra de acero (derecha).

Se fabricaron dos probetas estándar por cada muro, siguiendo las especificaciones ASTM C-172. Estas probetas se ensayaron a compresión a los 28 días de edad, según la norma ASTM C-39. Los resultados promedios aparecen en la Tabla 2.

Tabla 2: Resistencia a compresión y revestimiento del concreto.

Concreto del Muro:	f'c (kg/cm ²)	Revestimiento (cm)
MAC	259	8.9
MFP (con fibra de polipropileno)	248	11.4
MFA (con fibra de acero)	253	10.9

En la Tabla 2 puede notarse que la resistencia a compresión ($f'c$) es prácticamente independiente de la fibra utilizada, ya que para el concreto de los tres muros se obtuvo resultados similares.

Al desencofrar a los muros se observaron en su base pequeñas cangrejeras y segregación de agregados (Fig. 11), que fueron reparadas picando superficialmente la zona afectada para después rellenarla con mortero 1:3 con epóxico. No se produjeron fisuras por contracción de secado. El proceso de curado del concreto fue constante, se tapó a los muros durante 28 días con mantas húmedas (Fig. 11) para evitar la pérdida de agua por evaporación y proceso de fragua.

2.2 Acero de refuerzo

Se utilizó barras de acero corrugado, de Grado 60 ($f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$).

2.3 Fibra de Polipropileno TUF-STRAND SF

El polipropileno [TUF-STRAND SF] es un polímero termoplástico parcialmente cristalino, que se obtiene de la polymerización del propileno. Es usado en una gran variedad de elementos que van desde empaques para alimentos, tejidos, hasta componentes del concreto, como es el caso de la fibra de polipropileno comercializada por la empresa Química Suiza, S.A. Tiene una resistencia nominal de tensión de 600 a 650 MPa, un módulo de elasticidad de 9.5 Gpa y una longitud de fibra de 50 mm (Fig. 5). La fibra TUF-STRAND SF es elaborada por The Euclid Chemical Company y se realiza bajo el Sistema de Calidad Certificado ISO 9001:2000 UL A 12147.

2.4 Fibra de Acero Dramix

La fibra de acero Dramix (Fig. 5), comercializada por la empresa Prodac, está hecha de barras de acero con alta resistencia a la tracción. Tiene una resistencia nominal mínima de tensión igual a 1100 MPa y medidas de 35 mm de longitud y 0.55 mm de diámetro. La fabricación de la fibra de acero Dramix, se hace bajo las especificaciones de la Norma ASTM A820. Dicho proceso consta de la unión de largas y finas fibras de acero, fijadas unas a otras (14500 fibras/kg), formando paquetes compactos, los cuales al momento de ser mezclados con el concreto, se separan al reaccionar con el agua, extendiéndose homogéneamente sobre la mezcla. Los ganchos en los extremos aseguran su anclaje en el concreto [4].



Fig.5: Fibra de polipropileno (izquierda) y fibra de acero (derecha).

3. ENSAYO DE CARGA LATERAL CÍCLICA

3.1 Técnica de ensayo

El ensayo de carga lateral cíclica (Fig. 6) permite simular las cargas laterales que se generan en un sismo (V) y estudiar el comportamiento que una estructura determinada tendrá ante diferentes fuerzas y desplazamiento aplicados (D). Durante el ensayo, la estructura se desplaza lateralmente en ambos sentidos muy lentamente, de acuerdo a desplazamientos prefijados (fases del ensayo). El ensayo de los muros se realizó a una velocidad de un ciclo en 4 minutos, aplicando un número determinado de ciclos hasta alcanzar la estabilización de los lazos histeréticos V-D. En la Tabla 3 se indican las fases del ensayo y la cantidad de ciclos aplicados, debiéndose indicar que los muros con fibra MFP y MFA sólo soportaron hasta la fase 5. La deriva fue obtenida dividiendo al desplazamiento lateral entre la altura del muro ($h = 120 \text{ cm}$).

Tabla 3: Fases del ensayo de carga lateral cíclica.

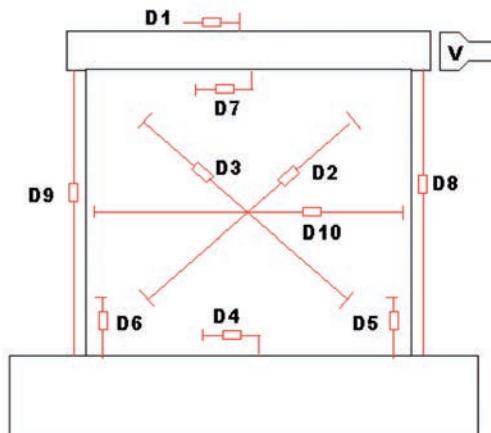
Fase	1	2	3	4	5	6	7
D (mm)	0.5	1.0	2.0	4.0	6.5	9.0	11.5
Deriva	0.00042	0.00083	0.00167	0.00333	0.0054	0.0075	0.00958
No. Ciclos	2	2	3	3	3	3	3
Observación	Se aplicó en muros MAC, MFP y MFA						Aplicadas en MAC

**Fig. 6: Ensayo de carga lateral cíclica y sistema de adquisición de datos.**

3.2 Instrumentación

Para poder registrar los desplazamientos relativos entre distintos puntos de los muros, se instalaron 10 sensores LVDT, cada uno de ellos ubicados en zonas estratégicas (Fig. 7). Las funciones de los LVDT fueron:

- D1 (o D): Controlar los desplazamientos laterales.
- D2 y D3: Medir deformaciones diagonales.
- D4: Detectar un posible deslizamiento entre el muro y la cimentación.
- D5 y D6: Medir deformaciones verticales en los talones del muro.
- D7: Detectar un posible deslizamiento entre el muro y la viga solera.
- D8 y D9: Medir deformaciones axiales en los extremos del muro.
- D10: Medir el grosor de las grietas acumuladas en la zona central del muro.

**Fig. 7: Instrumentación usada en los 3 muros.**

3.3 Comportamiento cualitativo de los muros

La Tabla 4 y las Fig. 8 y 9 resumen el comportamiento de los tres muros en cada una de las fases del ensayo. En adición, pudo predecirse la forma de falla indicada en el acápite 2.1.6.

Tabla 4: Comportamiento de los muros.

Muro	MAC	MFP	MFA
Fase 1	Sin fisuras (comportamiento elástico).		
Fase 2	Primera grieta de tracción por flexión localizada en la parte baja del muro.		
Fase 3	Agrietamiento diagonal del concreto, inicio de la falla por corte.		
Fase 4	Aparición de nuevas grietas. Sin cambio sustancial.	Ancho de la grieta diagonal se mantiene en 2 mm, aparición de nuevas grietas.	Inicio de la trituración del talón derecho. Ancho de la grieta diagonal 2.5 mm.
Fase 5	Ancho de la grieta diagonal 1.5 mm.	Trituración de los talones, pérdida sustancial de resistencia. Ancho de grieta 8 mm en MFP y 10 mm en MFA. Fin del ensayo.	
Fase 6	Trituración de los talones, inicio de pérdida de resistencia. Ancho de la grieta diagonal 3 mm.		---
Fase 7	Falla por alabeo. Fin del ensayo.		---

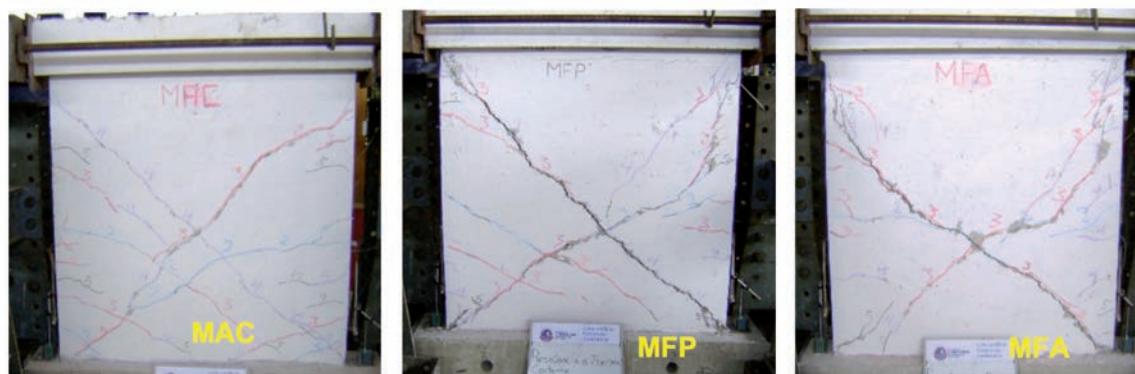


Fig. 8: Estado de los 3 muros al finalizar la fase 5 del ensayo (deriva 0.0054, deriva permitida 0.005). En los muros con fibra MFP y MFA finalizó el ensayo en esta fase, mientras que en el muro MAC se aplicaron 2 fases adicionales.



Fig. 9: Fase 7 en el muro MAC. Falla final por alabeo.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y COMPARACIÓN CON LOS TEÓRICOS

4.1 Rígidez lateral inicial (K)

Para obtener experimentalmente la rigidez lateral inicial (K), se utilizó la pendiente de la línea de tendencia correspondiente a los primeros puntos de la gráfica $V-D$ en el primer ciclo de la primera fase (Fig. 10), donde el comportamiento fue elástico sin que exista ninguna fisura. Los resultados aparecen en la Tabla 5, donde se observa que los tres muros presentan una rigidez bastante baja en relación con el valor teórico, causada posiblemente por las pequeñas cangrejeras y segregación del concreto (Fig. 11) localizadas en la base de los muros, pese a que se habían reparado superficialmente (acápite 3.1). También se observa que los muros con fibra presentan una rigidez lateral 10% menor que la del muro patrón MAC, esto podría atribuirse a que la fibra posiblemente disminuyó la densidad del concreto, reduciéndose a su vez el módulo de elasticidad, a pesar que la resistencia a compresión de las probetas (f'_c , Tabla 2) no varió.

Tabla 5: Rígidez lateral inicial K (kg/mm), teórica y experimental.

Valor teórico	Muro MAC	Muro MFP	Muro MFA
28520	8554	7832	7647

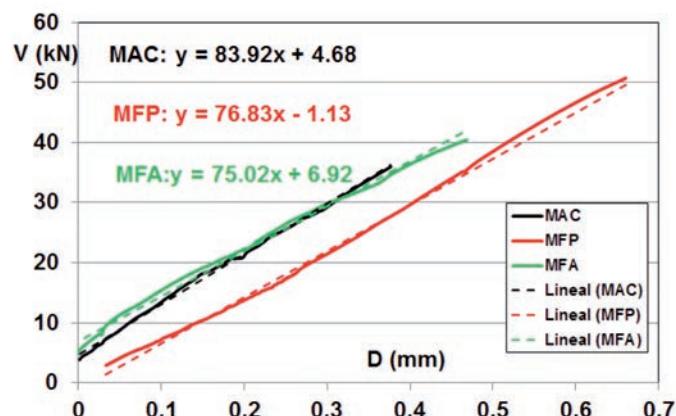


Fig. 10: Fase 1 – Ciclo 1. Muros MAC, MFP y MFA. Líneas de tendencia.



Fig. 11: Fuga de lechada de cemento en la base del muro, por falta de hermeticidad del encofrado, y pequeñas cangrejeras con segregación de agregados.

4.2 Gráfica V-D

En la Fig. 12 se presenta las gráficas V-D de los 3 muros hechas a la misma escala con fines comparativos. Para el muro MAC se nota que a medida que se va incrementando el desplazamiento lateral la carga lateral también se incrementa, esto se debe a que el refuerzo horizontal proporciona resistencia paulatinamente conforme se abren más las grietas diagonales; también se nota la pérdida de rigidez lateral conforme se incrementan los desplazamientos laterales, lo que se debe a la continua formación de fisuras que debilitan poco a poco al muro. Para los muros con fibra se aprecia que después del agrietamiento diagonal prácticamente no hay incremento de resistencia, sin embargo, la pérdida de resistencia se produce un poco después de haber pasado la deriva reglamentaria, que para estos muros es 0.005 [Norma Técnica de Edificaciones E.030], con lo cual, la fibra proporcionó ductilidad y muy poca resistencia a fuerza cortante.

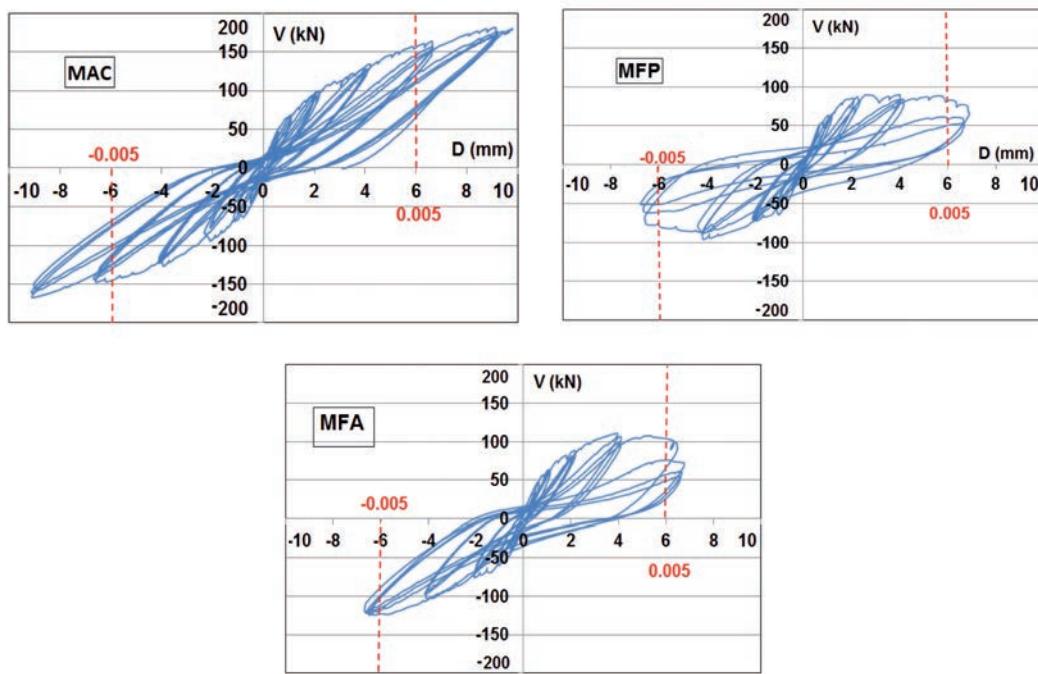


Fig. 12: Historia completa V-D de los tres muros.

4.3 Envolvente V-D

En la Fig. 13 aparecen las envolventes V-D de los tres especímenes. Estas envolventes fueron obtenidas graficando los puntos de carga máxima del primer ciclo de cada una de las fases del ensayo. Hasta un desplazamiento de 2 mm, asociado a la fase 3 donde se formó la grieta diagonal, los 3 muros tienen un comportamiento similar. Posteriormente, en el rango inelástico el muro MAC (con acero convencional) tuvo mejor comportamiento que los muros reforzados con fibra. En MAC se observa que después de haberse agrietado diagonalmente, el acero horizontal empieza a aportar resistencia, lo cual no ocurre en los muros reforzados con fibra, donde la resistencia (ligeramente a favor de MFA) se mantiene prácticamente constante hasta que ocurre su degradación para $D = 6.5$ mm, asociada a la máxima deriva permitida por [Norma Técnica de Edificaciones E.030]: 0.005.

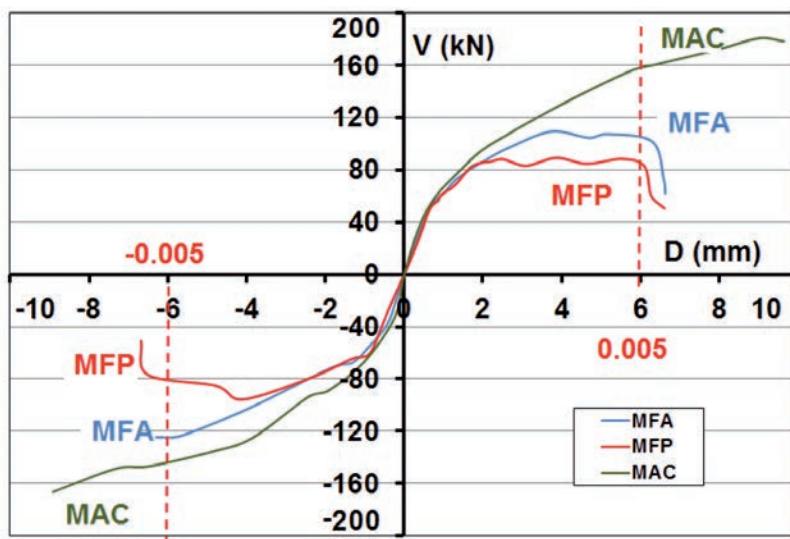


Fig. 13: Envolvente V-D de los tres muros.

4.4 Comparación de resistencias teóricas y experimentales

Debe señalarse que las resistencias a la primera fisura de tracción por flexión y al agrietamiento diagonal del concreto, deberían ser constantes para los tres muros, en vista que la fibra y las barras se activan significativamente después que se presentan las fisuras respectivas.

Los instantes en los que se originaron las fisuras en cada etapa del ensayo y en cada muro, fueron registrados durante el experimento, a medida que fueron apareciendo las fisuras respectivas; luego, recurriendo a los datos almacenados por el computador, se determinaron los resultados experimentales que aparecen en la Tabla 6, donde se ha agregado los resultados teóricos. La nomenclatura utilizada es: V_f = resistencia a la primera fisura de tracción por flexión, V_c = resistencia a fuerza cortante aportada por el concreto, y, V_m = resistencia máxima a fuerza cortante (el valor teórico no contempla la incursión del acero en su zona de endurecimiento).

Tabla 6: Resumen de resistencias teóricas y experimentales.

Resultados	Teóricos		Experimentales		
	Muro	MAC	MAC	MFP	MFA
V_f (kg)		5150	6673	5332	5498
V_c (kg)		8189	8950	8076	7395
V_m (kg)		16253	18580	9820	12700

Con base en los valores de la Tabla 6 se puede decir lo siguiente: en los tres muros, las resistencias a la primera fisura de tracción por flexión (V_f) y de tracción diagonal (V_c), fueron prácticamente similares a los valores teóricos correspondientes. Esto no ocurrió con la resistencia máxima (V_m), donde se nota claramente en el muro MAC el aporte de resistencia a corte proporcionado por el refuerzo horizontal, después que se produjo la primera fisura de tracción diagonal, llegándose a alcanzar un valor experimental mayor que el teórico, por la incursión del acero horizontal en su zona de endurecimiento. En cambio, el aporte de resistencia a corte dado por la fibra es poco significativo; sin embargo, pese a ello, la fibra proporcionó ductilidad y los muros MFP y MFA pudieron soportar desde la fase 3 ($D = 2$ mm), donde se inició la falla por corte, hasta la fase 5 ($D = 6.5$ mm), donde se inició la degradación de resistencia.

5. GROSOR DE GRIETAS

Los tres muros fueron del tipo voladizo, por lo que se esperaba que los esfuerzos ocasionados por el momento flector fueran mayores en el empotramiento, con lo cual, deberían producirse grietas de tracción por flexión en la cercanía de la base y que corran desde la fibra extrema en tracción hacia el centro del muro. Estas grietas se produjeron durante la fase 2, pero en el desarrollo posterior del experimento carecieron de importancia, en vista que la falla no fue por flexión.

Seguidamente, tal como se predijo (acápite 2.1.6), durante la fase 3 del experimento se produjeron las fisuras diagonales por fuerza cortante. Estas grietas fueron importantes y conforme aumentaban los desplazamientos laterales, su grosor se incrementaba (falla por corte).

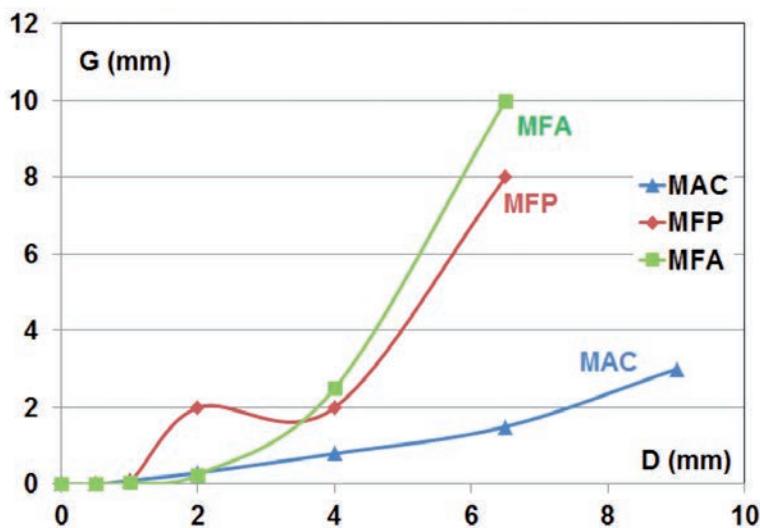
En la Tabla 7 se presenta un resumen de los grosores máximos (G) que tuvieron las principales fisuras observadas en cada una de las fases aplicadas a los muros. Estos valores fueron graficados en la Fig. 15, donde se nota el mejor comportamiento que tuvo el muro con acero convencional MAC sobre los reforzados con fibra. Cabe indicar que el grosor máximo de grieta se midió con un “comparador de grietas” (Fig.14) y posteriormente, cuando el ancho de grieta fue muy grande para este instrumento, se utilizó una cinta métrica.



Fig. 14: Medición del grosor máximo de grieta (G) con el comparador y con cinta métrica.

Tabla 7: Ancho máximo de grietas (G) en los 3 muros.

Muro	MAC (mm)	MFP (mm)	MFA (mm)
Fase 1	0.00	0.00	0.00
Fase 2	0.10	0.07	0.05
Fase 3	0.30	2.00	0.25
Fase 4	0.80	2.00	2.50
Fase 5	1.50	8.00	10.00
Fase 6	3.00	-	-
Fase 7	Falla Total	-	-

**Fig. 15: Variación del grosor máximo de grietas (G) con el desplazamiento lateral (D) en los 3 muros ensayados.**

6. CONCLUSIONES

- Los muros delgados presentan problemas en el concreto (cangrejeras y segregación) difíciles de reparar adecuadamente. Estos problemas se deben a la mala compactación del concreto por la alta congestión de refuerzo, por lo que en este proyecto se trató de reemplazar a las barras de la malla central por fibra, que además disminuye el problema de fisuración por contracción de secado, pero la resistencia máxima a fuerza cortante quedó afectada.
- Las pequeñas cangrejeras y segregación de agregados presentadas en la base de los especímenes de este proyecto, se debieron a la falta de hermeticidad del encofrado y no a la congestión del refuerzo. Antes de efectuarse el experimento, estos defectos se repararon superficialmente, como a veces se hace en obra, pero la rigidez lateral inicial quedó afectada.
- En este proyecto se usó fibra de polipropileno y de acero, que si bien mantuvieron constante la resistencia a compresión del concreto ($f'c$), causaron un concreto menos denso que dio lugar a un decremento del orden de 10% en el módulo de elasticidad y en la rigidez lateral. Se requiere de más estudios experimentales para cuantificar este decremento.
- Parámetros como la resistencia a la primera fisura de tracción por flexión y la resistencia aportada por el concreto a la primera fisura diagonal, no fueron afectados por la presencia de fibra en el concreto (Fig.17). Esto se debe a que el refuerzo respectivo (barras o fibra) se activa significativamente después que se producen las fisuras mencionadas.

- En el muro con refuerzo dúctil convencional (MAC), la resistencia a corte fue incrementándose paulatinamente conforme aumentó el grosor de las grietas diagonales, notándose que las barras horizontales proporcionaban resistencia a fuerza cortante después de ocurrir el primer agrietamiento diagonal (Fig.17), llegando a trabajar incluso en su zona de endurecimiento.
- En los muros reforzados con fibra en su región central (MFP y MFA), el incremento de resistencia a corte fue mínimo después del agrietamiento diagonal, con una ligera ventaja de la fibra de acero sobre la de polipropileno (Fig. 16 y 17). Sin embargo, la fibra evitó la falla frágil y proporcionó ductilidad hasta alcanzarse la deriva máxima reglamentaria (0.005, [5]), donde poco después sobrevino una degradación importante de resistencia.
- Se pudo predecir el orden en que se formaron las fisuras, hasta alcanzar la falla final. No hubo deslizamiento, lo que demuestra la efectividad de las espigas usadas en MFP y MFA.
- La solución propuesta de usar fibra en reemplazo del refuerzo central convencional, podría aplicarse en edificaciones reales que demuestren tener en sus muros una fuerza cortante última igual o menor que la resistencia a corte aportada por el concreto (V_c). El diseño por corte se haría sin contemplar el aporte de resistencia que levemente proporciona la fibra.

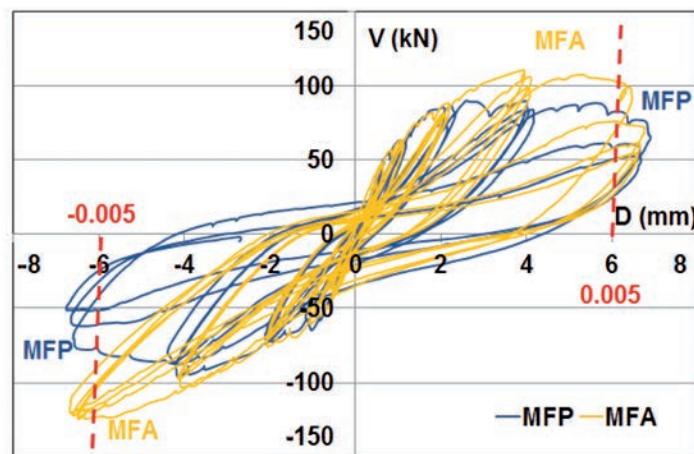


Fig. 16: Comparación de muros con fibra de polipropileno (MFP) y de acero (MFA). Historia completa V-D.

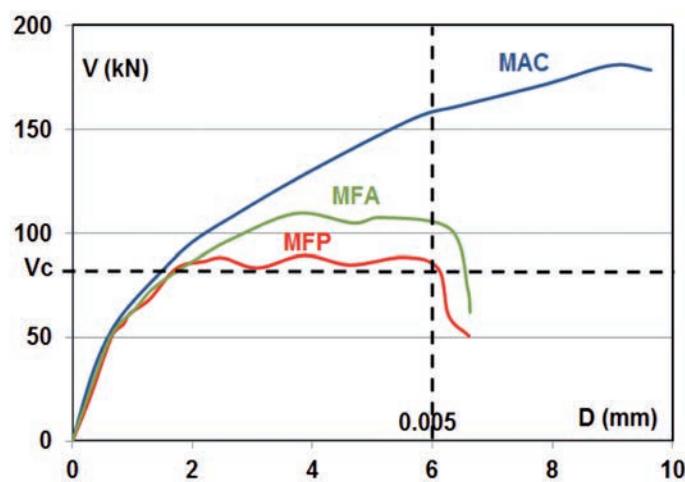


Fig. 17: Envolvente V-D, rama positiva. V_c = resistencia teórica a fuerza cortante aportada por el concreto.

AGRADECIMIENTO

Los autores desean expresar su agradecimiento al alumno PUCP Luis Rivas, por su colaboración prestada en la primera parte del proyecto, a Química Suiza y a Prodac S.A., por la donación de la fibra de polipropileno y de acero, respectivamente, así como al Laboratorio de Estructuras Antisísmica de la PUCP por la prestación de personal técnico y equipos de ensayos.

REFERENCIAS

Fibra de acero Dramix, [Consultado el 3 de febrero de 2013] Disponible en:
<http://idealalambrec.bekaert.com/es-MX/Construccion/ReforzamientoHormigon/Dramix.aspx>.

Norma Técnica de Edificaciones E.060, Concreto Armado (2006), *Reglamento Nacional de Edificaciones*, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO, Lima, Perú.

Norma Técnica de Edificaciones E.030, Diseño Sismorresistente (2006), *Reglamento Nacional de Edificaciones*, Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, y SENCICO, Lima, Perú.

San Bartolomé, A., Muñoz, A. y Madalengoitia, F., (2007), “Comportamiento a fuerza cortante de muretes de concreto reforzado con malla electro soldada, acero dúctil y fibra metálica”. *Blog de investigaciones en concreto armado*: [Consultado el 15 de enero de 2013] Disponible en:<http://blog.pucp.edu.pe/blog/concretoarmado>.

TUF-STRAND SF macrofibra sintética, *The Euclid Chemical Company*, [Consultado el 30 de febrero de 2013] Disponible en: <http://www.eucomex.com.mx/PDF/Tuf%20Strand.pdf>.