



INFLUENCIA DE FIBRAS DE POLIPROPILENO EN TENACIDAD Y CONTROL DE FISURACIÓN DE MEZCLAS DE TIERRA

Gerardo Araya-Letelier¹; José Concha-Riedel²; Federico C. Antico³;
Andrés Glade⁴; María J. Wiener⁵

¹Escuela de Construcción Civil/Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile, gerardo.araya@uc.cl

Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibañez, Chile, ²jose.concha@uai.cl; ³federico.antico@uai.cl;
⁴aglade@alumnos.uai.cl

⁵ Lyles School of Civil Engineering and Division of Environmental and Ecological Engineering, Purdue University, USA,
wiener@purdue.edu

Palabras clave: adobe reforzado, fisuración por retracción, resistencia flexural

Resumen

La incorporación controlada de fibras de refuerzo industrializadas a materiales de construcción en base a tierra ofrece nuevas oportunidades para mejorar sus propiedades mecánicas y de fractura, y, en consecuencia, proveer mejor desempeño de estructural y durabilidad de estos materiales que aún son ampliamente usados alrededor del mundo. En la presente investigación, el efecto de distintas dosis de microfibras de polipropileno (MFPP) en el desempeño mecánico y de control de daño de mezclas de tierra fue estudiado. Tres dosis de MFPP (0,25%, 0,5% y 1% en peso de fibras con respecto al peso de suelo arcilloso seco usado en las mezclas) fueron utilizadas para confeccionar mezclas de tierra reforzadas, las cuales son comparadas con una mezcla de tierra sin reforzar. El comportamiento a fractura es estudiado usando dos metodologías experimentales simples e innovadoras para evaluar la fisuración por retracción por secado, tanto distribuida como localizada, de las mezclas. Los resultados de la investigación muestran que la incorporación de MFPP controla y reduce significativamente la distribución del daño y la formación de grietas macroscópicas. Adicionalmente, la incorporación de MFPP aumenta considerablemente la tenacidad flexural del adobe. Finalmente, la resistencia a flexión no es estadísticamente modificada por la incorporación de estas fibras.

1 INTRODUCCIÓN

A pesar del amplio uso y de las ventajas de los materiales y técnicas de construcción en base a tierra (Cataldo-Born; Araya-Letelier; Pabón, 2016; Minke, 2000; 2009) su comportamiento es reducido en comparación a algunos materiales industrializados de construcción en términos de resistencias mecánicas, tenacidad, fisuración, y abrasión, entre otras propiedades, (Arancibia et al, 2011; Minke, 2000; 2009) y la utilización de refuerzos en base a fibras se ha estudiado para mejorar su desempeño. En particular, la incorporación de fibras naturales, tales como la paja, sisal, jute, banana, cáñamo, lana y fibras de cocos (Avrami; Guillaud; Hardy, 2008; Binici; Aksogan; Shah, 2005; Calatan et al, 2016; Ghavami; Toledo Filho; Barbosa, 1999; Viñuales, 2006), y fibras industriales, tales como fibras de polipropileno y fibra de vidrio (Pekrioglu Balkis, 2017; Donkor; Obonyo, 2015; Yilmaz, 2009) se ha implementado exitosamente en materiales de construcción en base a tierra.

Entre las fibras industriales, el uso de fibras de polipropileno reforzando distintos tipos de materiales y técnicas en base a tierra ha tenido interesantes aplicaciones con resultados prometedores. Yilmaz (2009) evaluó el desempeño a compresión y a tracción indirecta de mezclas de arcilla-arena reforzadas con distintas dosis de micro fibras de polipropileno (MFPP) encontrando que la adición de MFPP tenía un efecto limitado en término de las resistencias mecánicas, pero las MFPP mejoraban la tenacidad de las mezclas. Donkor y Obonyo (2015) estudiaron el efecto de incorporar macro fibras de polipropileno en las resistencias a flexión y compresión y en las características de deformabilidad de bloques de tierra estabilizada encontrando que la flexión y la ductilidad de los bloques fue mejorada con la incorporación de fibras. Pekrioglu Balkis (2017) evaluó el efecto de polvo de mármol y

MFPP en la resistencia a compresión y flexión de materiales en base a tierra estabilizados con yeso, encontrando una combinación óptima de polvo de mármol y MFPP donde las resistencias a compresión y flexión fueron mejoradas en comparación a la tierra estabilizada con yeso y sin fibras. Si bien estos estudios han contribuido significativamente a la investigación y mejora de los materiales y técnicas en base a tierra con incorporación de fibras de polipropileno, hay aún algunas propiedades como la tenacidad flexural y el control de la fisuración por retracción por secado que no han sido estudiadas exhaustivamente.

La novedad de esta investigación reside en evaluar algunos de los beneficios relevantes que no han sido estudiados de manera exhaustiva, tales como la tenacidad flexural y el control de fisuración por retracción por secado, debido a la incorporación de MFPP en materiales y técnicas en base a tierra. Adicionalmente, este estudio presenta dos procedimientos experimentales simples para evaluar cuantitativamente la reducción de fisuración por retracción generada al incorporar fibras en adobe. Este estudio se refiere a la mezcla de suelo arcilloso, agua y fibras como mezclas de adobe ya que pueden ser utilizados para producir adobes. Los objetivos de este estudio son evaluar el impacto de diferentes dosis de MFPP en: (i) resistencia y tenacidad flexural de mezclas de adobe; y (ii) fisuración por retracción por secado de mezclas de adobe.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Suelo arcilloso

El presente estudio utilizó un suelo arcilloso que ha sido anteriormente estudiado y usado por Araya-Letelier et al (2018). La granulometría de partículas del suelo arcilloso fue obtenida utilizando los estándares ASTM D6913 (2017) y ASTM D7928 (2017) y los contenidos de arcilla, limo y arena resultantes fueron de 11%, 69% y 20%, respectivamente. Adicionalmente, Araya-Letelier et al (2018) determinó los límites de Atterberg (líquido y plástico), el índice de plasticidad, y el peso específico de las partículas sólidas, resultando valores de 29,1%, 17,4%, 11,7% y 2.507 kg/m³, respectivamente.

2.2 Micro fibras de polipropileno

El presente estudio utiliza micro fibras de polipropileno sintéticas¹ que cumplen con el estándar ASTM C1116 (2015) para fibras tipo III. Estas micro fibras de polipropileno (MFPP) son usadas en hormigones y morteros cementicios para reducir la fisuración por retracción plástica, y mejorar la resistencia al impacto y a la abrasión (Sika, 2017).

Los valores de largo y diámetro de estas fibras son 12 mm y 0,031 mm, respectivamente, lo que resulta en una razón de aspecto de 387 para las fibras. Con respecto a la densidad y absorción de agua de las fibras, sus valores son de 1,16 g/cm³ (a 20°C) y 0%, respectivamente. Finalmente, las MFPP presentan una elongación en rotura de 60% a 140% y una resistencia característica de tracción de 310 MPa (Sika, 2017).

2.3 Proporciones de mezclas de tierra y confección de especímenes

La presente investigación utilizó mezclas de tierra confeccionadas en base a una razón de agua suelo de 0,307 (a cada 10 kg de suelo arcilloso secado en horno se le agregaron 3,07 kg de agua).

Cuatro tipos de mezclas fueron preparadas en este estudio: una mezcla sin fibras (no reforzada) fue comparada a tres otras mezclas que incorporaban tres dosis de MFPP (0,25%, 0,5% y 1% en peso de fibras secas con respecto a peso de suelo seco). Como las MFPP no tienen absorción, no fue necesaria una corrección por agua absorbida por las MFPP en las mezclas de adobe reforzado. Las mezclas fueron identificadas por un número que indica el porcentaje (en peso) de fibra añadida. Por ejemplo, la mezcla 0 indica 0% de

¹ Sika® Fiber P-12

MFPP (es decir es mezcla no reforzada), la mezcla 0,25 indica 0,25% de dosis de fibra y así sucesivamente hasta la mezcla 1.

El mezclado, y compactación de los especímenes de este estudio se realizó de manera manual, y con respecto a la incorporación de las MFPP, estas fueron previamente mezcladas con la tierra para obtener una mezcla uniforme antes de la adición de agua.

Para cada una de las cuatro mezclas de tierra se confeccionaron los siguientes especímenes: (i) cuatro vigas (105 mm x 70 mm x 310 mm) para resistencia a flexión y determinación de índices de tenacidad flexural, (ii) dos especímenes planos (180 mm de diámetro y 5 mm de altura) para evaluar fisuración distribuida por retracción por secado, y (iii) dos losetas (600 mm x 600 mm x 50 mm con dos concentradores de tensiones longitudinales) para evaluar fisuración concentrada por retracción por secado. La figura 1 muestra los especímenes confeccionados.

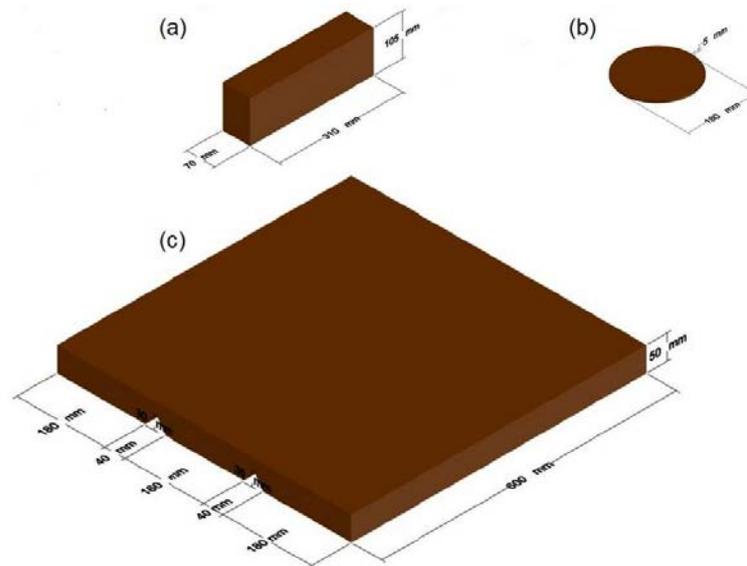


Figura 1. Especímenes preparados en este estudio: (a) vigas, (b) planos, y (c) losetas

Las vigas fueron desmoldadas inmediatamente tras su confección y mantenidas a 22°C y 45% de humedad relativa (HR) por 28 días y rotadas cada siete días 90° para propiciar un secado uniforme. Los especímenes planos fueron confeccionados sobre unos platos metálicos con una cobertura rugosa (generada a partir de una mezcla de arena con pegamento) para aumentar la ocurrencia de fisuración por retracción por secado. Los especímenes planos también fueron mantenidos a 22°C y 45% HR, pero no fueron desmoldados para generar una condición de fisuración por retracción por secado y las fisuras fueron evaluadas a los siete días desde su confección. Con respecto a las losetas, estas fueron mantenidas en sus moldes de madera y dispuestas de inmediato a un ambiente con 42°C y 20% HR durante ocho horas, para luego ser mantenidas otras 16 horas a 22°C y 45% HR, y finalmente realizar una evaluación de fisuración concertada debido a la retracción por secado a las 24 horas posterior a su confección.

2.4 Programa experimental

Una configuración de flexión en tres puntos (con una carga central y dos apoyos) y una luz libre de 270 mm entre apoyos fue utilizada para evaluar la resistencia a flexión y los índices de tenacidad flexural de cada mezcla de tierra a 28 días de su confección. La carga aplicada y su deformación correspondiente fueron monitoreadas de manera continua mediante la celda de carga de la prensa y un transformador diferencial de variación lineal dispuesto en la parte baja de las vigas al centro de estas. Los valores individuales de resistencias a flexión se calcularon mediante la ecuación 1.

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2BD^2} \quad (1)$$

Donde:

- σ_f : resistencia a flexión (MPa)
- F : máxima carga aplicada (N)
- L : luz entre apoyos (mm)
- B : ancho de la viga (mm)
- D : altura de la viga (mm)

Para cada tipo de mezcla de tierra se obtuvieron las resistencias a flexión individuales, las resistencias promedios y las desviaciones estándares.

Con respecto a la tenacidad flexural, esta es una propiedad que se espera mejorar con la incorporación de fibras y su cálculo se realizó mediante índices de tenacidad flexural de acuerdo a lo establecido por la norma ASTM C1018 (1997). Los índices de tenacidad flexural son obtenidos a partir de los ensayos de resistencia a flexión y representan al área bajo la curva de fuerza-desplazamiento hasta un valor específico de deformación, dividido por el área bajo la curva fuerza-desplazamiento hasta el desplazamiento donde ocurre la primera fisura (δ). Los índices de tenacidad flexural I_5 , I_{10} , e I_{20} son calculados usando deflexiones de 3δ , $5,5\delta$, y $10,5\delta$, respectivamente. Para cada tipo de mezcla se calcularon los valores individuales, los valores promedios y las desviaciones standard de los índices de tenacidad flexural.

La retracción por secado de cada mezcla genera fisuración que fue cuantitativamente evaluada, tanto para los especímenes planos (que generan fisuración distribuida), como para los especímenes losetas (que generan fisuración concentrada en los concentradores de tensiones longitudinales). Los dos especímenes planos confeccionados para cada mezcla fueron mantenidos a 22°C y 45% HR durante siete días tras su confección para posteriormente medir los anchos y largos de cada fisura generada. Con respecto a los especímenes losetas, estos fueron mantenidos en un ambiente con 42°C y 20% HR durante ocho horas, para luego ser mantenidas otras 16 horas a 22°C y 45%HR, y finalmente realizar una medición de los largos y anchos de cada fisura generada.

Posteriormente, se calculó un ancho promedio de fisuras (APF) para cada mezcla en base a sus dos especímenes planos y dos especímenes losetas usando la ecuación 2, tanto para fisuración distribuida como para fisuración concentrada, respectivamente.

$$APF_x = \frac{\sum l_x \cdot a_x}{\sum l_x} \quad (2)$$

Donde:

- APF_x : ancho promedio de fisuración de la mezcla x (mm)
- l_x : largos de cada fisura de la mezcla x (mm)
- a_x : anchos de cada fisura de la mezcla x (mm)

Una vez obtenidos los valores de APF de cada mezcla de tierra, se calcularon los factores de reducción de ancho de fisuración (FRAF) de cada mezcla reforzada con MFPP con respecto a la mezcla no reforzada, tanto para fisuración distribuida como para fisuración concentrada, usando la ecuación 3.

$$FRAF_x = \left(1 - \frac{APF_x}{APF_0}\right) \cdot 100 \quad (3)$$

Donde: $FRAF_x$: factor de reducción de ancho de fisuración de la mezcla x (%)

APF_x : ancho promedio de fisuración de la mezcla x (mm)

APF_0 : ancho promedio de fisuración de la mezcla 0, mezcla no reforzada, (mm)

3 RESULTADOS

3.1 Influencia de MFPP en resistencia y tenacidad flexural de las mezclas de adobe

Los valores promedios y las barras de error (una desviación estándar sobre y bajo los promedios) de las resistencias a flexión de cada mezcla a 28 días son mostrados en la figura 2. Los resultados promedios varían entre 0,50 MPa (mezcla 0) y 0,70 MPa (mezcla 1). La adición de MFPP aumentó las resistencias promedios a flexión (con respecto a la mezcla de tierra no reforzado) y estos aumentos llegaron hasta un 40% (mezcla 1). Los valores de las desviaciones estándar variaron entre 0,09 MPa (mezcla 0) a 0,13 MPa (mezcla 0,25). A pesar de existir un aumento considerable de las resistencias a flexión de hasta un 40%, si las barras de error son analizadas, puede ser observado que el valor resultante obtenido al sumar la desviación estándar al valor promedio de la mezcla 0 es de 0,59 MPa, el cual es muy cercano al valor obtenido al restar su desviación estándar al promedio de la mezcla 1, que equivale a 0,58 MPa. Por lo anterior, no existe evidencia contundente que indique que la incorporación de MFPP aumenta la resistencia a flexión y estas diferencias podrían ser explicadas por variabilidad aleatoria de los resultados y/o errores de medición.

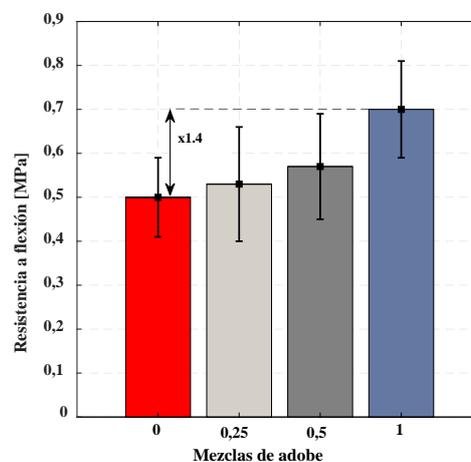


Figura 2. Valores promedios y barras de error (una desviación estándar sobre y bajo los promedios) de las resistencias a flexión de las mezclas de adobe a 28 días

Con respecto a los índices de tenacidad flexural, la figura 3 muestra curvas representativas de la relación de fuerza-desplazamiento obtenidas para una viga de cada una de las mezclas de adobe (curvas similares fueron obtenidas para las tres vigas restantes de cada mezcla). La figura 3 muestra que la carga flexural aumenta de manera lineal a una misma razón de fuerza-desplazamiento para todas las mezclas, con excepción de la mezcla 1, hasta que una grieta macroscópica es formada en la parte inferior central de las vigas (bajo tracción). Con excepción de la mezcla 1, el comportamiento hasta la carga máxima de las mezclas es similar y depende principalmente del comportamiento frágil de la matriz de tierra. La mezcla de tierra no reforzada mostró un comportamiento frágil donde la carga flexural máxima fue seguida de una abrupta caída, como lo muestra el punto A de la figura 3, lo cual es similar para las mezclas 0,25 y 0,5 con una caída de carga alrededor de una deflexión de 1 mm. Posterior a la falla de la matriz frágil, la mezcla 0 no es capaz de tomar más carga, pero sí lo son las mezclas 0,25 y 0,5 donde parte de la carga es traspasada a las fibras que actúan como puente tomando carga desde la matriz en las secciones fisuras. Con el incremento de la carga, algunas fibras empiezan a ser arrancadas de la matriz de tierra llevando a un comportamiento de fuerza-desplazamiento no lineal hasta que la última carga flexural es alcanzada en el punto B. Posterior al punto B, las fibras se terminan de arrancar de la matriz hasta el colapso de la viga. En general, la caída de carga en el punto A es menor a mayores dosis de MFPP, lo cual puede ser explicado por el hecho de que un mayor número de fibras son capaces de transferir cargas desde la matriz. Con respecto a la mezcla 1, esta presenta un incremento no-lineal de carga posterior al punto A y una disminución de la carga posterior al punto B. Lo anterior es el comportamiento típico de materiales cuasi-

frágiles, que en este caso se debe a un alto contenido de fibras (Mindess; Young; Darwin, 2002).

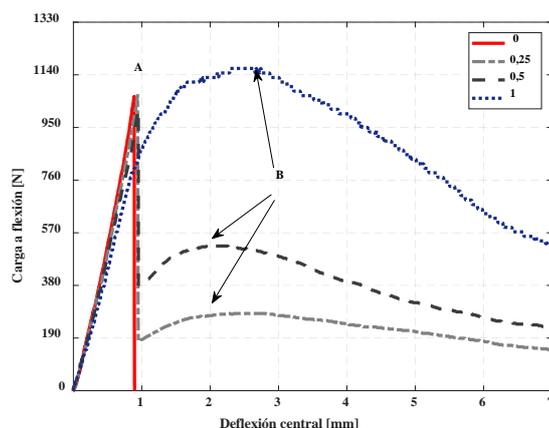


Figura 3. Curvas típicas fuerza-deflexión

La tabla 1 muestra los valores promedios y las desviaciones estándar obtenidos para los índices de tenacidad flexural de cada mezcla de tierra. Todos los valores de índices de tenacidad flexural de la mezcla 0 fueron iguales a uno, lo cual es consistente con un comportamiento flexural frágil donde la carga máxima flexural es seguida de inmediato por el colapso de las vigas. En general, los índices de tenacidad flexural fueron proporcionales a las dosis de MFPP utilizadas, aumentando estos índices de manera considerable para la mezcla 1.

Tabla 1. Estadísticas de índices de tenacidad flexural de cada mezcla de tierra

Mezcla	I_5		I_{10}		I_{20}	
	Prom. ¹	Des. St. ²	Prom. ¹	Des. St. ²	Prom. ¹	Des. St. ²
0	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
0,25	2,15	0,35	3,11	0,87	4,09	1,37
0,5	2,81	0,42	4,27	1,05	6,37	1,69
1	4,63	0,93	7,21	1,89	11,08	2,26

¹ Promedio; ² Desviación estándar

3.2 Influencia de MFPP en control de fisuración de las mezclas de adobe

La figura 4 muestra los resultados de los ensayos de fisuración distribuida y fisuración concentrada debido a retracción por secado. En particular, la figura 4 (a) muestra un espécimen plano fisurado por cada tipo de mezcla. Importantes reducciones en la fisuración por retracción por secado fueron observadas al aumentar la dosis de MFPP en las mezclas de adobe. Las mezclas de adobe 0, 0,25, 0,5 y 1, experimentaron anchos de fisuración de hasta 2,0 mm, 0,85 mm, 0,8 mm y 0,6 mm, respectivamente. Con respecto al ensayo de fisuración concentrada, la figura 4 (b) muestra la reducción significativa de la fisuración debido a la incorporación de MFPP en las mezclas de adobe. En este ensayo, las mezclas de adobe 0, 0,25, 0,5 y 1, mostraron anchos de fisuración de hasta 6,1 mm, 0,97 mm, 0,88 mm y 0,71 mm, respectivamente.

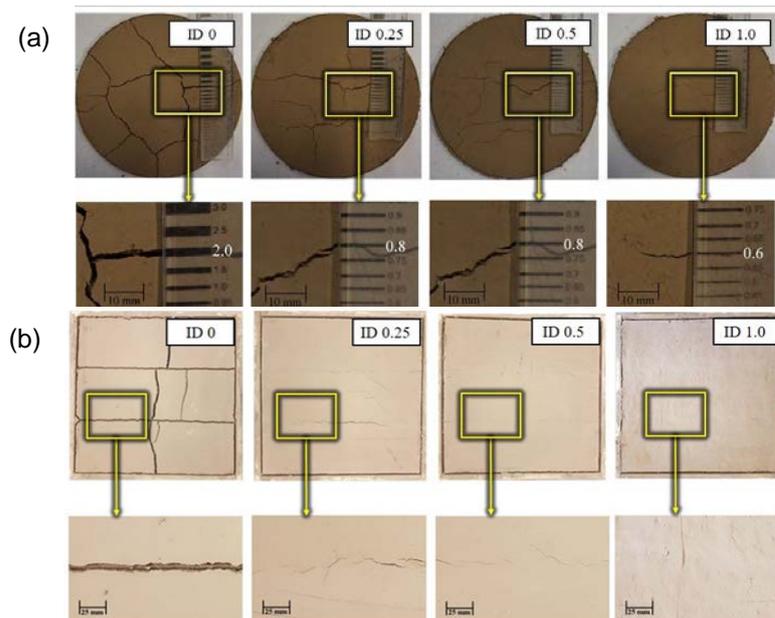


Figura 4. Resultados de fisuración por retracción por secado: (a) fisuración distribuida, y (b) fisuración concentrada

La figura 4 muestra resultados de APF, en el eje de la izquierda, y FRAF, en el eje de la derecha, para los ensayos de fisuración distribuida y concentrada.

Con respecto al ensayo de fisuración distribuida, puede observarse una reducción significativa de los valores de APF para las mezclas reforzadas y, en consecuencia, un aumento importante en los valores de FRAF para las mezclas de adobe reforzadas con fibras. En particular el valor de APF de la mezcla de tierra no reforzada (0) alcanzó 1,1 mm, siendo este valor reducido a valores que fluctúan entre 0,5 mm (mezcla 0,25) hasta 0,19 mm (mezcla 1) debido a la incorporación de MFPP. En base a los resultados de APF, los valores de FRAF oscilan entre un 54% (mezcla 0,25) hasta un 82% (mezcla 1).

En el caso del ensayo de fisuración concentrada, existe un aumento de los valores de APF para todas las mezclas en comparación al ensayo de fisuración distribuida, lo cual es razonable debido al uso de concentradores de tensiones y a la exposición de las mezclas a unas condiciones ambientales más agresivas en comparación al ensayo de fisuración distribuida. Adicionalmente, existe una reducción significativa de los valores de APF para las mezclas reforzadas y, en consecuencia, un aumento importante en los valores de FRAF. En particular el valor de APF de la mezcla de tierra no reforzada (0) alcanzó 3,8 mm, siendo este valor reducido a valores que fluctúan entre 0,68 mm (mezcla 0,25) hasta 0,23 mm (mezcla 1) debido a la incorporación de MFPP. En base a los resultados de APF, los valores de FRAF oscilan entre un 82% (mezcla 0,25) hasta un 94% (mezcla 1). En comparación con los resultados obtenidos para el ensayo de fisuración distribuida, la efectividad de la incorporación de MFPP es aún mayor en el ensayo de fisuración concentrada (ambiente más agresivo). La mayor reducción de la fisuración propiciada por dosis mayores de MFPP se explica por la mayor cantidad de fibras reforzando las secciones fisuradas, tal como ha sido observado en morteros cementicios reforzados con dosis variables de fibras (Araya-Letelier et al, 2017a; 2017b; 2017c).

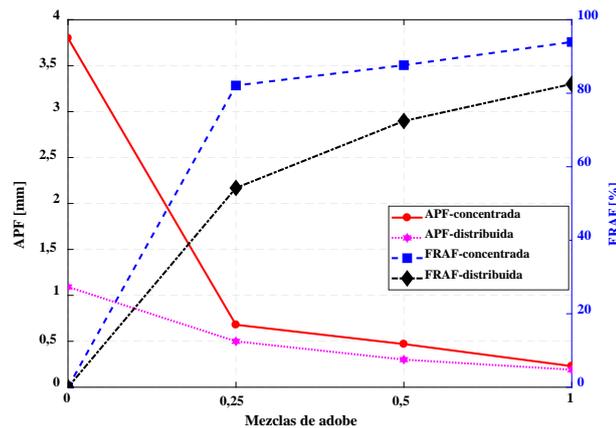


Figura 5. Valores de AFP (eje izquierdo) y FRAF (eje derecho) de los ensayos de fisuración distribuida y concentrada de las mezclas de adobe

4 CONCLUSIONES

Este estudio analizó el efecto de la incorporación de MFPP en las propiedades de resistencia y tenacidad flexural y en el control de fisuración por retracción por secado de mezclas de tierra con y sin refuerzo de fibras. El programa experimental evaluó tres dosis de fibra (0,25%, 0,5% y 1% de peso de MFPP con respecto al peso de suelo arcilloso seco), las cuales fueron comparadas a un adobe patrón sin incorporación de fibras. El programa experimental evaluó resistencias a flexión, tenacidad flexural y fisuración por retracción por secado, tanto distribuida como concentrada, de las mezclas de adobe propuestas, siendo las principales conclusiones las siguientes:

La resistencia a flexión promedio fue incrementada consistentemente con la incorporación de MFPP, llegando a un aumento de hasta un 40% (mezcla 1). Sin embargo, se registraron valores altos de desviaciones standard en todas las dosis de adobe, lo que no permite tener una fuerte evidencia que indique que la incorporación de MFPP tiene un efecto real en aumentar la resistencia a flexión.

Con la excepción del adobe 1, que corresponde a la dosis con 1% de fibra, las restantes mezclas de adobe (no reforzada y reforzadas) se comportaron de manera frágil ante carga flexural. Sin embargo, la mezcla no reforzada colapsó inmediatamente después de alcanzar su resistencia a flexión, mientras las mezclas de adobe reforzadas con MFPP fueron capaces de tomar cargas residuales al existir un traspaso de carga desde la matriz de tierra hacia las fibras. La carga residual que fue capaz de tomar las mezclas de adobe reforzadas fueron mayores a mayores dosis de MFPP debido a la mayor cantidad de fibras que actúan como puente en la matriz fisurada. Con respecto a la mezcla de tierra 1, esta mezcla mostró un comportamiento cuasi-frágil, posiblemente debido a una temprana redistribución de las cargas desde la matriz a las fibras mientras se desarrollaba la micro fisuración. En consecuencia, los índices de tenacidad flexural crecieron proporcionalmente al aumento de las dosis de MFPP.

Con respecto al control de fisuración por retracción por secado, tanto la fisuración distribuida como la fisuración concentrada fueron reducidas de manera significativa con la incorporación de MFPP, y esta reducción fue mayor a mayores dosis de fibra. En particular, la fisuración de todas las mezclas de adobe fue mayor en el ensayo de fisuración concentrada en comparación al ensayo de fisuración distribuida, lo que se explica por la exposición de las mezclas a un ambiente de secado más severo y al uso de concentradores de tensiones. Es importante destacar que el efecto en reducción de fisuración propiciado por las MFPP, medido a través del FRAF, fue más significativo en el ensayo de fisuración concentrada por sobre el de fisuración distribuida.

Finalmente, la incorporación de MFPP, en particular la dosis de adobe con 1% de fibra, es recomendada por este estudio para la posible fabricación de adobes y/o morteros en base a tierra ya que presenta un desempeño mejorado en términos de tenacidad flexural, y fisuración por retracción por secado sin afectar estadísticamente la resistencia a la flexión.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arancibia, S. C.; Prieto, M. B.; Saldías, H.; Vargas, J.; Jorquera, N. (2011). La arquitectura en tierra frente al sismo: conclusiones y reflexiones tras el sismo en Chile del 27 de febrero de 2010. *Conserva. Revista del Centro Nacional de Conservación y Restauración*, 16, 39–54.

Araya-Letelier, G.; Antico, F. C.; Parra, P. F.; Carrasco, M. (2017a). Fiber-reinforced mortar incorporating pig hair. In *Advanced Engineering Forum* (Vol. 21, pp. 219-225). Trans Tech Publications.

Araya-Letelier, G.; Antico, F.C.; Urzua, J.; Bravo, R. (2017b). Physical-mechanical characterization of fiber-reinforced mortar incorporating pig hair. In: *2nd International Conference on Bio-Based Building Materials and 1st Conference on Ecological Valorisation of Granular and Fibrous Materials*, Clermont-Ferrand.

Araya-Letelier, G.; Antico, F. C.; Carrasco, M.; Rojas, P.; García-Herrera, C. M. (2017c). Effectiveness of new natural fibers on damage-mechanical performance of mortar. *Construction and Building Materials*, 152, 672-682.

Araya-Letelier, G.; Concha-Riedel, J.; Antico, F. C.; Valdés, C.; Cáceres, G. (2018). Influence of natural fiber dosage and length on adobe mixes damage-mechanical behavior. *Construction and Building Materials*, 174, 645-655.

ASTM C1018-97 (1997). Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (Using beam with third-point loading) (Withdrawn 2006). USA: ASTM International

ASTM C1116/C1116M-10a (2015). Standard specification for fiber-reinforced concrete. USA: ASTM International

ASTM D6913/D6913M-17 (2017). Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis. USA: ASTM International

ASTM D7928-17 (2017). Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis. USA: ASTM International

Avrami, E. C.; Guillaud, H.; Hardy, M. (2008). *Terra literature review: an overview of research in earthen architecture conservation*. Getty Conservation Institute.

Binici, H.; Aksogan, O.; Shah, T. (2005) Investigation of fiber reinforced mud brick as a building material. *Construction and Building Materials*, 19(4), 313–318.

Calatan, G.; Hegyi, A.; Dico, C.; Mircea, C. (2016). Determining the optimum addition of vegetable materials in adobe bricks. *Procedia Technology*, 22, 259-265.

Cataldo-Born, M.; Araya-Letelier, G.; Pabón, C. (2016). Obstacles and motivations for earthbag social housing in Chile: energy, environment, economic and codes implications. *Revista de la construcción*, 15(3), 17–26.

Donkor, P.; Obonyo, E. (2015). Earthen construction materials: assessing the feasibility of improving strength and deformability of compressed earth blocks using polypropylene fibers. *Materials and Desing*, 83, 813–819.

Ghavami, K.; Toledo Filho, R. D.; Barbosa, N. P. (1999). Behavior of composite soil reinforced with natural fibers. *Cement and Concrete Composites*, 21(1), 39–48.

Mindess, S.; Young, J.F.; Darwin, D. (2002). *Concrete* (2nd Edition), Prentice Hall.

Minke, G. (2000). *Earth construction handbook: the building material earth in modern architecture*. Southampton: WIT Press.

Minke, G. (2009). *Building with earth: design and technology of a sustainable architecture*. Walter de Gruyter.

Pekrioglu Balkis, A. (2017). The effects of waste marble dust and polypropylene fiber contents on mechanical properties of gypsum stabilized earthen. *Construction and Building Materials*, 134, 556-562.

Sika (2017) Sika® Fiber P-12. Fibra sintética para hormigón y mortero. Ficha de producto. Santiago: Sika S. A. Chile

Viñuales, M. G. (2006). El tema de la tierra en Iberoamérica en el siglo XX. In: *Construir con tierra ayer y hoy: V Seminario Iberoamericano de Construcción con tierra; I Seminario Argentino de Arquitectura y Construcción con tierra*, Mendoza, Argentina.

Yilmaz, Y. (2009). Experimental investigation of the strength properties of sand–clay mixtures reinforced with randomly distributed discrete polypropylene fibers. *Geosynthetics International*, 16(5), 354-363.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este estudio agradecen a Arnaldo Puebla, Andrés Glade, Wladimir Vergara, Mauro Ortiz, Gian Piero Canevari, Matías Riveros, Cristobal Vargas, Francisca Díaz, Francisco Olea, Diego Anríquez, Alejandra Vásquez, Alejandro D'ardaillon y Cedric Robles por su ayuda durante la preparación de las mezclas de tierra y a Sika S.A. Chile, por la donación de las MFPP usadas en este estudio.

AUTORES

Gerardo Araya-Letelier, doctor y maestro en ingeniería civil de Stanford University (USA) y constructor civil por la Pontificia Universidad Católica de Chile. Actualmente se desempeña como profesor asistente en la Escuela de Construcción Civil de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Sus líneas de investigación son la ingeniería sísmica basada en desempeño, y el diseño y evaluación de materiales compuestos de construcción.

José Concha Riedel, ingeniero civil por la Universidad Adolfo Ibáñez (Chile). Actualmente se desempeña como ingeniero de laboratorio en Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Adolfo Ibáñez. Sus líneas de investigación son los materiales compuestos de construcción.

Federico C. Antico, doctor y maestro en ingeniería civil de Purdue University (USA) e ingeniero aeronáutico por la Universidad Nacional de La Plata (Argentina). Actualmente se desempeña como profesor asistente en la Facultad de Ingeniería y Ciencias de la Universidad Adolfo Ibáñez (Chile). Sus líneas de investigación son la caracterización del comportamiento químico, físico y mecánico de materiales cementicios.

Andrés Glade, ingeniero civil por la Universidad Adolfo Ibáñez (Chile). Sus intereses de investigación son los materiales compuestos de construcción.

María J. Wiener, es candidata al doctorado de ingeniería en Purdue University (USA) e Ingeniera Industrial egresada de la Universidad Nacional de La Plata (Argentina). Sus principales intereses de investigación son el manejo de residuos y la evaluación del uso y la reutilización del agua dentro de cuencas hidrográficas.