



## PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE FRACTURA DE TIERRA REFORZADA CON NUEVA FIBRA NATURAL

Gerardo Araya-Letelier<sup>1</sup>; Federico C. Antico<sup>2</sup>; José Concha-Riedel<sup>3</sup>;  
Úrsula Reidel<sup>4</sup>; María J. Wiener<sup>5</sup>

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

Facultad de Ingeniería y Ciencias, Universidad Adolfo Ibañez, Chile, <sup>2</sup>federico.antico@uai.cl; <sup>3</sup>jose.concha@uai.cl;

<sup>4</sup> Sika S.A. Chile, Chile, reidel.ursula@cl.sika.com

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

**Palabras clave:** adobe, fibra animal, tenacidad, resistencia flexural

### Resumen

El presente estudio experimental evalúa el uso de una fibra natural (pelo de cerdo), un desecho masivo generado por la industria alimentaria, como refuerzo de mezclas de tierra para construcción. Las mezclas de tierra fueron reforzadas con dos dosis de fibra (0,5% y 2% de peso de fibra seca con respecto a peso de suelo arcilloso seco) y tres largos (7 mm, 15 mm y 30 mm). Los resultados obtenidos mostraron que el comportamiento mecánico y de mitigación de daño es sensible tanto a las dosis como a los largos de las fibras naturales utilizadas en las mezclas de tierra. La tenacidad flexural y la resistencia al impacto son incrementadas, mientras la fisuración por retracción por secado es reducida con la incorporación de las fibras. Con respecto a la resistencia a la flexión, esta se reduce hasta en un 30% con la incorporación de fibras debido al aumento de porosidad y formación de cúmulos de fibras no uniformemente distribuidas en la mezcla, en particular para altas dosis y largos de fibra altos. Basado en los resultados de este estudio, una dosis de 0,5% de fibras de 7 mm de largo es recomendada para mejorar el desempeño a tenacidad flexural, resistencia al impacto y fisuración por retracción por secado, sin reducir la resistencia a la flexión en comparación a una mezcla de tierra no reforzada con fibras.

### 1 INTRODUCCIÓN

Las técnicas de construcción en base a tierra, tales como el tapial y adobe, han sido usados alrededor del mundo en la construcción de viviendas por miles de años, y actualmente 30% de la población mundial y 50% de la población en países en vías de desarrollo aún viven en edificaciones en base a tierra (Minke, 2009). En la actualidad, su uso ha resurgido e incluso nuevos materiales y técnicas, tales como la tierra ensacada (Cataldo-Born; Araya-Letelier; Pabón, 2016), han aparecido en las últimas décadas.

La tierra como material de construcción tiene muchas ventajas, tales como su disponibilidad (Millogo et al, 2014) y bajo impacto ambiental (Donkor; Obonyo, 2015). Sin embargo, a pesar de las ventajas exhibidas por estos, su desempeño es limitado en comparación a los materiales industrializados en términos de tenacidad, resistencias a la tracción y flexión, fractura, erosión por agua y fisuración por contracción durante el secado, entre otros (Arancibia et al., 2011; Minke, 2000; 2009).

No obstante, algunas de sus desventajas han sido mitigadas con 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; Yilmaz, 2009).

Debido a que los materiales en base a tierra tienen un bajo impacto ambiental (en comparación a materiales industrializados), particular interés se ha puesto en reforzarlos usando fibras naturales (sobre fibras industriales), y algunos estudios han utilizado fibras naturales resultantes de un proceso de valorización de residuos con resultados

prometedores. Ghavami, Toledo Filho y Barbosa (1999) estudiaron el efecto de fibras de sisal y coco en el comportamiento de diferentes suelos concluyendo que la incorporación de 4% de sisal o fibra de coco aumentó levemente la resistencia a compresión (de 1,5 MPa a 2,0 MPa) e impartió considerable tenacidad al suelo sin fibras. Yetgin, Çavdar y Çavdar (2008) evaluaron la incorporación de paja en el desempeño de adobes y los resultados mostraron que cuando se aumentó el contenido de paja, la retracción bajó, pero también bajó la resistencia a la compresión (en algunos casos de 3,5 MPa a 1,0 MPa, aproximadamente) y la resistencia a la tracción (en algunos casos de 0,7 MPa a 0,2 MPa) comparado con adobes no reforzados. Entre fibras naturales, el uso de fibras animales en materiales y técnicas de construcción en base a tierra ha tenido investigación limitada comparada con fibras vegetales, pero existen estudios interesantes evaluando el uso de fibras animales, especialmente incorporación de lana de oveja en materiales en base a tierra. Galan-Marin, Rivera-Gómez y Petric (2010) estudiaron la incorporación de lana de oveja como refuerzo, reportando incrementos en resistencia a la flexión y tenacidad en comparación con materiales no reforzados. Aymerich, Fenu t Meloni (2012) extendieron esta investigación, evaluando propiedades de iniciación y propagación de fisuración y absorción de energía, encontrando una mejora significativa en los materiales reforzados por sobre los no reforzados. Este estudio considera a la mezcla manual de suelo con agua y fibras, como adobe.

Para extender el uso de fibras naturales, y especialmente fibras animales, en adobe, este estudio propone el uso de pelo de cerdo, el cual es un residuo generado por la industria alimentaria de manera masiva. Por ejemplo, en Europa 890.000 toneladas de residuos provenientes del procesamiento de cerdos son generados cada año y los costos asociados han alcanzado 20,7 millones de Euros por año (Iberwaste, 2015). La industria alimentaria de cerdos genera problemas de residuos en muchos países, incluido Chile, y el uso de pelo de cerdo como fibra natural de refuerzo en adobe promueve la valorización de este residuo. Si bien hay estudios evaluando la valorización de pelo de cerdo como fibras de refuerzo, el foco de estos estudios ha sido la caracterización de la fibra y su incorporación en materiales compuestos cementicios (Araya-Letelier et al., 2017a; 2017b; 2017c).

La novedad de la presente investigación se centra en la incorporación de pelo de cerdo, una fibra natural de origen animal obtenida como residuo de la industria alimentaria, evaluando sus potenciales ventajas y desventajas en su incorporación en materiales en base a tierra. Este estudio llamará genéricamente mezclas de tierra a la combinación de suelo arcilloso, agua y fibras, y estas mezclas podrían ser utilizadas para la fabricación de adobes y/o morteros en base a tierra. En particular los objetivos de este estudio son evaluar el impacto de diferentes dosis y largos de pelo de cerdo en: (i) las propiedades mecánicas de las mezclas de tierra, y (ii) las propiedades de fractura de las mezclas de tierra.

## **2 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Suelo arcilloso**

El suelo arcilloso utilizado por este estudio se obtuvo desde Peñalolén (comuna ubicada al sur de Santiago, Chile) y ha sido previamente caracterizado y utilizado por Araya-Letelier et al. (2018). La distribución del tamaño de partículas del suelo arcilloso fue determinada utilizando las normas ASTM D7928 (2017) y ASTM D6913 (2017), resultando contenidos de arcilla, limo y arena de 11%, 69% y 20%, respectivamente. Los límites de Atterberg (líquido y plástico), el índice de plasticidad, y el peso específico de las partículas sólidas son 29,1%, 17,4%, 11,7% y 2.507 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

### **2.2 Fibras naturales**

Pelo de cerdo, un desecho masivo producido por la industria alimentaria alrededor del mundo, es utilizado por este estudio como fibra de refuerzo natural. Araya-Letelier et al. (2017c) desarrolló un estudio extensivo sobre las propiedades morfológicas, físicas y mecánicas de pelo de cerdo obtenidos de una empresa chilena faenadora de cerdos que

dispone de aproximadamente 2.000 toneladas de pelo de cerdo en botaderos cada año. Los valores promedios de largo, diámetro, absorción de agua, rugosidad superficial y resistencia a la tracción de los pelos de cerdo analizados por Araya-Letelier et al (2017c) fueron 35,7 mm, 0,16 mm, 95%, 0,104  $\mu\text{m}$  y 99,2 MPa, respectivamente.

El pelo de cerdo usado en este estudio fue post-procesado obteniendo tres largos distintos (7 mm, 15 mm y 30 mm) para desarrollar un análisis de sensibilidad del impacto de diferentes largos y dosis en el desempeño de las mezclas de tierra. Considerando el diámetro promedio de 0,16 mm reportado por Araya-Letelier et al (2017c) y los tres largos usados en este estudio, las razones de aspecto obtenidas son 43,8, 93,8 y 187,5 para los largos de 7 mm, 15 mm, y 30 mm, respectivamente.

### 2.3 Proporciones de mezclas de tierras y confección de especímenes

La razón agua suelo utilizada en este estudio para la confección de mezclas de tierra fue de 0,307 (3,07 kg de agua por cada 10 kg de suelo arcilloso secado en horno) en base a ensayos de campo de plasticidad de la mezcla.

Siete tipos de mezclas de tierra fueron preparadas para este estudio: una mezcla de tierra no reforzada fue comparada a seis otras mezclas que incorporaban dos dosis de fibras naturales (0,5% y 2% en peso de fibras secas con respecto a peso de suelo arcilloso seco) y tres largos (7 mm, 15 mm, y 30 mm). Las mezclas de tierra que incorporaron fibras animales (que se incorporaron en condición seca de horno) tuvieron una corrección incorporando agua adicional equivalente al 95% (absorción de la fibra) del peso seco de fibra añadida. Las mezclas de tierra fueron identificadas por un doble número, donde el primer número indica el porcentaje (en peso) de fibra añadida y el segundo número indica el largo de la fibra añadida. Por ejemplo, la mezcla 0-0 indica 0% de fibra y largo 0 (es decir es mezcla de tierra no reforzada), la mezcla 0,5-7 indica 0,5% de dosis de fibra y 7 mm de largo, y así sucesivamente hasta la mezcla 2,0-30.

El presente estudio realizó un mezclado manual, donde las fibras fueron previamente mezcladas con la tierra para obtener una mezcla homogénea previamente a la incorporación de agua. La compactación de los especímenes fue realizada manualmente.

Para cada una de las siete mezclas de tierra se confeccionaron los siguientes especímenes: (i) seis vigas (105 mm x 70 mm x 310 mm) para resistencia a flexión y determinación de índices de tenacidad flexural, (ii) seis viguetas RILEM (40 mm x 40 mm x 160 mm con una entalla de 5 mm x 3 mm en el centro) para resistencia al impacto, y (iii) dos especímenes planos (180 mm de diámetro y 5 mm de altura) para evaluar fisuración por retracción por secado. Los especímenes planos fueron confeccionados sobre unos platos metálicos con una cobertura de arena con pegamento utilizada para aumentar la fricción entre la mezcla de tierra y el plato, y por lo tanto aumentar la ocurrencia de fisuración por retracción por secado. Las vigas (i) y viguetas RILEM (ii) fueron desmoldadas 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 también 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.

### 2.4 Programa experimental

Las resistencias a flexión de cada mezcla de tierra fueron evaluadas a los 28 días usando una configuración de flexión en tres puntos con una carga central y una luz libre de 270 mm entre apoyos. La carga y correspondiente deflexión fueron monitoreadas continuamente usando 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. Las resistencias individuales a flexión se calcularon usando la ecuación 1.

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

Dónde:

- $\sigma_f$ : 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 se calcularon las resistencias a flexión individuales, las resistencias promedios y las desviaciones estándares.

La tenacidad flexural de los materiales es un indicador de la capacidad de absorber energía, la cual es esperable que aumente con la incorporación de fibras. Este estudio calcula la tenacidad flexural de acuerdo a la norma ASTM C1018 (1997). Los índices de tenacidad flexural son calculados a partir de los ensayos de resistencia a flexión y corresponden 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 ( $\delta$ ). Los índices de tenacidad flexural  $I_5$ ,  $I_{10}$ , e  $I_{20}$  son obtenidos usando deflexiones de  $3\delta$ ,  $5,5\delta$ , 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 fisuración por retracción por secado de cada mezcla de tierra fue cuantitativamente evaluada. Los dos especímenes planos confeccionados para cada mezcla fueron analizados siete días posterior a su confección, midiendo los anchos y largos de cada fisura generada. Posteriormente, se calculó un ancho promedio de fisuras (APF) para cada mezcla en base a sus dos especímenes planos y usando la ecuación 2.

$$APF_{x-y} = \frac{\sum l_{x-y} \cdot a_{x-y}}{\sum l_{x-y}} \quad (2)$$

Donde:

- $APF_{x-y}$ : ancho promedio de fisuración de la mezcla de tierra x-y (mm)
- $l_{x-y}$ : largos de cada fisura de la mezcla de tierra x-y (mm)
- $a_{x-y}$ : anchos de cada fisura de la mezcla de tierra x-y (mm)

Una vez obtenidos los valores de APF de cada mezcla, se calcularon los factores de reducción de ancho de fisuración (FRAF) de cada mezcla de tierra reforzada con fibra animal con respecto a la mezcla de tierra no reforzada usando la ecuación 3.

$$FRAF_{x-y} = \left( 1 - \frac{AFP_{x-y}}{AFP_{0-0}} \right) \cdot 100 \quad (3)$$

Donde:

- $FRAF_{x-y}$ : factor de reducción de ancho de fisuración de la mezcla de tierra x-y (%)
- $AFP_{x-y}$ : ancho promedio de fisuración de la mezcla de tierra x-y (mm)
- $AFP_{0-0}$ : ancho promedio de fisuración de la mezcla de tierra 0-0, mezcla no reforzada, (mm)

La resistencia al impacto de cada mezcla de tierra se evaluó a los 28 días usando un procedimiento donde un proyectil esférico de masa 0,047 kg es lanzado desde una altura de 0,496 m al centro de las viguetas RILEM que se encuentran apoyadas solo en los extremos. El número de impactos requeridos para fracturar cada espécimen es contabilizado y se calcula la energía acumulada al colapso del espécimen usando la ecuación 4.

$$E_c = n \cdot m \cdot g \cdot h \quad (4)$$

Donde:

- $E_c$ : energía acumulada al colapso (J)  
 $n$ : Número total de impactos requeridos para fracturar el espécimen  
 $m$ : masa del proyectil (kg)  
 $g$ : constante gravitacional ( $m/s^2$ )  
 $h$ : altura de caída del proyectil (m)

Los valores de  $m$  y  $h$  se mantuvieron constantes durante el ensayo a impacto, por lo que cada caída del proyectil equivale a una energía de impacto de 0,22 J.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Influencia de la fibra animal en las propiedades mecánicas de las mezclas de tierra

La figura 1 presenta los valores promedios y las barras de error (una desviación estándar sobre y bajo los promedios) de las resistencias a flexión de cada mezcla de tierra a 28 días. Los resultados promedios varían entre 0,34 MPa y 0,49 MPa. La incorporación de pelo de cerdo redujo las resistencias promedios a flexión (con respecto a la tierra no reforzada) y estas reducciones variaron de un 4% (mezcla 0,5-7) a un 30% (mezcla 2,0-15). Los valores de las desviaciones estándar variaron entre 0,06 MPa (mezcla 0-0) a 0,11 MPa (mezcla 2,0-30). Los resultados de este estudio muestran una reducción de las resistencias a flexión de entre un 20% a un 30% para: (i) mezclas de tierra con 2% de fibra animal, sin importar el largo de la fibra, y (ii) mezclas de tierra con 0,5% de fibra animal y largos de 15 mm y 30 mm. Las barras de error muestran que restando la correspondiente desviación estándar del valor promedio de resistencia a flexión de la mezcla de tierra no reforzada (0-0), el valor obtenida es casi equivalente a los promedios de resistencia a flexión de las mezclas reforzadas si se les suma su correspondiente desviación estándar.

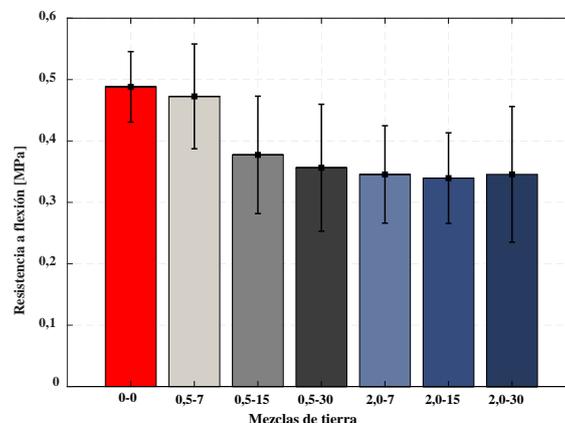


Figura 1. Valores promedios y barras de error (una desviación estándar sobre y bajo los promedios) de las resistencias a flexión de las mezclas de tierra a 28 días

La figura 2 muestra curvas representativas de la relación de fuerza-deflexión obtenida para una viga de cada una de las mezclas de tierra (similares curvas fueron obtenidas para las cinco vigas restantes de cada mezcla de tierra). Como muestra la figura 2, inicialmente la carga aumenta con una pendiente de carga-desplazamiento muy similar para todas las mezclas hasta que se genera una fisura en la parte inferior de la viga (en tracción). Lo anterior indica que hasta la carga máxima, el comportamiento a flexión de las mezclas de tierra depende principalmente del comportamiento frágil de la matriz de tierra. La carga máxima de todas las mezclas reforzadas con fibra animal fue reducida entre un 20% a un 30 % con respecto a la mezcla 0-0. Existen dos posibles explicaciones para esta reducción de la resistencia a flexión: (i) el largo de las fibras naturales aumenta la tortuosidad de las mezclas, y (ii) el contenido de fibras aumenta la densidad de discontinuidades en la matriz

de tierra. Estos dos mecanismos afectan el desempeño mecánico de las mezclas mientras aún se comportan como un material frágil, previo a la formación de una grieta macroscópica.

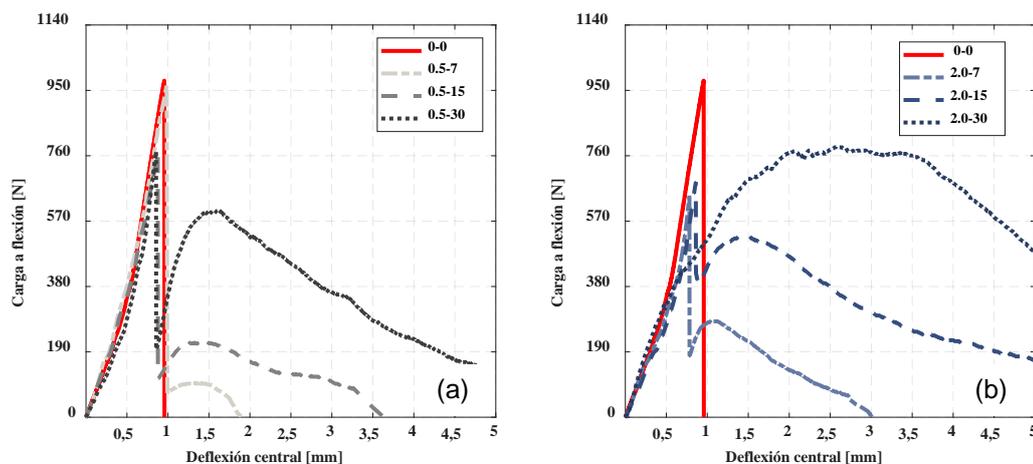


Figura 2. Curvas típicas fuerza-deflexión: (a) mezclas de tierra no reforzadas y reforzada con 0,5% de fibra natural, y (b) mezclas no reforzadas y reforzadas con 2,0% de fibra natural

Con respecto a los valores promedios y las desviaciones estándar obtenidos para los índices de tenacidad flexural de cada mezcla, estos son mostrados en la tabla 1. La mezcla de tierra no reforzada (0-0) exhibió valores de índices de tenacidad flexural ( $I_5$ ,  $I_{10}$  e  $I_{20}$ ) equivalentes a 1,0, consistentes con un modo de falla frágil donde la máxima resistencia a flexión es seguida por una caída abrupta en la carga causada por la formación de una grieta macroscópica. Por el contrario, todas las mezclas de tierra reforzadas con fibra animal exhibieron una recuperación de carga después de la formación de la primera fisura, seguido por un aumento en la deflexión en el centro de las vigas antes de colapsar. De los valores mostrados en la tabla 1 se puede ver que los índices de tenacidad flexural aumentan en relación directa tanto a la dosis como al largo de fibras incorporadas. En particular, el efecto del largo de la fibra fue más significativo que el efecto de la dosis (por ejemplo,  $I_{20}$  se incrementó 5,2 veces, en promedio, cuando el largo de la fibra pasó de 7 mm a 30 mm, mientras que el valor de  $I_{20}$  se incrementó solo 2,4 veces, en promedio, cuando la dosis de fibra pasó de 0,5% a 2,0%).

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

Mezcla de tierra	$I_5$		$I_{10}$		$I_{20}$	
	Prom. <sup>1</sup>	Des. St. <sup>2</sup>	Prom. <sup>1</sup>	Des. St. <sup>2</sup>	Prom. <sup>1</sup>	Des. St. <sup>2</sup>
0-0	1,00	0,00	1,00	0,00	1,00	0,00
0,5-7	1,21	0,28	1,21	0,28	1,21	0,28
0,5-15	1,85	0,33	2,27	0,52	2,27	0,52
0,5-30	3,98	0,59	5,92	0,97	6,79	1,43
2,0-7	2,29	0,47	2,63	0,61	2,63	0,61
2,0-15	3,69	0,74	5,76	1,02	7,44	1,29
2,0-30	5,96	1,24	9,74	1,57	12,69	1,72

<sup>1</sup> Promedio; <sup>2</sup> Desviación estándar

Las mejoras en el comportamiento posterior a la carga máxima a flexión, sin aumentar la resistencia a flexión presentada por la tierra no reforzada, es razonable ya que la incorporación de fibras con bajo módulo elástico en matrices frágiles usualmente no aumenta la resistencia del material compuesto resultante e incluso la pueden reducir (Mindess; Young; Darwin, 2002).

### 3.2 Influencia de la fibra animal en las propiedades de fractura de las mezclas de tierra

La figura 3 muestra un espécimen plano fisurado por cada tipo de mezcla de tierra, siete días posterior a su confección. Reducciones en la fisuración por retracción por secado fueron observadas al aumentar tanto la dosis como el largo de las fibras naturales incorporadas a las mezclas. La mezcla de tierra no reforzada (0-0) exhibió fisuras de ancho hasta 1,5 mm, mientras que la mezcla 2,0-30 mostró fisuras de ancho hasta 0,2 mm.

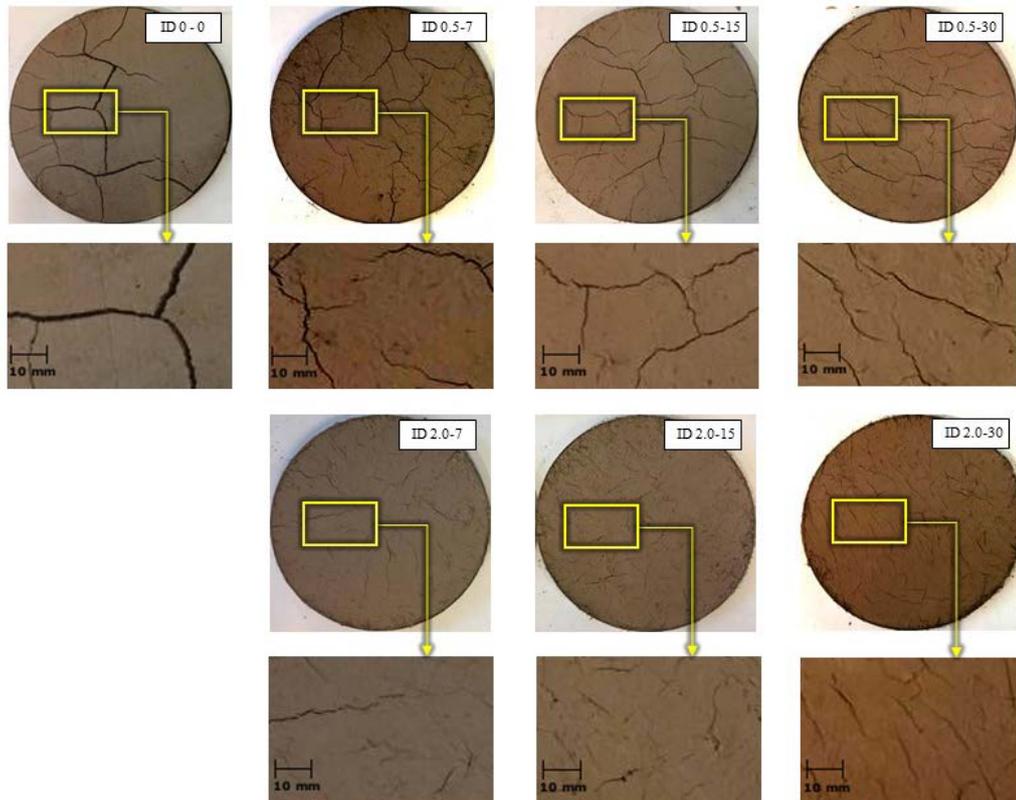


Figura 3. Resultados de fisuración por retracción por secado

La figura 4 muestra resultados de APF, en el eje de la izquierda, y FRAF, en el eje de la derecha. Puede observarse que tanto las dosis como los largos de las fibras naturales tienen un impacto en la reducción de fisuración por retracción por secado. El valor de APF de la mezcla 0-0 fue reducido a valores que fluctúan entre 0,46 mm (mezcla 0,5-7) a 0,15 mm (mezcla 2,0-30). Las reducciones anteriores corresponden a valores de FRAF que oscilan entre un 63% (mezcla 0,5-7) y un 91% (mezcla 2,0-30). Los valores de FRAF de dosis de 2% de fibra fueron mayores a los de 0,5% de fibra, independiente del largo considerado, pero a una misma dosis (por ejemplo, 0,5%) el largo de la fibra fue incidente al reducir la fisuración para largos de fibra mayores. El mejor comportamiento a fisuración debido al aumento de las dosis de fibras se explica por el aumento de la probabilidad de tener fibras que actúen como puentes reduciendo el ancho de las fisuras. Con respecto al largo de la fibra, el aumento del largo reduce la probabilidad de arrancamiento de la fibra desde la matriz de tierra luego que se ha desarrollado la fisura.

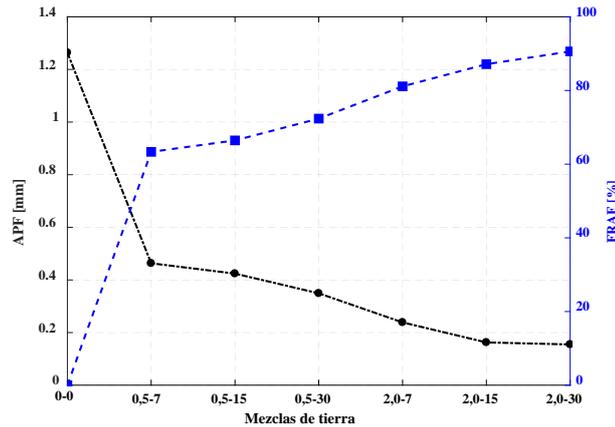


Figura 4. Valores de AFP (eje izquierdo) y FRAF (eje derecho) de las mezclas de tierra

La figura 5 muestra los valores promedio y las barras de error (una desviación estándar arriba y abajo los promedios) de la energía de impacto acumulada al colapso de cada mezcla de tierra. Se puede observar un aumento consistente en la energía requerida para colapsar los especímenes cuando se adiciona fibra natural, y este aumento es sensible tanto a la dosis como al largo de la fibra. Para las mezclas de tierra 0,5-30 y 2,0-30, la energía de impacto acumulada al colapso es ocho y 47 veces la requerida para colapsar la mezcla de tierra no reforzada (0-0). Incluso el menor aumento en la energía de impacto acumulada al colapso, presentada por la mezcla 0,5-7, es aproximadamente cinco veces la energía requerida para colapsar la mezcla de tierra no reforzada. Los resultados de sensibilidad de dosis y largo de las fibras sobre la resistencia al impacto de las mezclas de tierra son consistentes con los resultados previos de tenacidad flexural y fisuración por retracción por secado. En general, dosis de 2,0% exhibieron un aumento mayor en la resistencia al impacto que las dosis de 0,5%, comparando mismos largos de fibra. Adicionalmente, cuando se aumenta el largo de la fibra, el aumento en la energía de impacto acumulada al colapso crece rápidamente, en especial para la dosis de 2,0% de fibras. Diferente a los resultados de resistencia a flexión, la variabilidad en los resultados de impacto fue menor comparada a su rápido crecimiento en los valores promedios cuando se aumenta las dosis de fibra. Lo anterior puede ser explicado por el hecho que la resistencia la impacto depende principalmente del comportamiento post carga máxima de los materiales, donde las fibras contribuyen al traspaso de carga por su efecto de puente entre las fisuras, mientras la resistencia a flexión está dominada principalmente por el comportamiento de la matriz de tierra y las fibras pueden actuar como una discontinuidad, más aún al no estar homogéneamente distribuidas.

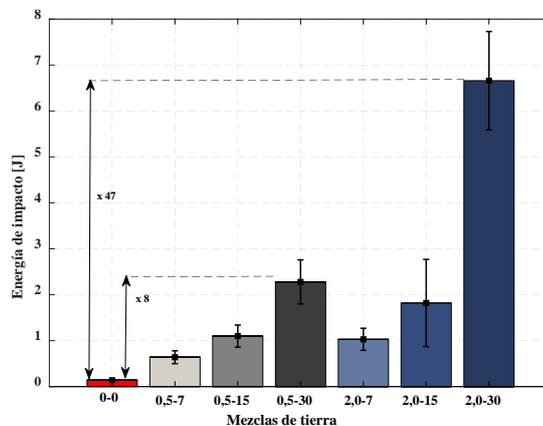


Figura 5. Energía de impacto acumulada al colapso

## 4 CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó la efectividad de incorporar una nueva fibra natural, pelo de cerdo, en las propiedades mecánicas y de fractura de mezclas de tierra. El plan experimental evaluó dos dosis de fibra (0,5% y 2,0% de peso de fibra seca con respecto al peso de suelo arcilloso seco) y tres largos de fibra (7 mm, 15 mm y 30 mm). El programa experimental evaluó resistencias a flexión, tenacidad flexural, fisuración por retracción por secado y resistencia al impacto de mezclas reforzadas con la nueva fibra propuesta y de una mezcla patrón no reforzada, siendo las principales conclusiones las siguientes:

La resistencia a flexión fue reducida con la incorporación de la fibra natural, llegando a reducciones de hasta un 30% con respecto a la tierra no reforzada, y estas reducciones ocurrieron principalmente para la dosis alta (2%) de fibra y las fibras largas (15 mm y 30 mm). Las posibles explicaciones para estas reducciones de resistencia son dos: (i) la porosidad generada por la formación de cúmulos de fibras concentrados en ciertos lugares de la matriz debido a una deficiente uniformidad de la fibra en la matriz, y (ii) la tortuosidad generada en las mezclas.

Los índices de tenacidad flexural aumentaron con la incorporación de la fibra natural, y este aumento fue sensible tanto a las dosis como a los largos de las fibras naturales. La mezcla no reforzada se comportó como un material frágil bajo carga flexural.

La fisuración por retracción por secado fue reducida con la incorporación de la fibra natural, especialmente en dosis alta (2%) y largos mayores (30 mm), posiblemente debido a las mayores cargas de arranque que requiere la fibra desde la matriz. El mayor valor de APF fue obtenido por la tierra no reforzada alcanzando 1,3 mm, mientras que el menor valor lo obtuvo la mezcla de tierra 2,0-30 con un APF de 0,15 mm, que corresponde a un valor de FRAF de 91% con respecto a la mezcla de tierra no reforzada.

Con respecto a la resistencia al impacto, sus valores fueron altamente sensibles a las dosis y largos de las fibras naturales. Para las mezclas de tierra 0,5-30 y 2,0-30, la energía de impacto acumulada al colapso fue ocho y 47 veces la energía requerida para colapsar la mezcla de tierra no reforzada. Incluso el menor incremento de energía de impacto, obtenido por la mezcla de tierra 0,5-7, fue aproximadamente cinco veces la energía requerida para colapsar la mezcla de tierra no reforzada.

Finalmente, la mezcla de tierra 0,5-7 es recomendada por este estudio para la posible fabricación de adobes ya que presenta un desempeño mejorado en términos de tenacidad flexural, fisuración por retracción por secado y resistencia al impacto sin presentar una reducción estadísticamente significativa a flexión comparado con la mezcla de tierra no reforzada.

## 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: *2<sup>nd</sup> International Conference on Bio-Based Building Materials and 1<sup>st</sup> 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 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.

Aymerich, F.; Fenu, L.; Meloni, P. (2012). Effect of reinforcing wool fibres on fracture and energy absorption properties of an earthen material. *Construction and Building Materials*, 27(1), 66-72.

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 Design*, 83, 813–819.

Galán-Marín, C.; Rivera-Gómez, C.; Petric, J. (2010). Clay-based composite stabilized with natural polymer and fibre. *Construction and Building Materials*, 24(8), 1462-1468.

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.

Iberwaste (2015). Disposal and valorization of Iberian pig wastes from slaughterhouses, LIFE11 ENV/ES/000562.

Millogo, Y.; Morel, J. C.; Aubert, J. E.; Ghavami, K. (2014). Experimental analysis of pressed adobe blocks reinforced with Hibiscus cannabinus fibers. *Construction and Building Materials*, 52, 71–78.

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.

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.

Yetgin, Ş; Çavdar, Ö.; Çavdar, A. (2008). The effects of the fiber contents on the mechanic properties of the adobes. *Construction and Building Materials*, 22(3), 222-227.

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 el uso de sus laboratorios para la ejecución de parte del programa experimental ejecutado.

## **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.

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.

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.

Úrsula Reidel, magister en patrimonio sustentable de University College London (UK), y constructor civil por la Pontificia Universidad Católica de Chile. Actualmente es la jefa de ventas segmento producción de hormigón de la empresa Sika S.A. Chile. Sus intereses de investigación son el diseño e implementación de soluciones químicas para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de materiales de construcción cementicios.

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.