



# EFFECTO DE DOSIS Y LARGOS DE FIBRAS DE YUTE EN DESEMPEÑO MECÁNICO Y DE FRACTURA DE TIERRA REFORZADA

Gerardo Araya-Letelier<sup>1</sup>; Federico C. Antico<sup>2</sup>; José Concha-Riedel<sup>3</sup>;  
Úrsula Reidel<sup>4</sup>; Andrés Glade<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>5</sup>aglade@alumnos.uai.cl

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

**Palabras clave:** tierra reforzada con yute, resistencia flexural, fisuración por retracción, resistencia al impacto

## Resumen

Propiedades como tenacidad flexural, resistencia al impacto y fisuración por retracción por secado de materiales de construcción en base a tierra pueden ser mejoradas con la adición controlada de fibras. Sin embargo, existen escasos estudios que evalúen cuantitativamente el impacto del uso de fibras en estas propiedades de fractura en mezclas de tierra reforzada. El presente estudio experimental investiga el uso de la fibra de yute, fibra natural obtenida de plantas, como refuerzo en mezclas de tierra. Se incluye un análisis de sensibilidad del desempeño mecánico y de fractura de la tierra reforzada con yute ante distintas dosis y largos de fibra. Se confeccionaron especímenes de tierra no reforzada y de tierra reforzada utilizando dos dosis (0,5% y 2% de peso de fibra de yute seca con respecto al peso de suelo seco) y tres largos (7 mm, 15 mm y 30 mm) de fibra. Se caracterizó el comportamiento mecánico (resistencia a la flexión y tenacidad flexural) y de fractura (fisuración por retracción por secado y resistencia al impacto) de los especímenes reforzados y no reforzados. Los especímenes reforzados presentaron un aumento en la resistencia a la flexión de hasta un 138% e índices de tenacidad flexural de hasta 14 veces los valores obtenidos por especímenes no reforzados. Con respecto a los ensayos de fisuración, los especímenes reforzados presentaron reducciones de fisuración de hasta un 86% con respecto a los especímenes no reforzados. Finalmente, las resistencias al impacto se incrementaron por sobre 280 veces debido al refuerzo de yute.

## 1 INTRODUCCIÓN

La tierra es uno de los primeros materiales de construcción utilizados por la humanidad, con usos documentados desde la edad del bronce medio, siglo XIV A.C. (Atzeni et al, 2007). La construcción en base a tierra aún es muy frecuente en países en vías de desarrollo, donde aún un 50% de la población de estos países vive en edificaciones en base a tierra (Minke, 2009). En lo referente a países desarrollados, si bien la construcción con tierra ha sido desplazada por materiales de construcción industrializados (Cataldo-Born; Araya-Letelier; Pabón, 2016), aun en estos países se puede encontrar construcción con materiales y técnicas en base a tierra para restaurar edificaciones antiguas (Achenza; Fenu, 2006).

A pesar de que la construcción con tierra se está volviendo nuevamente atractiva por factores tales como su bajo impacto ambiental y su confort, este material es usualmente reforzado para mejorar sus propiedades, siendo estos refuerzos tradicionalmente fibras de origen natural (Laborel-Préneron et al., 2016).

Con respecto al refuerzo con fibras en mezclas de tierra para producción de adobe, la fibra de yute destaca como una de las más económicas (Faruk et al., 2012), siendo Bangladesh, India y China los mayores productores (Bordoloi; Garg; Sekharan, 2017). El uso de yute como fibra de refuerzo en suelos ha tenido interesantes aplicaciones. Aggarwal y Sharma (2011) investigaron el efecto de diferentes dosis, diámetros y largos de fibras de yute en los

resultados de ensayos de compactación Proctor y de capacidad de soporte CBR (por su nombre en inglés, California bearing ratio) encontrando que la incorporación de fibras de yute reduce la densidad seca máxima, aumenta el contenido de humedad óptimo del suelo, e incrementa en hasta un 250% el valor del CBR en comparación al suelo sin fibras. Singh y Bagra (2013) también evaluaron el efecto de la incorporación de fibras de yute en suelos, encontrando que los suelos reforzados con yute tuvieron valores de CBR de hasta un 200% del valor del CBR del suelo sin fibras de yute. Con respecto al uso de fibras de yute en mezclas de tierra para producción de bloques y morteros, si bien existe una menor cantidad de investigaciones comparadas al uso de yute en estabilización de suelos, también hay aplicaciones interesantes con resultados prometedores. Islam y Iwashita (2010) estudiaron el desempeño a compresión de bloques de tierra reforzados con yute, cáñamo y paja, junto al desempeño sísmico de muros a escala, construidos con bloques reforzados con las fibras mencionadas, encontrando que el refuerzo con yute era el óptimo ya que no redujo la resistencia a compresión e incrementó significativamente la tenacidad de los bloques y mejoró el desempeño sísmico de los muros a escala. Saleem, Abbas e Haider (2016) estudiaron la incorporación de fibras de yute en bloques de tierra compactada, encontrando resistencias a compresión de hasta 2,75 veces los valores obtenidos en bloques sin fibra y realizando un análisis de costos entre bloques de tierra compactados reforzados con yute y ladrillos cerámicos, concluyendo que el uso de bloques de tierra compactada reforzados con yute era una solución más económica frente a ladrillos cerámicos en lugares rurales.

A pesar de la contribución de las investigaciones mencionadas sobre el uso de fibras de yute en estabilización de suelos y refuerzos de adobe, propiedades importantes como tenacidad flexural, fisuración por retracción por secado y resistencia al impacto no han sido estudiadas.

La novedad de esta investigación reside en el estudio cuantitativo de propiedades mecánicas y de fractura de adobe reforzado con fibras de yute, evaluando el impacto de diferentes dosis y largos de fibras en estas propiedades. Este estudio llamará genéricamente mezclas de tierra a la combinación de suelo arcilloso, agua y fibras de yute, y estas mezclas podrían ser utilizadas para la fabricación de adobes y/o morteros en base a tierra. Los objetivos de este estudio son evaluar cuantitativamente el impacto de diferentes dosis y largos de fibra de yute 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 presente estudio utilizó un suelo arcilloso para confeccionar las mezclas de tierra y este suelo fue obtenido desde Peñalolén (comuna ubicada al sur de Santiago, Chile). La caracterización de este suelo fue previamente realizada por Araya-Letelier et al (2018), determinando la distribución del tamaño de partículas del suelo arcilloso de acuerdo a las normas ASTM D7928 (2017) y ASTM D6913 (2017) y resultando contenidos de arcilla, limo y arena de 11%, 69% y 20%, respectivamente. Los límites de Atterberg (líquido y plásticos), el índice de plasticidad, y el peso específico de las partículas sólidas también fueron determinados por Araya-Letelier et al (2018), siendo estos valores 29,1%, 17,4%, 11,7% y 2.507 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente.

### **2.2 Fibra de yute**

Daniel et al (2002) reportó algunas de las características morfológicas, físicas y mecánicas más importantes de la fibra de yute tales como su diámetro (0,102 mm a 0,203 mm), gravedad específica (1,02 a 1,04), resistencia a tracción (250 MPa a 350 MPa), y módulo de elasticidad (25.990 MPa a 31.992 MPa).

La fibra de yute utilizada en este estudio fue comprada en forma de cuerda de 2,5 mm de diámetro, la cual fue cortada obteniendo tres largos distintos (7 mm, 15 mm y 30 mm) que

permitieron evaluar el impacto de diferentes largos y dosis de yute en el desempeño de las mezclas de tierra. Las fracciones cortadas de la cuerda de yute fueron manualmente tratadas para separar las fibras individuales de yute de la cuerda constituyente, resultando fibras como la mostrada en la figura 1.

Considerando el rango de diámetros (0,102 mm a 0,203 mm) reportados por Daniel et al. (2002) y los tres largos usados en este estudio (7 mm, 15 mm, y 30 mm), los rangos de las razones de aspecto obtenidas son: (i) 34,4-68,6; (ii) 73,9-147,1; y (iii) 141,7-294,1 para los largos de 7 mm, 15 mm, y 30 mm, respectivamente.

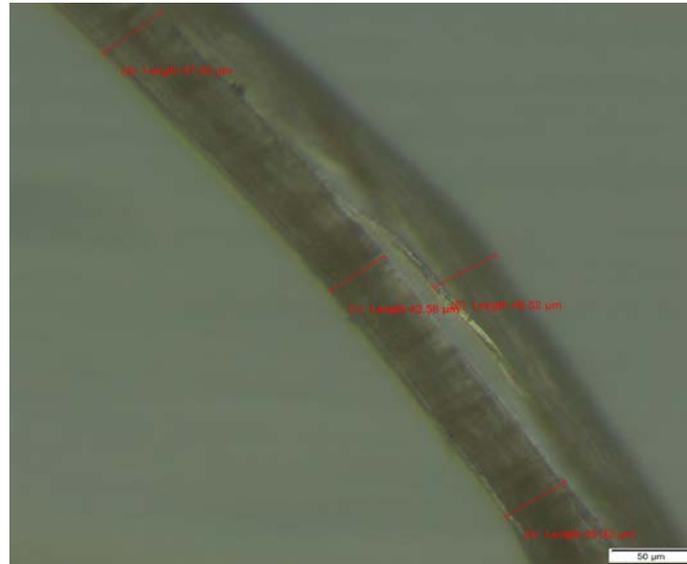


Figura 1. Microscopía de fibra de yute usada en este estudio

### 2.3 Mezclas de tierra y confección de especímenes

Por cada 10 kg de suelo arcilloso (secado en horno) se agregaron 3,07 kg de agua para la confección de las mezclas de tierra, lo que equivale a una razón de agua-suelo de 0,307.

Para analizar el efecto de distintas dosis y largos de yute como fibra de refuerzo de tierra, siete tipos de mezclas fueron confeccionadas por el presente estudio. En primer lugar, una mezcla de tierra no reforzada, la cual fue comparada a otras seis mezclas que incorporaban dos dosis de fibras de yute (0,5% y 2% en peso de fibras de yute con respecto a peso de suelo arcilloso seco) y tres largos (7 mm, 15 mm, y 30 mm). Las mezclas de tierra reforzadas con yute (que se incorporaron en condición seca de horno) tuvieron una corrección agregando agua adicional equivalente al 115% (equivalente a la absorción de la fibra determinada en este estudio) 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 que indica un 2% de dosis de fibras de 30 mm de largo.

El presente estudio realizó un mezclado manual, donde las fibras de yute fueron previamente mezcladas con la tierra para obtener una mezcla homogénea antes de 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 viguetas RILEM (40 mm x 40 mm x 160 mm) para evaluar resistencia a la flexión e 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 superficie rugosa para aumentar la fricción entre la mezcla de tierra y el plato, y por lo tanto

incrementar la ocurrencia de fisuración por retracción por secado. Las viguetas RILEM (i y ii) fueron 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 130 mm entre apoyos. Se utilizó un protocolo de carga basado en un desplazamiento de 1 mm/minuto. Las resistencias individuales a flexión se calcularon usando la ecuación 1.

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

Donde:

- $\sigma_f$ : 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 estándar.

El presente estudio estima la tenacidad flexural de acuerdo a la norma ASTM C1018 (1997), calculando índices de tenacidad flexural. 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 evaluados siete días posterior a su confección, midiendo los anchos y largos de cada fisura obtenida. Posteriormente, se calculó un ancho promedio de fisuras (APF) para cada mezcla de tierra 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 de yute 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 posterior a su confección 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 de yute en las propiedades mecánicas de las mezclas de tierra

La tabla 1 presenta los valores promedios y las desviaciones estandar de las resistencias a flexión de cada mezcla de tierra a 28 días. Los resultados promedios varían entre 0,37 MPa (mezcla 0-0) y 0,88 MPa (mezcla 2,0-30), y las dispersiones medidas mediante las desviaciones standar varían entre 0,05 MPa (mezcla 0,5-7) y 0,19 MPa (mezcla 2,0-30). Si bien la resistencia promedio a flexión en las mezclas reforzadas con yute aumentó en hasta un 138% con respecto al promedio de la mezcla de tierra no reforzada, debido a la alta variabilidad de los resultados, es bueno hacer el siguiente análisis. Si se suma la desviación estandar al promedio de la resistencia a flexión obtenido por la mezcla 0-0, se obtiene un valor de 0,45 MPa, el cual aún es significativamente menor al valor obtenido al restar la desviación estandar al promedio de la resistencia a flexión obtenido por la mezcla 2,0-30, cifra que alcanzaría 0,69 MPa. Lo anterior se cumple para todas las dosis de 2% de yute, siendo un indicador que el refuerzo de fibras yute en altas dosis tiene un impacto positivo al aumentar la resistencia a flexión, lo cual se puede deber a una distribución homogénea de las fibras en la matriz de tierra, junto a una adecuada adherencia entre las fibras y la matriz.

Tabla 1. Estadísticas de resistencia a flexión e índices de tenacidad flexural de cada mezcla de tierra

Mezcla	Resistencia a flexión (MPa)		$I_5$		$I_{10}$		$I_{20}$	
	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>	Prom. <sup>1</sup>	Des. St. <sup>2</sup>
0-0	0,37	0,08	1,16	0,14	1,16	0,14	1,16	0,14
0,5-7	0,48	0,05	6,28	5,47	9,85	5,78	13,64	4,30
0,5-15	0,51	0,07	4,38	0,80	7,98	1,93	12,45	3,81
0,5-30	0,45	0,09	3,76	0,97	5,84	2,74	8,24	5,82
2,0-7	0,71	0,06	3,50	0,24	5,10	0,59	6,23	1,08
2,0-15	0,76	0,08	3,54	0,73	5,32	1,62	6,71	2,61

2,0-30	0,88	0,19	3,10	0,32	4,29	0,63	4,82	1,10
--------	------	------	------	------	------	------	------	------

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

La figura 2 muestra curvas representativas de la relación de fuerza-deflexión obtenida para una viga RILEM de cada una de las mezclas de tierra (similares curvas fueron obtenidas para las cinco vigas RILEM restantes de cada mezcla de tierra). Se puede apreciar que inicialmente la carga aumenta con una pendiente de carga-desplazamiento muy similar para la mezcla de tierra no reforzada y las mezclas reforzadas con dosis de yute de 0,5%. Este comportamiento se mantiene 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 no reforzada y reforzada en dosis baja (0,5%) depende principalmente del comportamiento frágil de la matriz de tierra. Con respecto a las mezclas de tierra reforzadas con una dosis alta (2%), estas presentan un incremento no-lineal de carga luego de la fisuración inicial y una disminución gradual de la carga una vez alcanzada la resistencia máxima. 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).

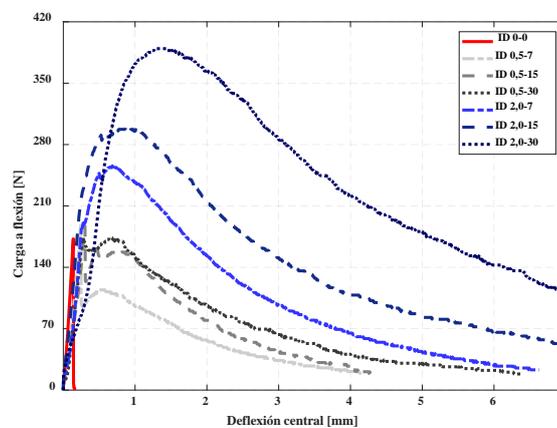


Figura 2. Curvas típicas fuerza-deflexión

Con respecto a los valores promedios y las desviaciones estándar obtenidos para los índices de tenacidad flexural de cada mezcla, estos también son mostrados en la tabla 1. La mezcla de tierra no reforzada (0-0) alcanzó valores de índices de tenacidad flexural ( $I_5$ ,  $I_{10}$  e  $I_{20}$ ) de 1,16, 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, las mezclas de tierra reforzadas con 0,5% de fibra de yute 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. Con respecto a las mezclas reforzadas con dosis de 2% de yute, estas exhibieron una disminución gradual de la carga máxima posterior a alcanzar su máxima resistencia a flexión, actuando como materiales compuestos cuasi-frágiles.

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

La figura 3 muestra los resultados de fisuración por retracción por secado para un espécimen plano por cada tipo de mezcla de tierra, siete días posterior a su confección. Puede observarse que la fisuración por retracción por secado fue reducida significativamente al incorporar fibra de yute.

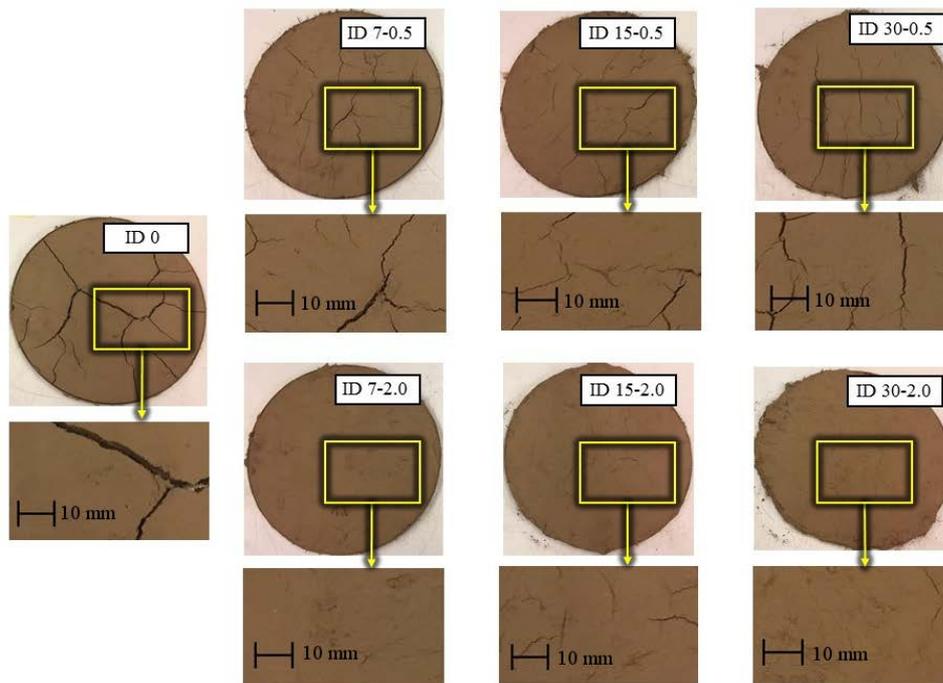


Figura 3. Resultados de fisuración por retracción por secado

La figura 4 muestra los valores resultantes de APF, en el eje de la izquierda, y de FRAF, en el eje de la derecha, para cada mezcla de tierra. Puede observarse que la mezcla 0-0 alcanzó un valor de APF de 0,84 mm, existiendo una reducción considerable de los valores de APF en las mezclas reforzadas con yute en comparación a la mezcla no reforzada. En particular, la mezcla 2,0-30 obtuvo un valor de APF de 0,13 mm, el cual corresponde a un valor de FRAF de 86%. Es importante destacar que la disminución de la fisuración fue sensible a la dosis de fibras (las reducciones de fisuración de generadas por dosis de 2% son significativamente mayores a las reducciones generadas por dosis de 0,5% de yute), pero no fue sensible al largo de la fibra ya que, para una misma dosis, los valores de APF y FRAF son casi equivalentes.

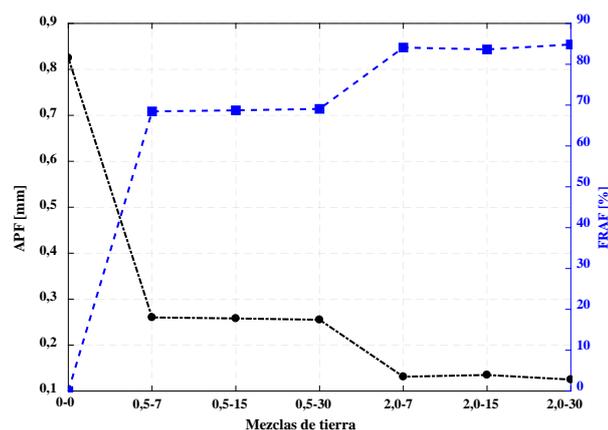


Figura 4. Valores de AFP (eje izquierdo) y FRAF (eje derecho) de las mezclas de tierra

La figura 5 muestra los valores promedios 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. Puede ser observado que al aumentar las dosis y largos de las fibras, la energía de impacto absorbida también aumenta. La mezcla de tierra 0,5-7 y 2,0-30 presentan resultados promedios de 2,17 J y 45J (16 y 281 veces la energía requerida para colapsar la mezcla de tierra no reforzada). Como ha sido planteado por Araya-Letelier et al (2017a; 2017b; 2017c), se espera que las resistencias al impacto sean incrementadas en materiales cuasi-frágiles, como morteros cementicios, con la incorporación de fibras. Similar

a los morteros cementicios, las mezclas de tierra pueden ser consideradas como materiales cuasi-frágiles y, en consecuencia, es esperable que la incorporación de fibras mejore su capacidad de absorber energía.

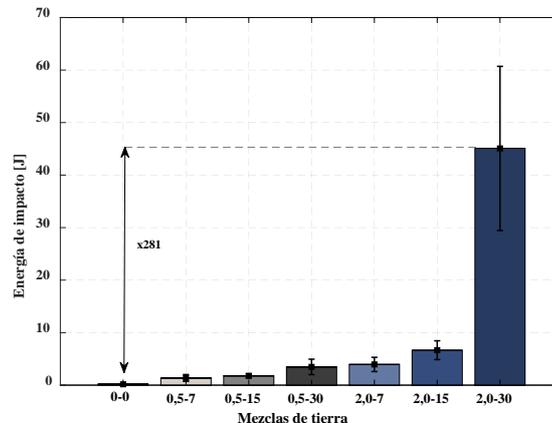


Figura 5. Energía de impacto acumulada al colapso

#### 4 CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó la efectividad de incorporar fibras de yute en las propiedades mecánicas y de fractura de mezclas de tierra. El plan experimental evaluó dos dosis de fibra (0,5% y 2% 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 yute y de una mezcla patrón no reforzada, siendo las principales conclusiones las siguientes:

La resistencia a flexión fue aumentada en hasta un 138% con la incorporación de yute en las mezclas de tierra, lo cual indicaría una distribución homogénea de las fibras en la matriz de tierra y una buena adherencia entre las fibras y la matriz. Con respecto a la tenacidad flexural, los índices de tenacidad flexural de las mezclas de tierra reforzadas con yute fueron hasta 13 veces los valores obtenidos por la mezcla no reforzada. Adicionalmente, para dosis de 2% de yute, las mezclas reforzadas se caracterizaron por un comportamiento cuasi-frágil a flexión, donde la carga a flexión disminuyó de manera gradual luego de alcanzar la resistencia máxima.

La fisuración por retracción por secado fue reducida significativamente con la incorporación de la fibra de yute, donde la mezcla no reforzada presentó un valor de APF de 0,84 mm, valor que fue disminuido hasta 0,13 mm en la mezcla 2,0-30 (valor de FRAF equivalente a 86%). La reducción de la fisuración fue sensible principalmente a la dosis de la fibra.

La absorción de energía por impacto fue considerablemente aumentada con la incorporación del yute. La dosis y largo más pequeños (mezcla 0,5-7) presentó un incremento de hasta 16 veces la energía de impacto absorbida por la mezcla 0-0, mientras la mezcla con la dosis y largo mayores (mezcla 2,0-30) presentó un valor de 281 veces la energía de impacto absorbida por la mezcla 0-0.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achenza, M.; Fenu, L. (2006). On earth stabilization with natural polymers for earth masonry construction. *Materials and Structures*, 39(1), 21-27.
- Aggarwal, P.; Sharma, B. (2011). Application of jute fiber in the improvement of subgrade characteristics. *International journal on transportation and urban development*, 1(1), 56.
- Araya-Letelier, G.; Antico, F. C.; Parra, P. F.; Carrasco, M. (2017a). Fiber-reinforced mortar incorporating pig hair. *Advanced Engineering Forum*, Trans Tech Publications, 21, 219-225.

- 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
- Atzeni, C.; Pia, G.; Sanna, U.; Spanu, N. (2008). Surface wear resistance of chemically or thermally stabilized earth-based materials. *Materials and Structures*, 41(4), 751-758.
- Bordoloi, S.; Garg, A.; Sekharan, S. (2017). A review of physio-biochemical properties of natural fibers and their application in soil reinforcement. *Advances in Civil Engineering Materials*, 6(1), 323-359.
- 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.
- Daniel, J. I.; Ahmad, S. H.; Arockiasamy, M.; Ball, H. P. et. al. (2002). State-of-the-art report on fiber reinforced concrete Reported by ACI Committee 544; Farmington Hills, MI.
- Faruk, O.; Bledzki, A. K.; Fink, H. P.; Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000-2010. *Progress in polymer science*, 37(11), 1552-1596.
- Islam, M. S.; Iwashita, K. (2010). Earthquake resistance of adobe reinforced by low cost traditional materials. *Journal of Natural Disaster Science*, 32(1), 1-21.
- Laborel-Préneron, A.; Aubert, J. E.; Magniont, C.; Tribout, C.; Bertron, A. (2016). Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review. *Construction and Building Materials*, 111, 719-734.
- Mindess, S.; Young, J.F.; Darwin, D. (2002). *Concrete* (2nd Edition), Prentice Hall.
- Minke, G. (2009). *Building with earth: design and technology of a sustainable architecture*. Walter de Gruyter.
- Singh, H. P.; Bagra, M. (2013). Improvement in CBR value of soil reinforced with jute fiber. *International journal of innovative research in science, engineering and technology*, 2(8), 3447-3452.
- Saleem, M. A.; Abbas, S.; Haider, M. (2016). Jute fiber reinforced compressed earth bricks (FR-CEB)– A sustainable solution. *Pakistan Journal of Engineering and Applied Sciences*, 19, 83-90.

## 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.

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