

Comportamiento volumétrico y evolución de los parámetros de resistencia de relaves de oro reforzados con fibra de polipropileno homogéneamente distribuida

J.M.S. GIRA^{a,1}, M.D.T. CASAGRANDE^b y L.Y.R. BARRAGÁN^a

^a*Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil*

^b*Universidade de Brasília, Brasília, Brasil*

Resumen. En el proceso de obtención de oro por cianuración se generan relaves que son filtrados y colocados en terraplenes que alcanzan hasta 50 m. de altura. Los relaves pierden las propiedades geotécnicas de la roca madre por el intenso desgaste físico y químico al que es sometida la roca para retirar el mineral, esta drástica reducción en los parámetros de resistencia hace que los taludes de los terraplenes conformados con este material sean vulnerables a deslizamientos. Los geosintéticos planos son comúnmente utilizados como refuerzo de terraplenes por su alto desempeño y fácil colocación, sin embargo, pueden generar planos de falla entre las capas que se rigidizan durante la compactación. La literatura indica que para alcanzar una mejora isotrópica de la resistencia, el refuerzo por adición de fibras discretas es ideal porque mejora la distribución de tensiones en la matriz sin empaquetar las capas de relave. Este trabajo analiza la evolución de los parámetros de resistencia pico y residual de relaves de oro reforzados con fibras de polipropileno mediante ensayos de corte directo convencional y de plano cortado con superficie pulida utilizando tensiones normales de 25, 50, 100, 200 y 400 kPa. El contenido de fibras fue de 0,5% del peso seco de la matriz. Los resultados muestran un comportamiento esfuerzo-deformación bi-lineal del relave sin refuerzo, mientras que las muestras reforzadas presentan una reducción de esta bi-linealidad uniformizando el comportamiento para todos los niveles de esfuerzo, incrementando el ángulo de atrito pico y residual y cambiando la tendencia volumétrica contractiva a dilatante. Este refuerzo es recomendable para el tratamiento de zonas críticas en terraplenes de relave afectados por fallas locales.

Palabras Clave. Relave de oro, fibra de polipropileno, corte directo, plano cortado.

1. Introducción

Una explotación a cielo abierto para la obtención del oro que se considera en promedio como rentable, desplaza 7.7 toneladas de material por cada onza de oro, generando después del proceso, un gran volumen de relaves. Según el U.S. Geological Survey [1], Perú es el sexto productor de oro a nivel mundial y el primero en América Latina, esto a pesar del beneficio económico genera el problema de encontrar espacio para colocar los relaves debido a la muy accidentada geografía en zonas alto andinas [2].

¹ PhD Student, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro, Rua Marquês de São Vicente 225, Gávea, Rio de Janeiro, Brazil; Email: girao.sotomayor@gmail.com.

El filtrado del relave permite la compactación en terraplenes, sin embargo, estos pueden ser susceptibles a inestabilidades. Para mejorar la resistencia post ruptura de diferentes tipos de suelos se desarrollaron los refuerzos geosintéticos. Los refuerzos de tipo planar (geomallas uniaxiales, biaxiales, triaxiales, etc.) son los más utilizados por su alto desempeño y fácil colocación, no obstante, pueden crear planos de debilidad [3]. El refuerzo ideal debe mantener un incremento isotrópico de la resistencia en toda la matriz. Este trabajo analizó la resistencia de relaves de oro reforzados con fibras de polipropileno, a través de ensayos de corte directo convencional y de plano cortado con superficie pulida para observar los cambios en la resistencia pico y residual del relave reforzado.

2. Características de los materiales

El material procede de un depósito de relaves filtrados localizado en el departamento de La Libertad en Perú. Las muestras con humedad de 14.5% fueron recolectadas por personal de la empresa minera y entregadas para su transporte al Laboratorio de Geotecnia y Medio Ambiente de la Pontificia Universidad Católica de Río de Janeiro.

La gravedad específica de los relaves fue de 3.777. Los límites de Atterberg, líquido (LL) y plástico (LP), fueron 19% y 13% respectivamente. El relave es considerado por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) como un limo con trazos de arcilla de baja plasticidad (ML-CL). Las características de compactación fueron obtenidas utilizando el ensayo dinámico de Proctor Normal. El peso específico aparente seco máximo fue 2.235 g/cm^3 para un contenido óptimo de humedad de 16%.

Los monofilamentos de polipropileno se presentaron en formato de paquetes de fibras que fueron separadas para mezclarse con el relave. El contenido de fibra fue el 0.5% del peso seco del relave siguiendo las recomendaciones de la literatura [4-7].

3. Estudio Experimental

El proceso de la mezcla consistió en colocar primero una capa fina de relave y encima las fibras, para finalizar con otra capa de relave, luego fue colocado el contenido de agua mezclándose el conjunto. Para asegurar la uniformidad de la mezcla, la cantidad total de material fue dividida en 3 partes colocadas en el molde para su densificación. Los cuerpos de prueba fueron tallados utilizando un molde de acero de 100mm x 100mm de lado y 20mm de altura (Figura 1). Los análisis de microscopía de barradura electrónica mostraron que el diámetro de la fibra es mucho mayor que el diámetro promedio de las partículas de relave de oro (Figura 2).

Los parámetros de resistencia fueron determinados por medio de la envolvente de resistencia compuesta por esfuerzos normales verticales de 25kPa, 50kPa, 100kPa, 200kPa y 400kPa. Los ensayos convencionales determinaron el esfuerzo de corte máximo y los ensayos de plano cortado con superficie pulida fueron ejecutados como alternativa para entender los cambios en los parámetros después del corte. La tasa de desplazamiento calculada fue de 0.06 mm/min, con las recomendaciones de Head [8]. Los ensayos de corte directo con plano cortado y superficie pulida se realizan después del ensayo convencional. La caja de ensayos es retirada del equipo y se realiza un corte en la muestra ensayada a lo largo de la interface de las cajas superior e inferior. En el caso reforzado, existen fibras que se encuentran firmes en los segmentos superior e inferior del relave, por lo tanto, se usa una pequeña sierra de acero para cortar aquellas

fibras. Después de que las cajas han sido separadas, con una superficie plana acrílica se pulen las caras expuestas del relave, intentando lograr una superficie lisa. Finalmente, las cajas superior e inferior se colocan nuevamente en contacto realizándose el ensayo.

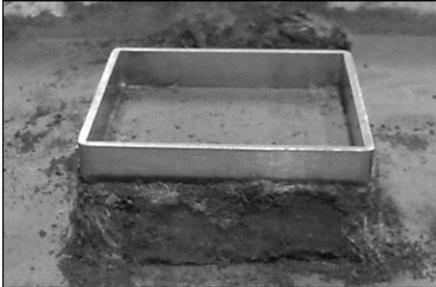


Figura 1. Moldeo del relave de oro.

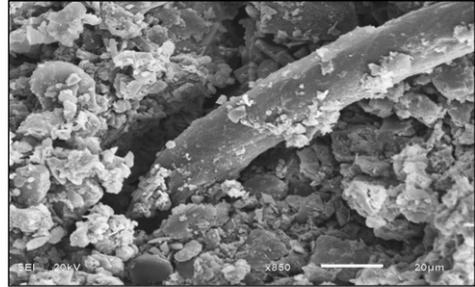


Figura 2. Interacción fibra-relave.

4. Resultados y Análisis

4.1. Comportamiento Esfuerzo de corte – desplazamiento horizontal

En el ensayo convencional las curvas de la Figura 3a muestran que para esfuerzos normales verticales bajos (25kPa y 50kPa), la matriz sin refuerzo inicialmente presenta mayor rigidez que la matriz reforzada. Las fibras generan una mayor cantidad de vacíos porque esos niveles bajos de esfuerzo no contribuyen al aumento de la interacción fibra-matriz, caso contrario, para los esfuerzos altos se verifica en las curvas que el relave reforzado sí posee una mayor rigidez inicial.

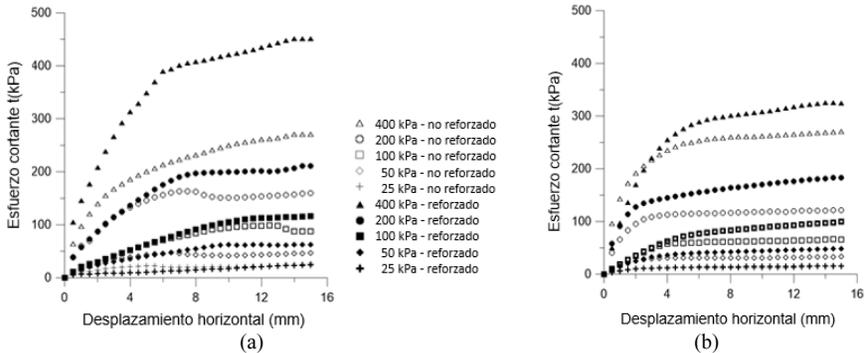


Figura 3. Curvas esfuerzo cortante - desplazamiento horizontal. (a) ensayo convencional (b) ensayo de plano cortado con superficie pulida.

Las muestras no reforzadas sometidas a esfuerzos normales verticales de 100 kPa y 200 kPa, presentan esfuerzos máximos, sin embargo, en estos casos la rigidez inicial de la matriz no reforzada y reforzada fue similar. Para la muestra sometida a 400 kPa, la matriz no reforzada muestra un cambio de comportamiento ya que no existen picos de resistencia, en vez de eso, se muestra un incremento proporcional del esfuerzo de corte con una ligera estabilización al final del ensayo. Se observa que el comportamiento de la

matriz es diferente y dependiente del nivel de esfuerzo normal aplicado. En ninguno de los casos reforzados se presentó una resistencia pico.

En el ensayo de plano cortado con superficie pulida (Figura 3b), no existe un valor pico del esfuerzo de corte obviamente porque el material posee un plano de ruptura previo, pero existe una resistencia comparativamente mayor que en el caso no reforzado.

4.2. Pérdida de la Rigidez inicial

La matriz posee una capacidad limitada para soportar la energía de deformación generada por el desplazamiento horizontal de la caja del ensayo. La matriz presenta inicialmente una rigidez que disminuye con el desplazamiento, la pérdida total de la rigidez inicial es un indicativo directo del inicio de la ruptura de la matriz. En las Figura 4a y 4b, se presenta la evolución de la pérdida de rigidez inicial en la matriz no reforzada y reforzada, respectivamente.

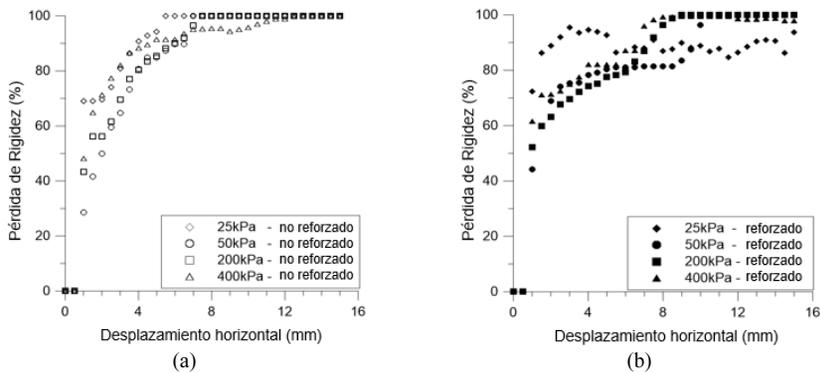


Figura 4. Evolución de la pérdida de rigidez inicial: (a) Relave no reforzado (b) Relave reforzado.

Cuando el esfuerzo normal vertical es aplicado, las fibras ocupan los espacios vacíos haciéndola más densa la matriz, cuando el esfuerzo vertical es menor, las fibras no ocupan estos espacios y no se promueve la interacción con la matriz, produciéndose un efecto adverso, las fibras generan más vacíos, impidiendo un mayor adensamiento de la matriz. En la Figura 4b este comportamiento es observado en el esfuerzo normal vertical de 25 kPa donde la matriz no reforzada pierde el 95% de su rigidez inicial a los 5 mm de desplazamiento, mientras que la matriz reforzada la pierde a los 3 mm. En el caso de esfuerzos mayores a 25 kPa se nota que la adición de fibras retrasa la pérdida de la rigidez inicial. En la tabla 1 se muestran los desplazamientos corresponden a diferentes porcentajes de pérdida de rigidez inicial, se observa que, la matriz reforzada sufre un mayor desplazamiento para perder íntegramente su rigidez inicial.

Tabla 1. Pérdida de rigidez inicial.

Porcentaje de pérdida de rigidez inicial (%)	Desplazamiento horizontal No reforzado (mm)	Desplazamiento horizontal Reforzado (mm)
25	1,0	1,0
50	1,0	1,0
75	2,5	3,0
100	6,0	9,2

4.3. Parámetros de resistencia

En las Figuras 5(a) y 5(b) se presentan las envolventes de resistencia de los ensayos convencional y de plano cortado con superficie pulida, respectivamente.

Cuando no se observó un pico de esfuerzo de corte se adoptó el criterio de De Campos & Carrillo [9], donde se asume que la ruptura es alcanzada cuando la curva esfuerzo-desplazamiento adquiere una inclinación constante o nula.

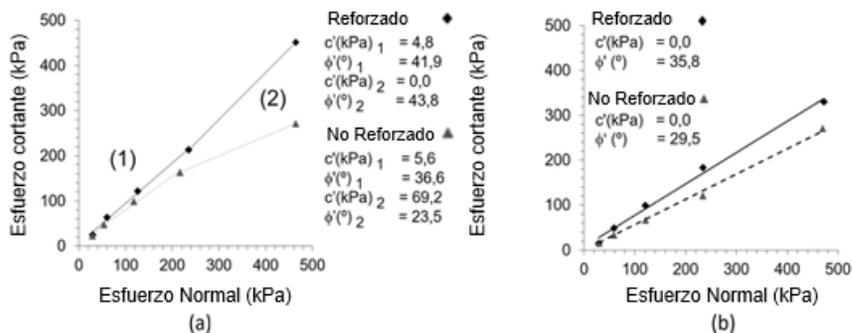


Figura 5. Evolución de la pérdida de rigidez inicial reforzado: (a) Ensayo convencional (b) Ensayo de plano cortado con superficie pulida.

Se observa en el ensayo convencional no reforzado (Figura 5a), que la envolvente de resistencia es bi-lineal a partir de un esfuerzo normal vertical de 200 kPa, mostrando un comportamiento diferente debido a que en esfuerzos mayores existe un reacomodo distinto de la matriz durante el adensamiento. Este comportamiento bilineal es reducido cuando el relave es reforzado, hubo repetitividad de ensayos con el mismo resultado.

En ambos tramos de la envolvente existe un incremento de la resistencia generado por las fibras. La envolvente de resistencia fue separada en los tramos 1 y 2 para definir los esfuerzos bajos y altos, respectivamente. Con el refuerzo, el incremento del ángulo de fricción en el tramo 1 fue de 36,6° para 41,9° y en el tramo 2 de 23,5° para 43,8°. El refuerzo ocasionó una reducción del intercepto cohesivo de 5,6 kPa para 4,8 kPa, no es muy significativa, pero muestra que las fibras evitan la continuidad de la matriz reduciendo la cohesión.

En la Figura 5(b), del ensayo de plano cortado con superficie pulida, se muestra que el intercepto cohesivo es nulo confirmando la ruptura previa de la matriz de relave. Las curvas muestran que no existe bi-linealidad. La adición del refuerzo de fibra incrementa el ángulo de fricción de 29,5° para 35,8°.

4.4. Movilización del ángulo de fricción y del intercepto cohesivo

Las envolventes de resistencia utilizan los valores máximos obtenidos en cada nivel de tensión aplicada, sin embargo, es importante conocer la evolución de los parámetros de resistencia desde el inicio del desplazamiento horizontal. En ese sentido, se realizaron envolventes de resistencia para cada 0,5 mm de desplazamiento horizontal de la matriz no reforzada y reforzada en los dos tipos de ensayos.

En el ensayo convencional, se observó que existe una bi-linealidad en la envolvente de resistencia. En las Figuras 6a y 6b, se presentan los gráficos del comportamiento del ángulo de fricción dividido en esfuerzos bajos y altos, respectivamente.

En esfuerzos bajos (Figura 6a), el relave reforzado tiene una evolución constante del ángulo de fricción al final del ensayo, tanto como el no reforzado. En el relave sin refuerzo se alcanza un ángulo de fricción pico de 36.8° para un desplazamiento de 7.5mm y después se presenta una caída hasta lograr un valor constante de 33.3°.

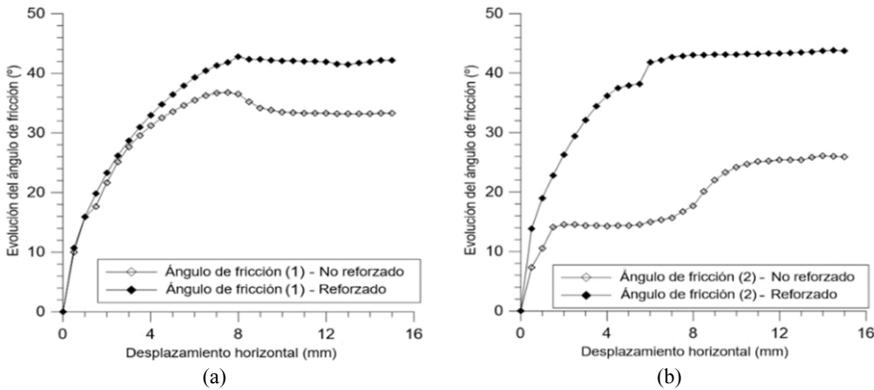


Figura 6. Evolución del ángulo de fricción: (a) Esfuerzos bajos - 25, 50 y 100 kPa, (b) Esfuerzos altos - 200 y 400 kPa.

En el caso reforzado, no existe un ángulo de fricción pico claramente definido, alcanzándose un máximo valor constante de 42° desde 7.5mm de desplazamiento hasta el final del ensayo. En esfuerzos altos (Figura 6b), la evolución del ángulo de fricción no reforzado también alcanza un valor constante al final del ensayo. En el caso reforzado se muestra un valor constante máximo de 43.3° desde 7.5mm de desplazamiento hasta el final del ensayo. En la evolución del intercepto cohesivo (Figura 7), el relave no reforzado alcanza un valor pico de 6.5 kPa en 3.5 mm de desplazamiento y se reduce a 1.4 kPa después de la ruptura, este valor puede considerarse nulo para análisis de estabilidad.

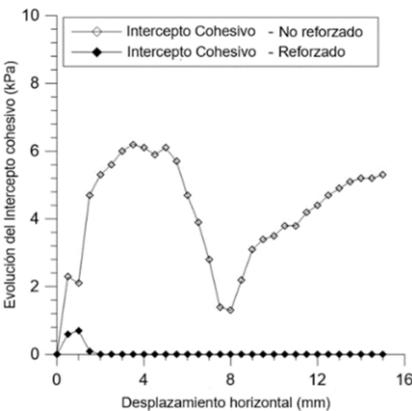


Figura 7. Evolución del intercepto cohesivo. Ensayo convencional.

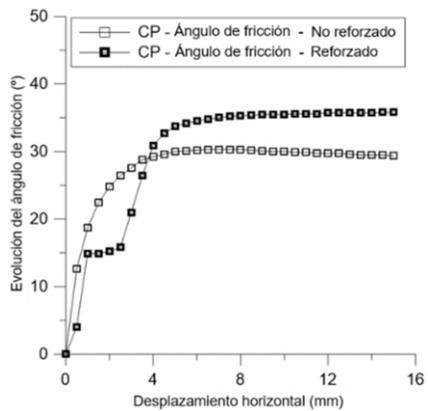


Figura 8. Evolución del ángulo de fricción. Ensayo de plano cortado con superficie pulida.

En el caso reforzado el valor es nulo mostrando que el aporte de la fibra es específicamente en el ángulo de fricción en este tipo de plano de ruptura. En el ensayo

de plano cortado con superficie pulida (Figura 8), el relave puro alcanza un ángulo de fricción pico de 30.3° en 7 mm de desplazamiento y sufre una caída constante hasta llegar a 29.4° al final del ensayo. En el caso del relave reforzado, el ángulo de fricción alcanza un valor de 15° y permanece constante entre 1 y 2.5 mm de desplazamiento hasta llegar a un valor de 35.7° que permanece constante hasta el final del ensayo.

4.5. Variación volumétrica

En el ensayo convencional, las curvas de variación volumétrica no reforzada (Figura 9a), muestran un comportamiento contractivo producto de la compresión vertical normal, sin embargo, cuando se agrega el refuerzo (Figura 9b), el comportamiento pasa de contractivo a dilatante a partir de 6.0 mm de desplazamiento horizontal, hasta el final del ensayo. En el ensayo de plano cortado con superficie pulida (Figura 10a), las curvas muestran que sin refuerzo los desplazamientos permanecen constantes porque la fase residual fue alcanzada. Con refuerzo (Figura 10b) existe un comportamiento dilatante.

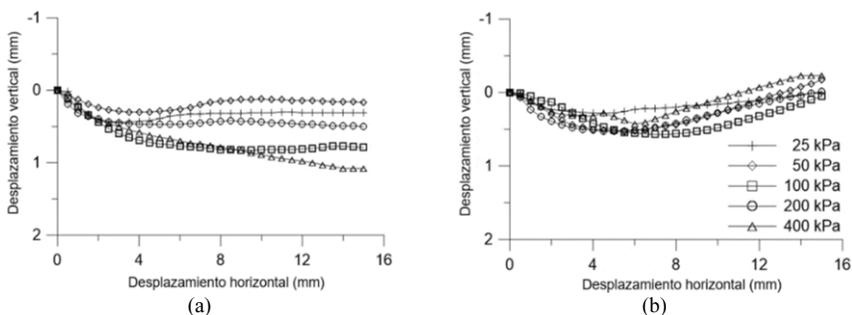


Figura 9. Variación volumétrica: Ensayo convencional: (a) no reforzada (b) reforzada.

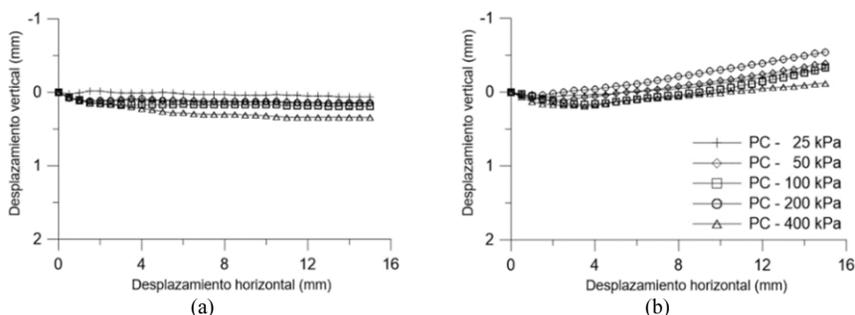


Figura 10. Variación volumétrica: Ensayo de plano cortado con superficie pulida: (a) no reforzada, (b) reforzada.

5. Conclusiones

La resistencia de relaves de oro fue analizada mediante ensayos de corte directo convencional y de plano cortado con superficie pulida en condición inundada, no reforzada y reforzada con fibras de polipropileno. Las conclusiones del trabajo son:

El relave reforzado con 0.5% de fibras de polipropileno, obtiene una resistencia al corte mayor.

El relave no reforzado presenta una envolvente de resistencia con comportamiento bi-lineal, que es separado en un tramo de esfuerzos menores (25, 50 y 100kPa) y un segundo tramo de esfuerzos mayores (200 y 400kPa).

La bi-linealidad es reducida cuando el relave es reforzado. Con la adición de la fibra de polipropileno, los parámetros de resistencia del relave para menores y mayores esfuerzos cambian de 36.6° para 41.9° y de 23.5° para 43.8°, respectivamente.

El intercepto cohesivo disminuye de 5.6 kPa para 4.8 kPa, sin embargo, puede ser considerado como nulo porque en la evolución del intercepto cohesivo se verificó que los valores corresponden a un valor pico, pero que se reducen con el desplazamiento.

El incremento de los parámetros es dado por las fibras que interceptan la superficie de ruptura, que al trabajar a tracción contribuye con una resistencia adicional [10].

En los ensayos de plano cortado con superficie pulida, se verificó un incremento en los parámetros de resistencia de 29.5° para 35.8°, demostrando que después de la ruptura, todavía las fibras ofrecen un incremento en la resistencia.

Las curvas de desplazamientos horizontal y vertical no reforzado muestran un comportamiento totalmente contractivo, sin embargo, cuando es reforzado el comportamiento es contractivo y después cambia a dilatante.

Finalmente, este refuerzo puede ser utilizado en zonas críticas para mantenimiento de taludes inestables de relaves compactados.

Agradecimientos

Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro (PUC-Rio) y Consejo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq), por su soporte técnico y económico.

Referencias

- [1] U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries January, Data de acceso: 17 de março de 2018. www.focus-economics.com/blog/gold-the-most-precious-of-metals-part3, 2018.
- [2] Sotomayor, J.M.G. Avaliação do comportamento mecânico drenado e não drenado de rejeitos de minérios de ferro e de ouro reforçados com fibras de polipropileno. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 184p, 2018.
- [3] Li, C., & Zornberg, J. G., Mobilization of reinforcement forces in fiber-reinforced soil, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 139 (2013), 107-115.
- [4] Consoli, N. C.; Casagrande, M. D. T., Coop, M. R. Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. *Geotechnique*, 57 (2007), 751-756.
- [5] Anagnostopoulos A., Papaliangas T., Konstantinidis D., Patronis C., Shear Strength of Sands Reinforced with Polypropylene Fibers, *Geotechnical and Geological Engineering* 31 (2013), 401-423.
- [6] Consoli, N. C.; Nierwinski, H. P.; da Silva, A. P., Sosnoski, J. Durability and strength of fiber-reinforced compacted gold tailings-cement blends. *Geotextiles and Geomembranes*, 45 (2017), 98-102.
- [7] Sotomayor, J. M. G., & Casagrande, M. D. T. (2018). The Performance of a Sand Reinforced with Coconut Fibers through Plate Load Tests on a True Scale Physical Model. *Soils and Rocks*, 41(3), 361-368.
- [8] K.H. Head, Manual of Soil Laboratory Testing, Wiley, New York, 1998.
- [9] De Campos, T.M.P, Carrillo, C.W., Direct Shear Testing on an Unsaturated Soil from Rio de Janeiro, *Unsaturated Soils* (1995), 31-38.
- [10] Zornberg J.G., Discrete framework for limit equilibrium analysis of fibre-reinforced soil, *Geotechnique* 52 (2002), 593-604.