

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

*The paper was published in the proceedings of XVI Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVI PCSMGE) and was edited by Dr. Norma Patricia López Acosta, Eduardo Martínez Hernández and Alejandra L. Espinosa Santiago. The conference was held in Cancun, Mexico, on November 17-20, 2019.*

# Evolución de los parámetros de resistencia y comportamiento volumétrico de un relave de hierro reforzado con fibras de polipropileno en la condición no drenada

J.M.S. GIRAÓ<sup>a,1</sup> y M.D.T. CASAGRANDE<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil

<sup>b</sup> Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

**Resumen.** Se evaluó la influencia del uso de fibras de polipropileno para reforzar relaves de hierro. La influencia sobre la resistencia y el comportamiento volumétrico fueron evaluados sobre la condición no drenada. Se realizaron ensayos triaxiales consolidados isotrópicamente no drenados (CIU), bajo esfuerzos medios efectivos de 50, 100, 200 y 400 kPa en muestras no reforzadas y reforzadas. Las envolventes de resistencia, muestran que la adición de 0.5% de fibra de polipropileno incrementa el ángulo de fricción de 33.4° a 42.6°, mientras que la variación en el intercepto cohesivo no es muy significativa. En el comportamiento volumétrico, las fibras incrementan la tendencia contractiva inicial de la matriz, ya que ofrecen un confinamiento adicional sobre los granos del relave incrementando la poro presión, sin que ese efecto sea constante. Después del cambio en el comportamiento, en la transferencia de fase, la tendencia dilatante final de la matriz permanece y las fibras se convierten en agentes supresores de esta tendencia por que se continúan extendiendo durante el corte, confinando más partículas. Con respecto a la estructura, el relave no reforzado pierde totalmente la rigidez inicial con una deformación axial de 5%, mientras que muestras reforzadas pierden un 12% de su rigidez, mostrando la ventaja de adicionar las fibras. Las mejoras alcanzadas, hacen de la fibra de polipropileno una alternativa de refuerzo interesante para zonas donde no se consigue colocar refuerzos planares o para mantenimientos de taludes afectados por deslizamientos.

**Palabras Clave.** Relave de hierro, ensayo no drenado, comportamiento volumétrico, fibra de polipropileno, transferencia de fase.

## 1. Introducción

El hierro es un material ampliamente utilizado por lo que su explotación genera grandes cantidades de relaves que deben ser almacenados en lugares seguros. Estos relaves suelen ser contenidos en presas, donde una vez que se alcanza el nivel máximo de almacenamiento, se eleva la corona sucesivamente, algunas veces utilizando el mismo relave de la mina. Investigaciones anteriores muestran que la adición de fibras mejora la resistencia post pico y cambia el comportamiento volumétrico de la matriz, estos

---

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

aspectos son revisados comparando los resultados de relaves de hierro reforzados y no reforzados.

La variación de la poro presión es un factor importante para definir los esfuerzos en el relave, este trabajo evalúa la resistencia al corte y el comportamiento volumétrico bajo condiciones no drenadas que permiten visualizar los cambios en la poro presión. En la condición no drenada, la línea de transformación de fase, es la línea que pasa por el origen del gráfico  $q-p'$  y separa la tendencia volumétrica contractiva de la dilatante usándose para definir los cambios de comportamiento volumétrico en el relave de hierro.

## 2. Características de los materiales

Los relaves de hierro (Figura 1) son previamente filtrados, transportados y adensados, para formar plataformas compactadas. El Sistema Único de Clasificación de Suelos (SUCS), clasifica el relave como una arena limosa (SM). La densidad relativa en el campo fue de 65%, los cuerpos de prueba fueron reconstituidos para ese valor. Una mayor descripción de los relaves es dada por Sotomayor [1]. El relave tiene un pH entre 8.61 - 8.84, alcalino, las fibras de polipropileno poseen resistencia al ataque alcalino, siendo adecuadas como refuerzo. La cantidad de fibra fue 0.5% del peso seco del relave, valor usado en las pesquisas de Consoli et al. [2]; Anagnostopoulos et al. [3]; Consoli et al. [4]; Sotomayor y Casagrande [5].



Figura 1. Relave de mina de Hierro y fibras de polipropileno.

## 3. Estudio Experimental

El desplazamiento en los ensayos triaxiales no drenados fue monitoreado con un transductor de desplazamiento resistivo, tipo LSCDT de 25.4 mm de longitud. La variación volumétrica fue realizada con un transductor de variación de volumen de tipo Imperial College, fabricado en la PUC-Rio [6]. Utilizando las recomendaciones de Head [7] se definió una tasa de 0.032mm/min.

## 4. Resultados y Análisis

### 4.1. Comportamiento Esfuerzo de corte – desplazamiento horizontal

En la Figura 2 se observa que el relave no reforzado alcanza entre 3.0 a 5.5% un esfuerzo desviador normalizado pico que no se presenta en las muestras reforzadas, en las que el

esfuerzo desviador normalizado máximo permanece casi constante desde el 12% a 20%. Las muestras reforzadas muestran un comportamiento plástico bien definido por la interacción fibra-matriz. Sin esfuerzo desviador pico, para determinar un esfuerzo desviador máximo se utilizó el criterio de Campos y Carrillo [8] que asume que el material se rompe cuando la curva  $q$  (kPa) -  $\varepsilon$  (%) tiene una inclinación constante o nula.

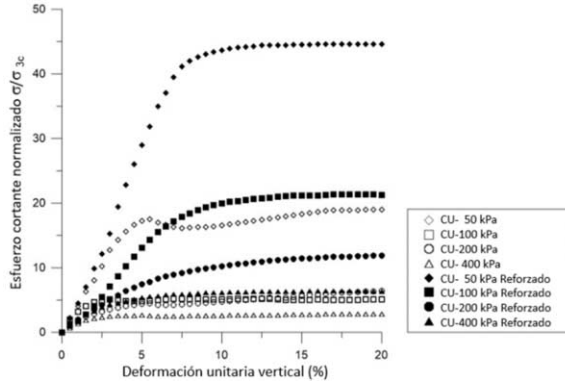


Figura 2. Esfuerzo desviador normalizado.

#### 4.2. Variación de exceso de poro presión

La Figura 3, muestra la variación del exceso de poro presión normalizada, por el esfuerzo efectivo de confinamiento. En muestras no reforzadas, la variación del exceso de poro presión normalizada alcanzó un valor máximo de 0.43 aproximadamente entre 0.20-1.45% de deformación axial, después este valor disminuye de forma considerable.

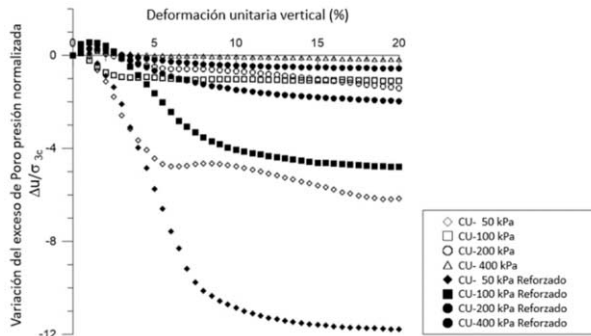


Figura 3. Variación del exceso de poro presión normalizada.

En el inicio del ensayo, el exceso de poro presión aumentó por la tendencia contractiva del relave, en muestras reforzadas, también se presentó la tendencia inicial contractiva, pero con un valor mayor mostrando que las fibras aumentan la poro presión. En el inicio del ensayo, el aumento de la poro presión por la presencia de las fibras, puede presentarse porque, en la condición no drenada, no existen cambios de volumen, por lo tanto, con el incremento de la deformación axial, las fibras están atrapadas entre los granos del relave y se extienden, generando efectos de confinamiento y compresión entre los granos, lo que favorece a la tendencia contractiva y aumenta la poro presión.

La disminución de la poro presión se puede presentar por que la matriz no reforzada tiene una tendencia dilatante al final del ensayo, que es dominante sobre el efecto de compresión de la fibra. Finalmente, con la dilatancia la poro presión disminuye y el esfuerzo medio efectivo aumenta, siendo mayor comparándose con el caso no reforzado como muestra la Figura 4.

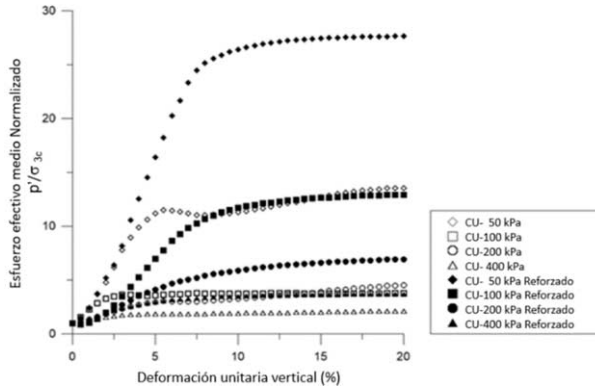


Figura 4. Variación del esfuerzo efectivo medio normalizado.

Las curvas de la Figura 4, muestran que el efecto de la fibra en el esfuerzo efectivo medio es mayor cuando el esfuerzo efectivo de confinamiento es menor. En el relave de hierro reforzado existen dos variables que determinan la tendencia de cambio del volumen: tendencia dilatante de la matriz de relave y la tendencia compresiva de la fibra. En las Figuras 5a y 5b se presentan las tasas de variación del exceso de poro presión normalizada según la deformación axial para las muestras no reforzadas y reforzadas respectivamente.

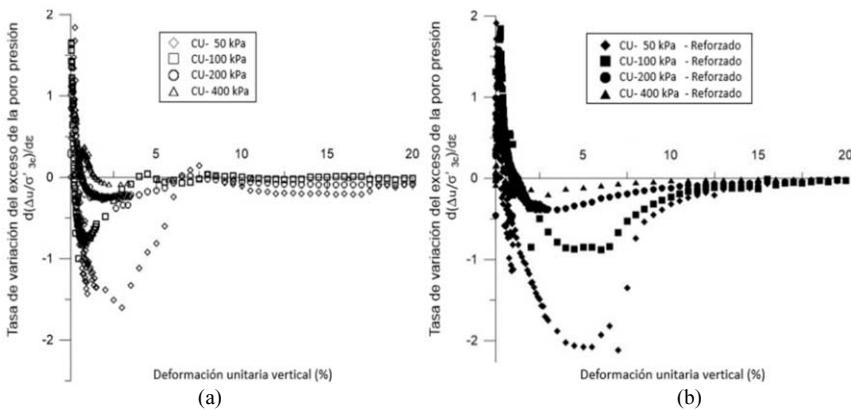


Figura 5. Variación del exceso de poro presión normalizada: (a) relave no reforzado (b) relave reforzado.

### 4.3. Línea de transformación de fase

Si un material granular es sometido a corte no drenado y su ángulo de fricción evoluciona estacionariamente bajo poro presión y esfuerzo constantes, se considera que ese material

alcanzó una condición similar al estado crítico en el triaxial drenado que muestra el estado de volumen constante final [9], [10], [11].

Luong [12] y Vaid y Chern [13], observaron que la evolución del ángulo de fricción en un ensayo drenado es idéntica a la evolución del ángulo de fricción en la transformación de fase en un ensayo no drenado. Se utilizaron los puntos q-p' correspondientes al esfuerzo medio efectivo mínimo, calculando la evolución de los ángulos de fricción mediante:  $\text{sen } \phi' = 3M / (6 + M)$  con  $M = q/p'$ . La Figura 6, muestra la línea de transformación de fase del relave no reforzado y reforzado. Se verificó que independientemente de la adición de la fibra, los puntos coinciden en una recta que pasa por el origen y cuyo ángulo de fricción es  $\phi'_{LTF} = 34.8^\circ$ .

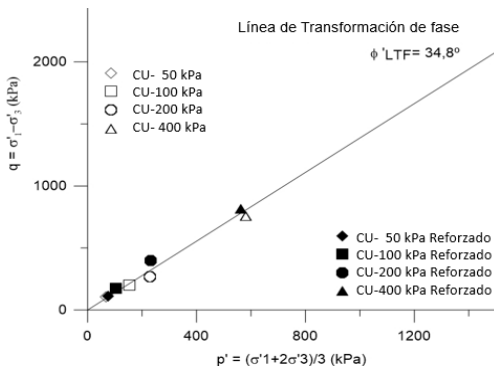


Figura 6. Línea de transformación de fase.

#### 4.4. Movilización de los parámetros de resistencia

En las Figuras 7a y 7b, se presentan las curvas de evolución del ángulo de fricción independiente para cada nivel de esfuerzo efectivo de confinamiento, no reforzado y reforzado respectivamente.

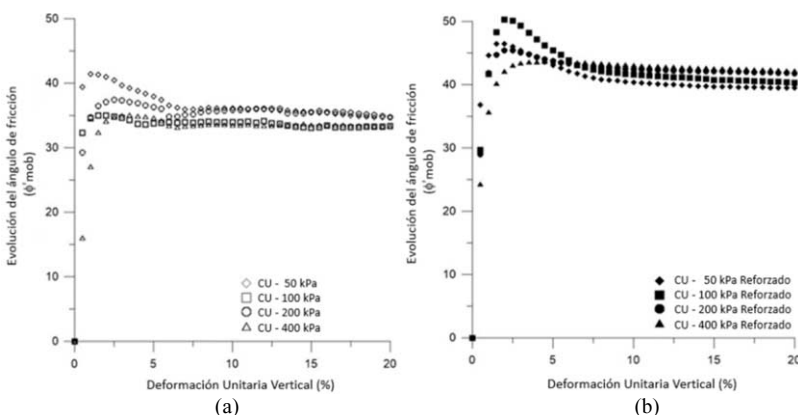


Figura 7. Evolución del ángulo de fricción: (a) relave no reforzado (b) relave reforzado.

En el relave reforzado, después del valor pico, la evolución del ángulo de fricción disminuye hasta el fin del ensayo, pero en ningún caso el valor obtenido en el relave

reforzado fue menor al del relave no reforzado, por lo tanto, las fibras que no fueron arrancadas, se deben extender de forma plástica, ya que, si fuesen arrancadas o fragmentadas, la evolución de los ángulos de fricción disminuiría de manera drástica hasta alcanzar los valores de las muestras no reforzadas [14].

Se utilizó una envolvente, de todos los esfuerzos efectivos de confinamiento, para definir los parámetros de resistencia del relave de hierro. Para definir los puntos q-p', se utilizó el criterio de esfuerzo desviador normalizado pico y el criterio de De Campos y Carrillo [8]. La Figura 8, presenta el diagrama p-q' con las envolventes para las muestra no reforzadas y reforzadas, adicionando la línea de transformación de fase.

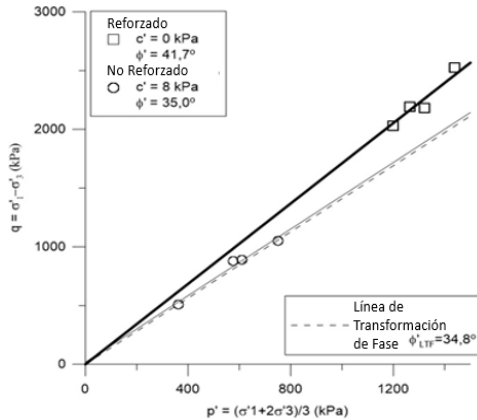


Figura 8. Diagrama p-q' de los esfuerzos efectivos no drenados y la línea de transformación de fase.

Se observa que ambas envolventes están por encima de la línea de transferencia de fase. El relave reforzado presenta una inclinación mayor, por lo tanto, la fibra incrementa el ángulo de fricción no reforzado de 35.0° a 41.7° y disminuye el intercepto cohesivo de 8kPa a cero. Para analizar mejor el efecto de la fibra en la evolución de los parámetros de resistencia se realizaron envolventes de resistencia a cada 0.5% de deformación.

Para cada envolvente se encontró un ángulo de fricción y un intercepto cohesivo. En la Figura 9a, se observa que la evolución del ángulo de fricción pico no reforzado y reforzado se encuentra entre el 5% y 6% de la deformación axial con valores de 35.6° y 43.2°, respectivamente. Estos valores disminuyen hasta 34.1° y 41.0° al 20% de deformación, por lo tanto, los ángulos de fricción del relave no reforzado y reforzado calculados por la envolvente de resistencia total con valores de 35.0° y 41.7° respectivamente, están representado el comportamiento del material.

Por otro lado, la Figura 9b, muestra que inicialmente existen valores altos del intercepto cohesivo que después del valor pico, se reducen hasta ser nulos. Los relaves no reforzados y reforzados llegan a un intercepto cohesivo nulo a partir de deformaciones de 5% y 6% respectivamente. En la Figura 9b, en el relave no reforzado, después del valor pico del intercepto cohesivo, se nota una caída del valor, que después, presenta un incremento hasta de 20kPa que puede ser por un reajuste de los granos. Este incremento es despreciable y su valor vuelve a ser nulo con el aumento de la deformación.

En este caso, el intercepto cohesivo del relave no reforzado, calculado por la envolvente total de resistencia de 8 kPa no es representativo para el material, consecuentemente el intercepto cohesivo es considerado nulo.

Es importante notar que el relave reforzado alcanza un intercepto cohesivo pico en una deformación axial mayor, comparado con el caso no reforzado, esto indica que las fibras ocuparon los espacios vacíos en la matriz, generando un mayor contacto entre los granos del relave, densificando la matriz y, por consiguiente, la caída del intercepto cohesivo pico reforzado necesita mayor deformación axial.

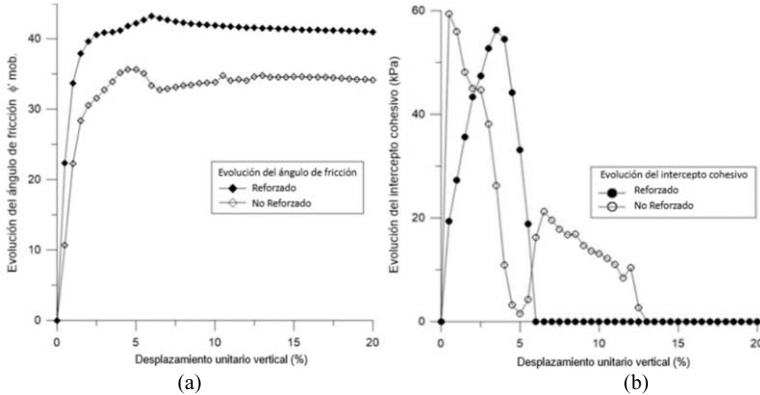


Figura 9. Evolución de parámetros de resistencia: (a) ángulo de fricción (b) intercepto cohesivo.

4.5. Relación entre la evolución del ángulo de fricción y la evolución del exceso de poro presión

En las Figuras 10a y 10b, se muestra la variación de la evolución del ángulo de fricción, según el aumento o disminución de la tasa de variación del exceso de poro presión, para las muestras de relave de hierro no reforzado y reforzado respectivamente.

Se observa que, la evolución de los ángulos de fricción hasta la línea de transferencia de fase, se encuentran en la parte de la tendencia al cambio contractivo del volumen siendo similar en ambos casos.

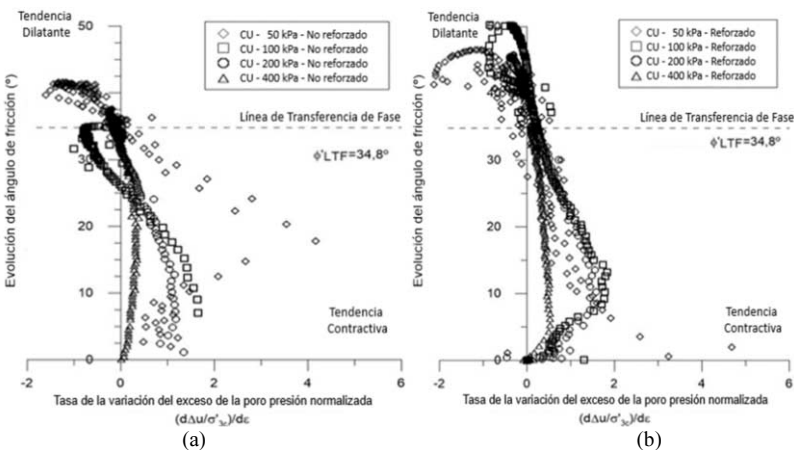


Figura 10. Evolución del ángulo de fricción según la tasa de variación del exceso de poro presión normalizada: (a) relave no reforzado (b) relave reforzado.



Después de alcanzar la línea de transformación de fase, la evolución de los ángulos de fricción aumenta hasta un valor pico y después disminuye hasta un valor casi constante, ambos dentro de la parte de tendencia de cambio del volumen dilatante incluso reforzado. El ángulo de fricción pico en el caso reforzado es mayor que en el caso no reforzado en todos los niveles de esfuerzo efectivo. La presencia de la fibra aporta un incremento en el confinamiento del relave aumentando también la poro presión.

#### 4.6. Pérdida de la rigidez inicial

La pérdida de la rigidez muestra el efecto favorable y desfavorable de la adición de la fibra a la estructura de la matriz. Datos de investigaciones anteriores son contradictorios, las fibras pueden generar mayores vacíos favoreciendo una pérdida rápida de la rigidez inicial de la matriz, y en otros casos las fibras llenan los espacios vacíos de la matriz aumentando su densidad. Otras investigaciones indican que las fibras no tienen ninguna influencia sobre la rigidez de la matriz reforzada [15].

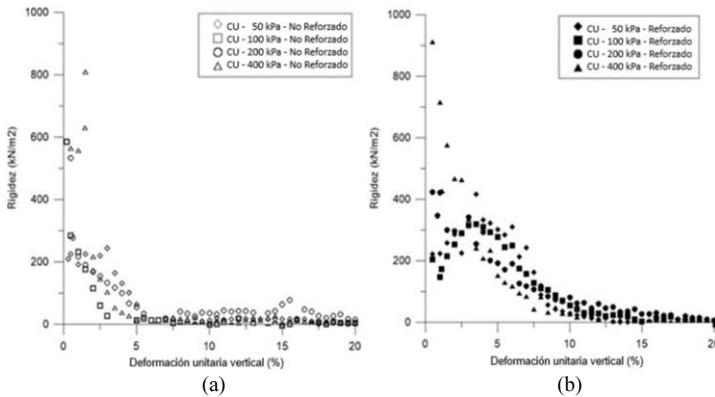


Figura 11. Variación de la rigidez inicial, muestra reforzada: (a) relave no reforzado (b) relave reforzado.

En las Figura 11a y 11b, se observa que el relave alcanza una pérdida total de rigidez inicial en 5% de la deformación axial, mientras que el relave reforzado retrasa esta pérdida hasta el 12% de la deformación axial. Es importante recordar que para el nivel de densidad media-densa de la matriz ( $D_r=65\%$ ) la fibra, en cualquier nivel de esfuerzo efectivo, tiene una excelente interacción con los granos del relave ocupando incluso los espacios vacíos de la matriz. Es importante conocer en trabajos futuros, sí, este efecto favorable a la rigidez inicial es mantenido bajo densidades menores del relave.

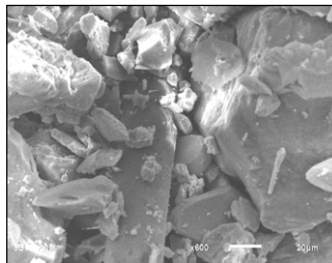


Figura 12. Análisis MEV: Interacción fibra-relave de hierro.

#### 4.7. Microscopia Electrónica de Barredura

La Figura 12, presenta una imagen obtenida por el análisis de microscopia electrónica de Barredura. La granulometría mostró que un 95% de las partículas del relave son mayores que el diámetro de las fibras, por ello, la fibra puede ocupar los espacios vacíos entre granos densificando la matriz lo que incrementa la tendencia dilatante.

### 5. Conclusiones

La adición de fibras no cambia este comportamiento elastoplástico del relave. El comportamiento volumétrico inicial de las muestras es contractivo y pasa para dilatante. La adición de fibras genera un efecto de confinamiento adicional que incrementa la poro presión, aumenta la tendencia contractiva inicial, sin embargo, el relave tiene una tendencia dilatante dominante y el efecto de la fibra es superado disminuyendo la poro presión, generándose un incremento del esfuerzo efectivo medio. Las envolventes de resistencia, muestran que el relave de hierro con una adición de 0.5% de fibra de polipropileno incrementa el ángulo de fricción de 35 a 41.7° mientras que la variación en el intercepto cohesivo es insignificante. El relave no reforzado alcanza una pérdida total de rigidez inicial en 5% de deformación axial, mientras que el relave reforzado en 12%.

### Agradecimientos

A la 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] Sotomayor, J.M.G. (2018). 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.
- [2] Consoli, N. C., Casagrande, M. D. T., & Coop, M. R. (2007). Performance of a fibre-reinforced sand at large shear strains. *Geotechnique*, 57(9), 751-756.
- [3] Anagnostopoulos A., Papaliangas T., Konstantinidis D., Patronis C. (2013). Shear Strength of Sands Reinforced with Polypropylene Fibers. *Geotech Geol Eng* (2013) 31:401–423.
- [4] Consoli, N. C., Nierwinski, H. P., da Silva, A. P., & Sosnoski, J. (2017). Durability and strength of fiber-reinforced compacted gold tailings-cement blends. *Geotextiles and Geomembranes*, 45(2), 98-102.
- [5] Sotomayor, J.M.G. y 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*, São Paulo, v.41(3), p. 361-368.
- [6] De Campos, T.M.P. Características de Projeto e Dimensionamento de um Transdutor de Variação de Volume. Departamento de Engenharia Civil – PUC/RJ. Relatório Interno, RI 07/85, 1985.
- [7] Head K. H., (1982). *Manual of Soil Laboratory Testing*, MA (Cantab), C. Eng, FICE, FGS, Engineering Laboratory Equipment Limited, Pentech Press, London: Plymouth, Volumes I, II, III.
- [8] De Campos, T.M.P, Carrillo, C.W. Direct Shear Testing on an Unsaturated Soil from Rio de Janeiro. *Unsaturated Soils*, Alonso & Delage (eds.), pp. 31-38, 1995.
- [9] Poulos, S.J. (1981). The Steady State of Deformation, *Journal of the Geotechnical Division, American Society of Civil Engineers*, Vol.107, No. GT5, pp. 553-562.
- [10] Castro, G., Poulos, S.J., France, J.W. and Enos, J.L. (1982). Liquefaction Induced by Cyclic Loading, Report Submitted to National Science Foundation, Washington, D.C.

- [11] Negussey, D., Wijewickreme, W.K.D., and Vaid, Y.P., 1988. Constant Volume Friction angle of Granular Materials. *Canadian Geotechnical Journal*. 25(1), 50-55.
- [12] Luong, M.P. (1980). Stress Strain Aspects of Cohesionless Soils Under Cyclic and Transient Loading, *International Symposium on Soils Under Cyclic and Transient Loading*, Swansea.
- [13] Vaid, Y.P. and Chern, J.C. (1985). Cyclic and Monotonic Undrained Response of Saturated Sands, Session No. 52, *Advances in the art of testing soils under cyclic conditions*, Annual Convention and Exposition, Detroit, Michigan.
- [14] Wood, D.M., Diambra, A., Ibraim, E., (2015). Fibres and Roots for Soil Improvement, in: Kenichi Soga, Krishna Kumar, Giovanna Biscontin, Matthew Kuo, (Eds.), *Proceedings of the TC105 ISSMGE International Symposium On Geomechanics from Micro to Macro*. CRC Press, Balkema, Cambridge, September 1-3, 2014, Vol. 1.
- [15] Heineck, K. S., Coop, M. R. & Consoli, N. C., 2005. Effect of microreinforcement of soils from very small to large shear strains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 131(8), 1024–1033.