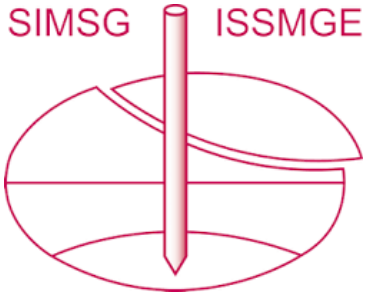
INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



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.

Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges
N.P. López-Acosta et al. (Eds.)
© 2019 The authors and IOS Press.
This article is published online with Open Access by IOS Press and distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License 4.0 (CC BY-NC 4.0).
doi:10.3233/STAL190243

Efecto de Finos No Plásticos en el Comportamiento Drenado de Arenas de Relave a Altas Presiones

Miguel BRAVO[a], Felipe OCHOA[b,1], Ramón VERDUGO[c], Marcelo VARGAS[d] y Camilo CORDOVA[e]
[a] *Ingeniero civil, IDIEM, U de Chile*
[b] *Académico, Ingeniería Civil, U de Chile*
[c] *Presidente fundador, CMGI Ltda.*
[d] *Ingeniero civil, GEOCAV Ingenieros Civiles*
[e] *Ingeniero civil, Golder Associates Ltda.*

Resumen. Este estudio presenta el efecto del contenido de finos en el comportamiento monótono drenado de arenas de relaves, en rangos de presiones que varían entre 0.1 MPa a 5 MPa. Los resultados sugieren que: 1) A bajas presiones de confinamiento la compresibilidad aumenta con el contenido de finos. 2) El ángulo de fricción "peak", disminuye a mayores contenidos de fino. 3) A altas presiones se reducen las diferencias en deformación volumétrica, existencia de pulido de cantos angulosos con disminución del ángulo de fricción secante máximo. Este trabajo se inspira en que la construcción de tranques de relave en Chile ya sobrepasan los 150 metros de altura, induciendo estados tensionales por sobre 1 MPa.

Palabras Clave. Altas presiones, arenas de relave, pulido de cantos angulosos, comportamiento drenado.

1. Introduction

La disminución en la ley del cobre chileno ha implicado un aumento en los volúmenes de explotación, incrementando el volumen de residuos provenientes del proceso de flotación de los sulfuros de cobre, conocidos como relave. Este material es transportado hidráulicamente hacia los llamados tranques de relaves [1]. Geotécnicamente, dicho material se clasifica, como una arena limosa o limo arenoso de baja plasticidad, dependiendo del contenido de material que pasa la malla #200.

La gran producción de material de relaves y el correspondiente aumento de tamaño de las geoestructuras para contenerlos, induce la comprensión de las arenas de relaves a niveles de confinamiento efectivo de hasta 1 MPa de tamaño. Esto aplicado tanto para estados de carga estáticos como sísmicos [2].

En este contexto, este estudio suma al conocimiento construido por Solans [3], Maureira [4], Vargas [5] y Cordova [6] sobre el comportamiento de arenas de relaves. En particular, el trabajo se enfoca en el comportamiento drenado de las arenas de relave

[1] Autor de correspondencia, Felipe Ochoa-Cornejo, Department of Civil Engineering, University of Chile. Blanco Encalada 2002, Santiago de Chile, Chile; E-mail: fochoa@ing.uchile.cl.

de "El Torito", para varios contenidos de finos, con el propósito de indagar el efecto de esta variable en la eventual rotura de partículas del material hasta presiones de confinamiento que pueden alcanzar los 5 MPa.

2. Material, equipo, y programa experimental

El material es la arena proveniente del muro del tranque de relaves "El Torito", de la mina de cobre "El Soldado", ubicada en la comuna de Nogales, V región. Este material es la fracción gruesa del material generado de la tronadura, chancado, y molienda de las rocas con minerales de cobre. La arena de relaves clasifica como una arena limosa bien graduada de color gris con partículas angulosas y sub angulosas.

En laboratorio, se le realiza un proceso de lavado al material de relaves para separar el material tamaño arena del material tamaño limo, y controlar la confección de probetas de arenas con un 1%, 5%, 10% y 20% de finos no plásticos pertenecientes al material original. La Tabla 1, y la Figura 1, muestran la distribución granulométrica y un resumen de las propiedades de la arena de relaves del material de las muestras a distintos contenidos de finos. Todas las probetas presentadas en este estudio se realizaron a una densidad relativa de confección del 65% con respecto al índice de vacío mínimo e índice de vacío máximo correspondiente a cada mezcla de material utilizado.

Tabla 1. Propiedades de la arena de relaves con 1%, 5%, 10% y 20% de finos no plásticos.

Parámetros	**Contenido de finos (%)**				**Arena de relaves "El torito"**
	1	5	10	20	19
$\mathbf{D_{50}}$ **(mm)**	0.216	0.215	0.202	0.187	0.149
$\mathbf{C_u}$	2.525	2.703	3.064	4.982	5.710
$\mathbf{C_c}$	0.943	1.045	0.998	1.091	1.360
$\mathbf{e_{max}}$	1.215	1.195	1.189	1.125	1.010
$\mathbf{e_{min}}$	0.609	0.563	0.559	0.502	0.510
$\mathbf{G_s}$	2.81	2.81	2.81	2.81	2.81
IP	NP	NP	NP	NP	NP

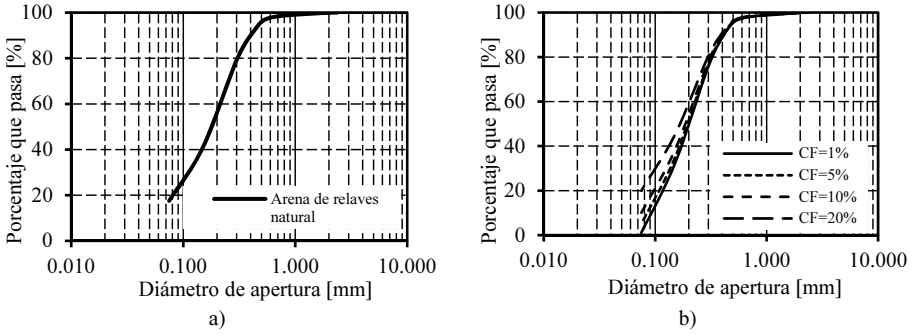
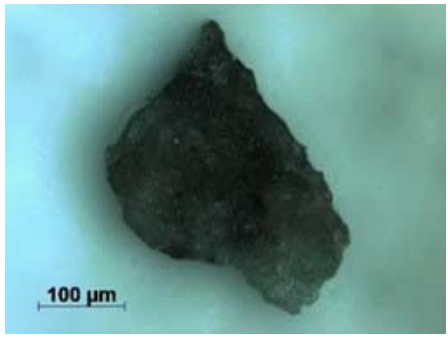


Figura 1. Granulometria y forma de partículas de la arena de relave. (a) Granulometria de la arena natural integral. (b) Granulometria de la arena de relave con 1%, 5%, 10% y 20% de finos no plásticos. (c) Partículas de la arena de relave. (d) Una partícula de relave.

c)



d)

Figura 1. (*continuación*) Granulometria y forma de partículas de la arena de relave. (a) Granulometria de la arena natural integral. (b) Granulometria de la arena de relave con 1%, 5%, 10% y 20% de finos no plásticos. (c) Partículas de la arena de relave. (d) Una partícula de relave.

Los equipos utilizados en este estudio fueron: 1) Triaxial con capacidad de hasta 0.6 MPa de confinamiento efectivo en probetas de 5 cm de diametro y 10 cm de largo, y 2) Triaxial con capacidad de hasta 6 MPa de confinamiento efectivo en probetas de 5 cm x 10 cm o de 10 cm x 20 cm. El equipo triaxial de altas presiones fue confeccionado por la Universidad de Chile, en el Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados [3].

Una vez terminados los ensayos triaxiales, las muestras post ensayo fueron sometidos a ensayos análisis granulométrico laser usando el equipo Mastersizer 2000 del Laboratorio de Sedimentología del Departamento de Geología de la Universidad de Chile. Este último equipo puede determinar distribución de tamaño de partículas y estimaciones de superficie específica. Este equipo trabaja bajo el supuesto que los medios granulares estudiados son esféricos sin rugosidades.

3. Respuesta monótona drenada

En la Figura 2, se observa la respuesta del material en esfuerzo de corte medio y deformación axial. De los resultados se evidencia que la resistencia aumenta con el aumento del confinamiento efectivo. En las muestras de 0.2 y 0.4 MPa se muestra una leve dilatancia, la cual es característica por la presencia de un peak de resistencia [7], [8].

En deformación volumétrica y deformación axial, Figura 3, se evidencian resultados consistentes con lo observado en resistencia. Al aumentar la presión de confinamiento las muestras aumentan en compresibilidad. En bajos confinamientos (0.2 MPa y 0.4 MPa) se observa una leve dilatancia que se pierde a mayores confinamientos [7], [8].

Del desarrollo de las curvas tensión - deformación se obtiene la rigidez utilizando el módulo secante asociado a la mitad del nivel de tensiones de la resistencia máxima, denominado como E_{50}. En la Figura 4 se aprecian las variaciones de los "módulos E_{50}" a diferentes confinamientos, y para cada uno de los contenidos de finos utilizados. Se observa que a bajas presiones de confinamiento se tienen módulos de deformación menores a un mayor contenido de finos. A medida que aumenta la presión de confinamiento los módulos crecen, tendiendo a concentrarse en una misma zona de módulo de deformación.

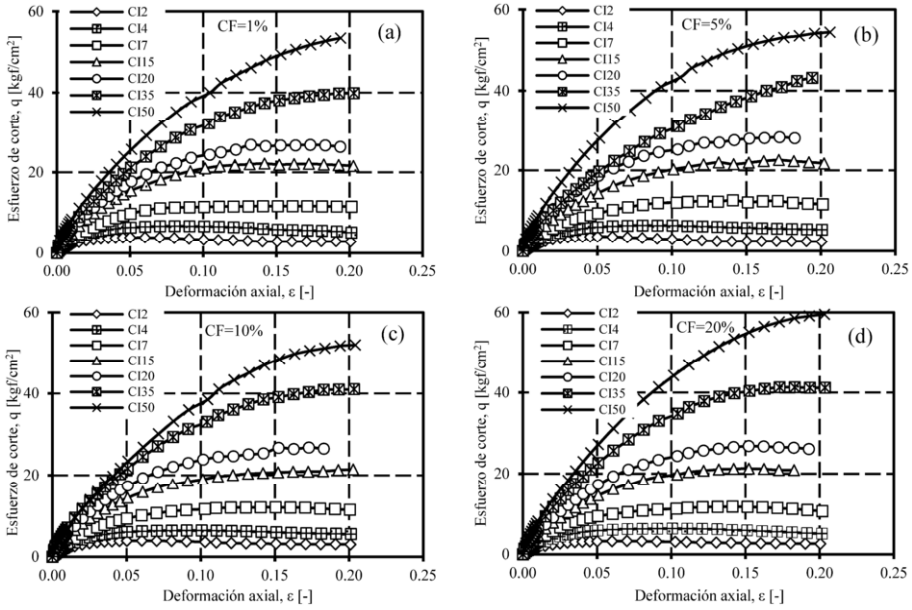


Figura 2. Tensión-deformación en triaxial drenado. (a) 1% contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino.

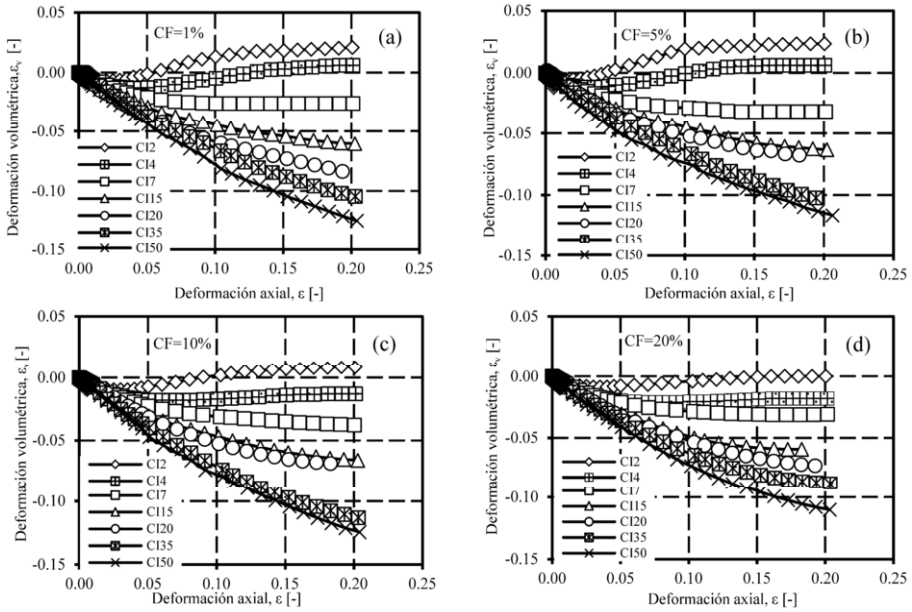


Figura 3. Deformación volumétrica -deformación axial en un triaxial drenado. (a) 15 contenido de fino. (b) 5% contenido de fino. (c) 10% contenido de fino. (d) 20% contenido de fino.

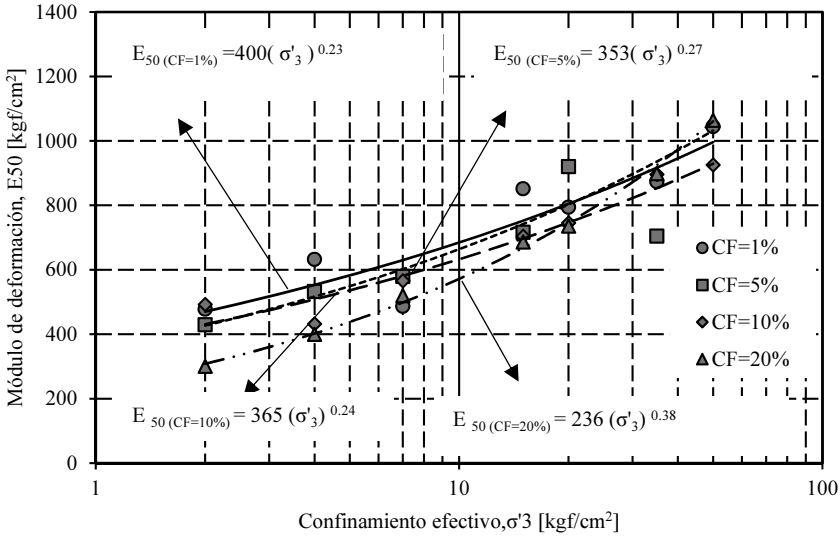


Figura 4. Módulo de deformación secante al 50% del desviador de corte medio para distintas presiones de confinamiento y contenidos de fino.

Asociando los resultados de resistencia al criterio de falla Mohr-Coulomb se observa el ángulo de fricción secante peak (ángulo de fricción máximo). En la Figura 5 se aprecia que en bajas presiones de confinamiento hay una disminución del ángulo de fricción secante peak en las muestras con mayor contenido de fino. En altas presiones hay una disminución con el aumento del confinamiento, sin tendencia clara respecto de si es decreciente o creciente según el contenido de finos. Ante esto, se define una banda de existencia para los ángulos de fricción secante máximos. (Banda celeste).

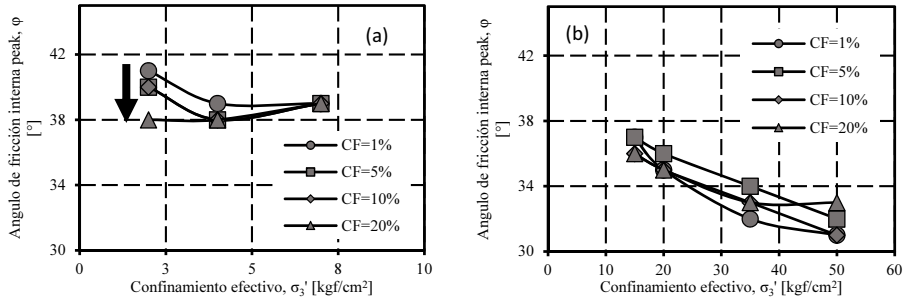


Figura 5. Ángulo de fricción secante máximo en altas y bajas presiones de confinamiento efectivo. (a) Angulo secante máximo bajo 0.7 MPa. (b) Angulo máximo sobre 0.7 MPa.

Se analizan cinco puntos de deformación axial 1%, 5%, 10%, 15% y 20% según las deformaciones volumétricas para cada confinamiento. En la Figura 6 se observa que en la medida que aumenta la presión de confinamiento las diferencias en deformación cada vez se reducen, excepto para presiones de 3.5 MPa.

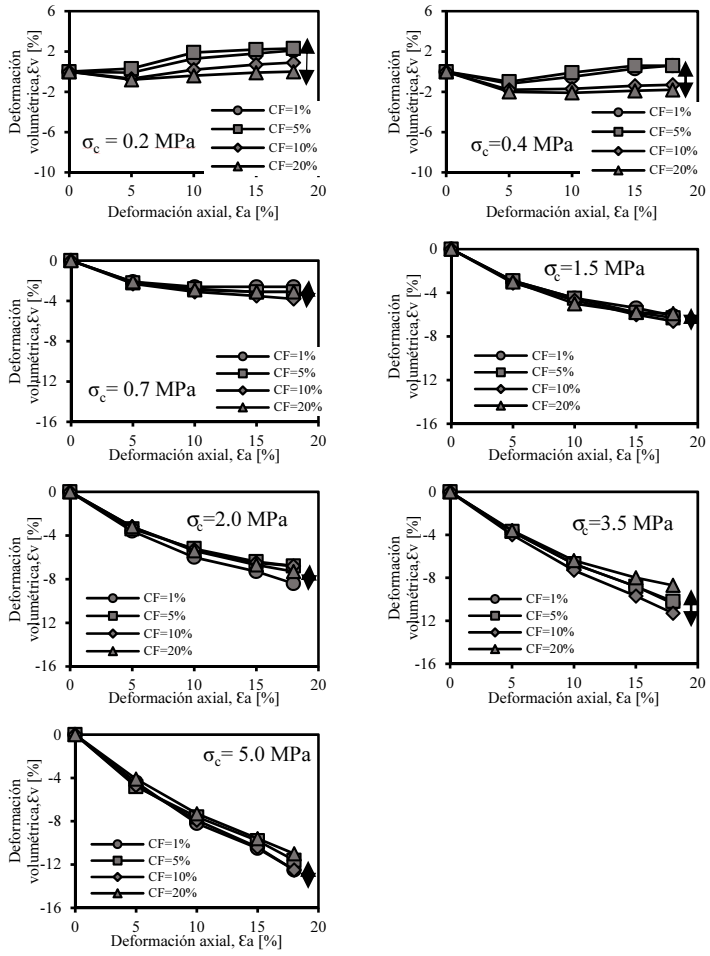


Figura 6. Deformación volumétrica según el contenido de finos para cada presión de confinamiento.

4. Rotura de partículas

Se realizaron granulometrías por difracción laser post ensayo a las probetas con presiones de confinamiento por sobre 1.5 MPa, para evaluar la ocurrencia de rotura de partículas en altas presiones [9], [10], [11],[12],[13],[14]. De los resultados (Figura. 7) se observa que a medida que aumenta la presión de confinamiento hay mayor variación en la curva granulométrica para todos los contenidos de fino. Para muestras con 1% de contenido de finos se tiene la mayor variación. En la medida que aumenta la dosificación de finos, las diferencias disminuyen.

Una mirada alternativa de la rotura de partículas se puede observar en la Figura. 8a. En ella se analiza la razón de área superficial específica como la diferencia del área superficial específica pre y post-ensayo. Se calcula el parámetro para cada presión de confinamiento y contenido de finos. De los resultados se observa que la razón de área superficial específica aumenta con la presión de confinamiento.

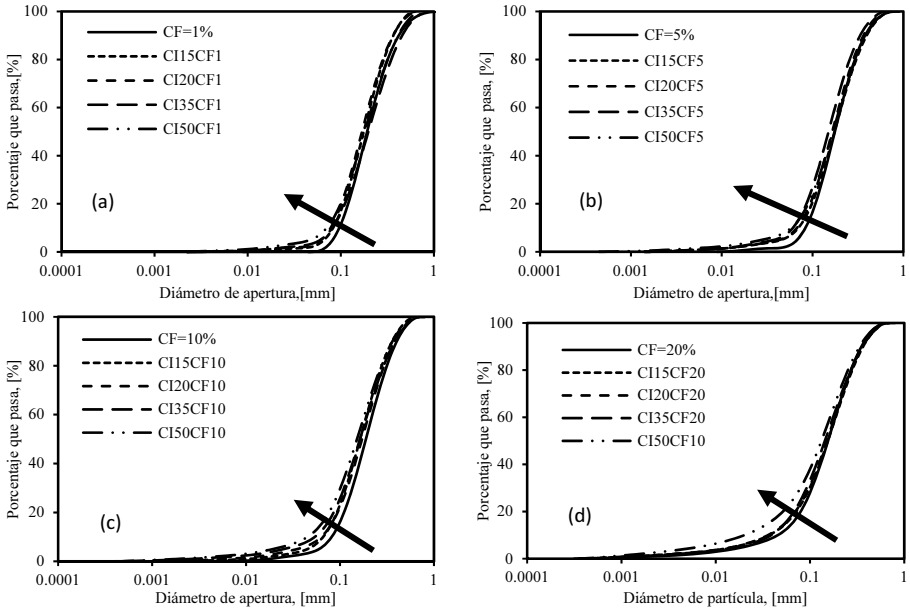


Figura 7. Granulometrías por difracción laser pre y post ensayo. (a) 1% contenido de finos. (b) 5% contenido de finos. (c) 10% contenido de finos. (d) 20% contenido de finos.

Además, se aprecia un aumento del parámetro con el contenido de finos. Esto último se contradice con la literatura. Los resultados anteriores se explican porque el área superficial específica se ve fuertemente influenciada por las partículas de tamaño de partículas bajo 0,075 mm. Pequeñas variaciones del contenido de finos a grandes dosificaciones de finos se ven amplificadas en el parámetro de área superficial específica. Esto último provoca que las diferencias cercanas a 0,075 mm en las granulometrías pre y post-ensayo no tengan relevancia en los resultados. Una manera de corregir este detalle en el incremento de área superficial específica es realizar un lavado a las muestras y estudiar la rotura de partículas desde la granulometría por sobre malla #200.

En la Figura. 8b se observan los resultados obtenidos luego del proceso de lavado. Se aprecia que el incremento de área superficial específica es similar en todas las dosificaciones de finos y muy inferior al obtenido al 1% del contenido de finos sin lavar.

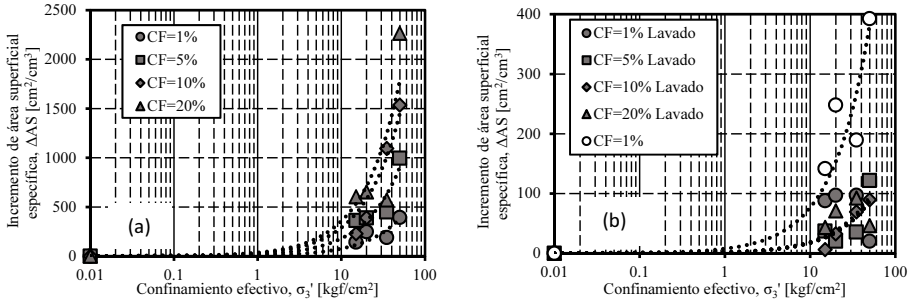


Figura 8. Incremento de área superficial especifica según el confinamiento efectivo. (a) Muestras no lavadas. (b) Muestras lavadas.

Con lo anterior y con los indicios del aumento de contenido de finos en las granulometrías por difracción se sugiere que no existe una rotura explosiva del material granular sino un pulido de los granos gruesos. Las partículas no se parten; solo se pulen.

5. Mecanismos

Luego del estudio del comportamiento mecánico drenado en un amplio rango de presiones, es posible entender el mecanismo de movimiento y resistencia en bajas y altas presiones de confinamiento. Un fenómeno interesante que ocurre en las arenas de relaves es producto que son partículas angulosas a sub angulosas. Esta forma de la arena provoca que al reacomodarse los granos exista mayor resistencia a la rotación de estas, producto de la trabazón mecánica. Una mayor trabazón se relaciona a la máxima resistencia de la muestra, es decir, el punto donde el ángulo de fricción secante es máximo.

En el caso de bajas presiones de confinamiento, los finos disminuyen la trabazón mecánica, puesto que el ángulo de fricción secante disminuye con el contenido de finos. Es decir que los finos se interponen en los contactos, facilitando la rotación entre las partículas más gruesas.

En altas presiones de confinamiento, la trabazón mecánica se comienza a dar a niveles de deformaciones axiales menores sumado a un pulido de cantos progresivo del material. La suma de estos dos efectos genera que el ángulo de fricción máxima secante comience a disminuir con la presión de confinamiento. Además, no se muestra una diferencia en las deformaciones volumétricas con el contenido de fino. Lo anterior podría porque los finos que están en los contactos no aportan en rotación y/o porque los finos se movilizaron al vacío de la matriz granular.

6. Conclusiones

En este trabajo experimental se observa que el corte monótono drenado induce que al aumentar la presión de confinamiento, hay una pérdida de dilatancia, un aumento de la rigidización inicial, y un incremento de la resistencia drenada a 20% de deformación axial. Con respecto al contenido de finos, se observa una disminución del ángulo de fricción interna peak a bajos confinamientos, cuando el contenido de finos aumenta. A medida que aumenta el confinamiento, se pierde la diferencia en dichos ángulos, decreciendo el ángulo secante peak con el aumento del confinamiento. También se aprecia que, a este nivel de presiones, comienza el pulido de canto anguloso, reduciendo el ángulo máximo para todos los contenidos de finos estudiados en este trabajo.

Con respecto a las deformaciones volumétricas se tiene que en bajos confinamientos efectivos, hay un aumento de la deformación volumétrica en altos contenidos de fino, es decir que los finos están aportando en el desplazamiento y rotación de los granos gruesos. En la medida que aumenta la presión de confinamiento, existe una disminución en las diferencias de deformación volumétrica con los distintos contenidos de finos.

El punto anterior se explicar porque en altas presiones existe un aumento del trabazón mecánico desde bajos niveles de deformación axial, lo que aumenta el pulido de canto a mayor presión de confinamiento para todos los contenidos de finos.

En cuanto al uso del área superficial específica como parámetro de análisis para evaluar “rotura de partículas”, a diferentes contenidos de finos, se observa que hay un aumento con la presión de confinamiento. Con respecto al contenido de finos se ve

fuertemente influenciado por la cantidad de finos. Para apreciar mejor este efecto, se lavan las muestras pre- ensayo y post-ensayo para analizar la potencial rotura de las partículas que más contribuyen a las cadenas de esfuerzos en la masa de suelo, esto implica, partículas sobre malla #200, indicando que sólo existe pulido de canto anguloso y no rotura explosiva de los granos.

Referencias

[1] Ministerio de Minería. Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves, Pub. L. No. 248 (2007). Chile.
[2] Campaña, J. (2011). Comportamiento de arenas de relave a altas presiones. Universidad de Chile.
[3] Solans, D. (2010). Equipo triaxial monótono y cíclico de altas presiones y su aplicación en arenas de relaves.
[4] Maureira, S. (2012). Respuesta cíclica de arena de relaves en un amplio rango de presiones.
[5] Vargas, M. (2015). Efecto acoplado de la presión de confinamiento y el corte estático inicial en la resistencia cíclica de arena de relaves.
[6] Cordova, C. (2017). Efecto del contenido de finos no plásticos en la compresibilidad y rotura de partículas de arenas de relave
[7] Bishop, A. W. (1966). The strength of soils as engineering materials.
[8] Verdugo, R., & Ishihara, K. (1996). The steady state of sandy soils. Soils and Foundations
[9] Hardin, B. (1985). Crushing of Soil Particles, 9410(June).
[10] Lade, B. P. V, Yamamuro, J. A., & Bopp, P. A. (1996). Significance of particle crushing in granular materials, 122(April), 309–316. Bishop, A. W. (1966). The strength of soils as engineering materials.
[11] Lee, K. L., & Farhoomand, I. (1967). Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. Canadian Geotechnical Journal, 4(1), 68–86
[12] Lee, K. L., & Seed, H. B. (1967). Drained strength characteristics of sands. Journal of Soil Mechanics & Foundations Div
[13] Lo, K. Y., & Roy, M. (1973). Response of particulate materials at high pressures.
[14] Marsal, R. J., & de Arellano, L. R. (1965). Presa el infiernillo: observaciones en la cortina durante el periodo de construccion y primer llenado del embalse. Comision federal de electricidad.