

Efecto de los finos no plásticos en la respuesta no drenada de una arena de relaves a altas presiones

Effect of non-plastic fines on the undrained response of a tailings sand under high pressures

Fecha de envío: 22 de abril 2022
Fecha de aceptación: 16 de agosto 2022

Diego Silva-Contreras y Felipe Ochoa-Cornejo

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Av. Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile,
dsilvacontreras95@gmail.com, fochoac@uchile.cl

Los tranques de relave tienen un rol crítico en la operación minera, y hoy en Chile alcanzan alturas de hasta 250 m, induciendo esfuerzos por sobre los encontrados en la práctica estándar en ingeniería geotécnica. Incluyendo el constante riesgo de licuefacción en un país sísmico, entender el comportamiento de las arenas de relaves es vital para lograr diseños mejores y más seguros. Este trabajo presenta el análisis de 56 ensayos triaxiales no drenados para estudiar el efecto del contenido de finos y el nivel de confinamiento en la respuesta monótona no drenada de una arena de relaves. Probetas de arena remoldeadas con 1% y 20% de finos fueron ensayadas con confinamientos entre 0.2 y 5 MPa. Los resultados sugieren que la variación del contenido de finos tiene un efecto significativo en la resistencia no drenada y el estado último, y bajo efecto en el ángulo de fricción y módulo de deformación. A la vez, altos esfuerzos disminuyen el ángulo de fricción curvando la envolvente de falla, reducen la dilatancia e inducen abrasión en las partículas. Los resultados son comparados con aquellos obtenidos en ensayos drenados y de compresión.

Tailings dams have a critical role in mining operations and nowadays are reaching heights of as much as 250 m in Chile, inducing stresses beyond those seen in standard geotechnical engineering practice. Adding the constant risk of liquefaction in a seismic country, understanding tailings sands behaviour under these conditions is vital for developing improved and safer designs. This work presents the analysis of 56 undrained triaxial tests to address the effect of the fines content and stress level on the monotonic undrained behaviour of a tailings sand. Sand remoulded specimens were prepared with fines contents of 1% and 20% by dry weight of sand, covering the range of fines content allowed by Chilean normative, and initial effective confinement from 0.2 to 5 MPa. The results suggest that the variation in fines content has significant effects on the ultimate undrained shear resistance and the steady-state of the soil, and little effect on the internal friction angle and deformation modulus. On the other hand, large confining stresses decrease the friction angle, suppress the dilatancy, curve the failure envelope, and induce particle abrasion. The results are also compared with those obtained for drained and compression tests on the same tailings sand.

Palabras clave: arenas de relave, altas presiones, contenido de finos

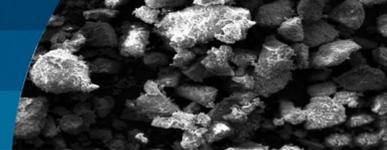
Keywords: tailings sands, high pressures, fines content

Introducción

Los tranques de relaves son ampliamente utilizados como botaderos de relaves, cumpliendo un rol crítico en operaciones mineras (Verdugo, 2009). Debido al incremento mundial de demanda de minerales, estas estructuras pueden alcanzar volúmenes y alturas inusuales (sobre 200 m), induciendo esfuerzos que superan los encontrados típicamente en ingeniería geotécnica. Bajo estos niveles de esfuerzo, existe un aumento en la compresibilidad,

disminución de la permeabilidad, supresión de la dilatancia y disminución del ángulo de fricción (Lo y Roy, 1973; Zoback y Byerlee, 1976; Coop y Lee, 1993; Pestana y Whittle, 1995). Todos estos efectos conducen a un mayor potencial de licuefacción e inestabilidad de la arena en condiciones no drenadas, con significativos excesos de presión de poros y respuesta altamente contractiva (Lade *et al.*, 2009).

Los tranques son construidos comúnmente con la porción



gruesa del material de desecho (relaves), clasificando usualmente como arenas limosas con alto contenido de finos no plásticos (SM), siendo este tipo de arenas más susceptibles a licuefacción que arenas limpias (Yamamuro y Lade, 1999). Además, altos niveles tensionales aumentan el contenido de finos dado el daño a las partículas (Barrera *et al.*, 2011; Maureira y Verdugo, 2014). Por lo tanto, el contenido de finos puede tener un efecto significativo en el comportamiento de la arena, dependiendo de la densidad, plasticidad y el contenido de finos con respecto a un contenido de finos límite ($f_{c_{th}}$). El contenido de finos límite separa dos tipos de comportamiento mecánico para arenas limosas: 1) $f_c < f_{c_{th}}$, i.e, la arena predomina en la mezcla y controla el comportamiento, y 2) $f_c > f_{c_{th}}$, los finos controlan el comportamiento (Polito y Martin, 2001). El valor del contenido de finos límite ha sido propuesto entre 20% y 40% de finos (Thevanayagam *et al.*, 1997; Polito y Martin, 2001; Yang *et al.*, 2006; Biscontin *et al.*, 2007). Respecto a esto, la normativa Chilena para depósitos de relaves autoriza hasta un máximo de 20% finos (DS248, 2007).

El efecto combinado del incremento de confinamiento y el alto contenido de finos conlleva un aumento en el potencial de licuefacción, incrementando el riesgo asociado a la estabilidad de los tranques, motivando el estudio del efecto del confinamiento y los finos no plásticos en la respuesta de las arenas de relave. En este contexto, este estudio se enfoca en la respuesta no drenada de una arena de relaves con contenido de finos entre los límites permitidos por la normativa chilena, bajo carga triaxial no drenada y confinamientos iniciales entre 0.2 y 5 MPa.

Metodología experimental

El estudio considera 56 ensayos CIU para explorar el efecto del contenido de finos y el confinamiento sobre el comportamiento no drenado de una arena de relaves. Dos arenas fueron preparadas, una con 1% de finos y otra con 20%. Para cada arena, fueron preparadas probetas a distintos índices de vacío iniciales cubriendo densidades baja, media y alta. Todos los ensayos parten de 0.01 MPa de confinamiento y son consolidados isotrópicamente hasta los confinamientos deseados entre 0.2 MPa y 5 MPa. Para cada muestra, se obtiene la curva granulométrica antes y después de ensayar para determinar la ocurrencia de rotura de partículas.

Material

La arena utilizada para el estudio proviene de un tranque de relaves ubicado en la zona central de Chile. El material clasifica como una arena fina bien graduada, con partículas angulares a sub-angulares y un 18% de contenido de finos. Antes de preparar las muestras, el material integral se lavó y secó para separar la fracción gruesa de la fina. Después del lavado y secado, la fracción gruesa presenta un contenido de finos remanente menor al 1%. Posteriormente, para lograr la arena con 20% de finos se mezcla la fracción gruesa con la fina. La Figura 1 presenta la curva granulométrica para ambas arenas utilizadas junto con su caracterización geotécnica y una imagen SEM del material integral.

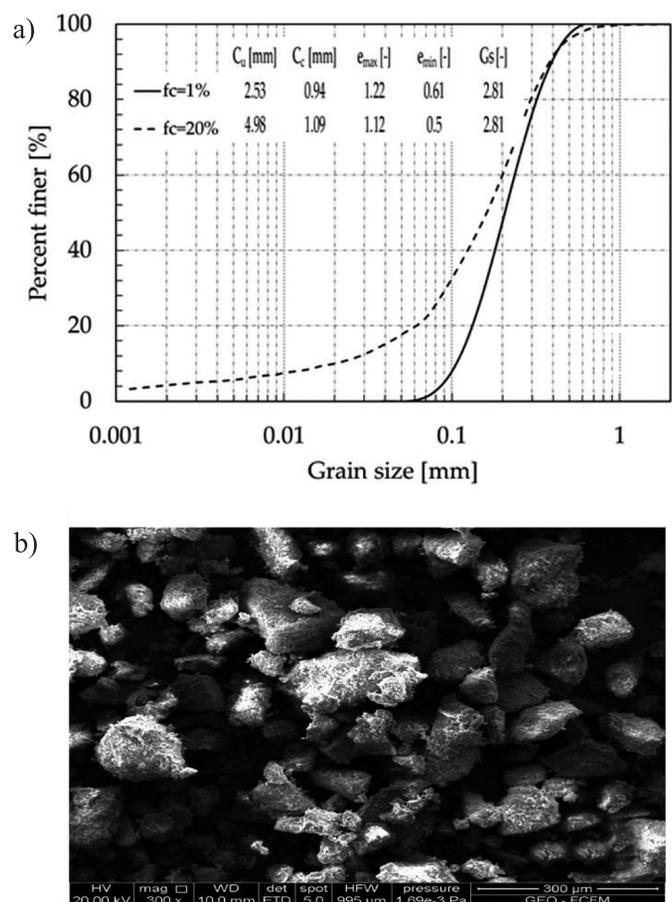
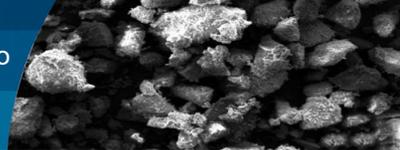


Figura 1: a) Curva granulométrica de las arenas ensayadas y b) imagen SEM de la arena limosa.

Resultados y discusión

Índices de vacío máximo y mínimo

La Figura 2 presenta los resultados para índices de vacío mínimo y máximo de ensayos realizados por Córdova



(2017) en la misma arena aquí estudiada, con contenido de finos variando entre 1% y 50%, estimados con el método Japonés (JGS, 2000) y el método propuesto por la ASTM D4254 (2000) respectivamente.

El índice de vacíos mínimo (e_{min}) presenta un decrecimiento inicial con la adición de finos, alcanzando un valor mínimo para 30% de finos, y posterior a este valor, e_{min} aumenta con el porcentaje de finos. Por otra parte, el índice de vacíos mínimo (e_{min}) presenta un constante decrecimiento entre 1% y 50% de finos. Este comportamiento es similar al reportado en la literatura para otras arenas (Polito y Martín, 2001; Yang *et al.*, 2006; Cubrinovsky y Ishihara, 2002; Lade *et al.*, 1998). Además, estos mismos autores sugieren que a partir del contenido de finos límite (fc_{th}) el comportamiento del material es controlado por la fracción fina. Este contenido de finos ha sido reportado entre 20% y 40%. En este sentido, la normativa Chilena (DS248, 2007) previene que el material pase a estar controlado por su fracción fina, lo cual no es deseado desde el punto de vista geotécnico.

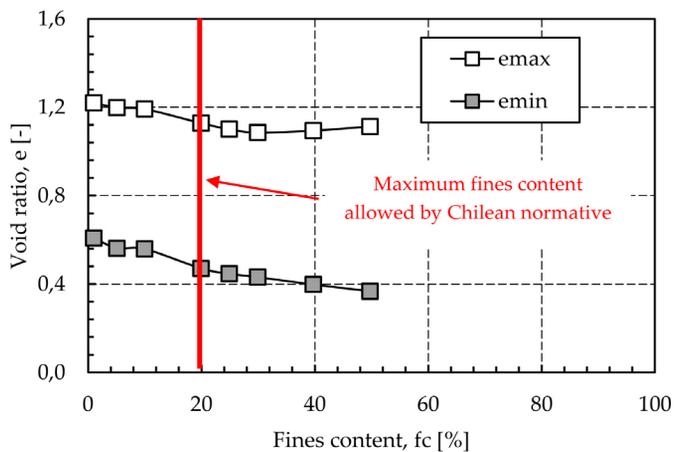


Figura 2: Variación de los índices de vacío mínimo y máximo con el contenido de finos para la arena en estudio

Resistencia no drenada

La Figura 3 presenta la resistencia al corte no drenada en función de la densidad relativa para ambas arenas ensayadas. Los resultados muestran que, para obtener la misma resistencia al corte no drenada, la arena con 20% de finos requiere un mayor nivel de densidad relativa que la arena limpia. Por lo tanto, los resultados sugieren que es más conveniente contar con un menor contenido de finos.

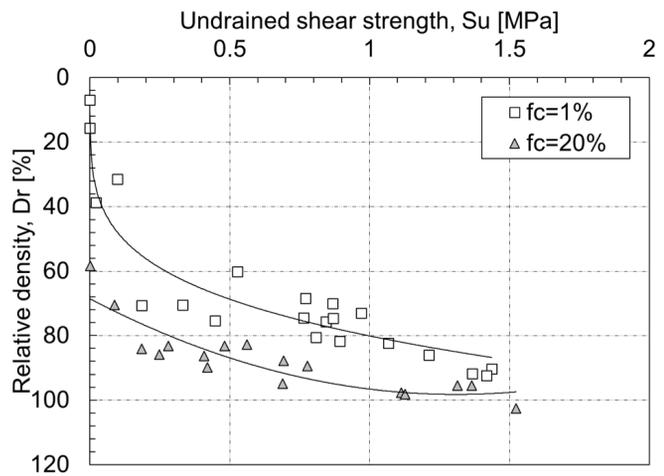


Figura 3: Resultados de resistencia no drenada.

Envolvente de falla en plano $q-p'$

Las Figuras 4a y 4b presentan las envolventes de falla en el plano $q-p'$ para las dos arenas ensayadas. La Figura 4a muestra los resultados para los ensayos triaxiales realizados, mientras que la Figura 4b muestra los mismos resultados en conjunto con los resultados de ensayos triaxiales drenados realizados por Bravo (2018) en las mismas arenas.

A pesar de la diferencia en el contenido de finos, las envolventes de falla obtenidas a través de los ensayos CIU (Figura 4a), para ambas arenas, son prácticamente iguales, con un ángulo de fricción de 35° . Cuando se incluyen los ensayos drenados (Figura 4b), la envolvente de falla alcanza niveles tensionales de hasta $p' = 8$ MPa, y comienza a curvarse para tensiones sobre $p' = 3$ MPa. Cabe destacar que el rango de presiones donde se observa la curvatura de la envolvente de falla es solo alcanzado por los ensayos drenados (para los confinamientos iniciales de este estudio). En materiales granulares, la curvatura de la envolvente de falla se asocia principalmente con la rotura de partículas (Bishop, 1966), y se ha reportado que disminuye (la curvatura) con el aumento del contenido de finos (Lee y Farhoomand, 1967), lo cual explica porque la arena limpia muestra una mayor curvatura que la arena limosa. Otra observación importante, es que para el rango de presiones donde existen datos para ensayos drenados y no drenados, se obtiene la misma envolvente de falla ($\phi = 35^\circ$).

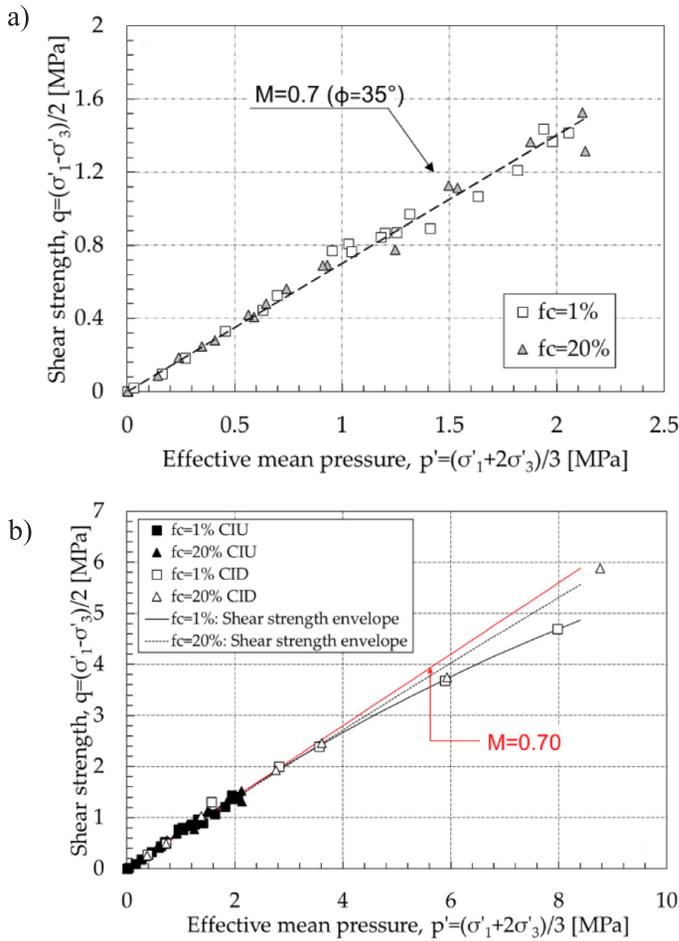
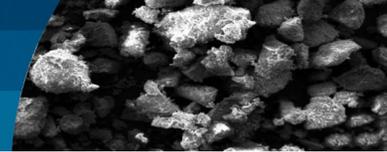


Figura 4: a) Envolvente de falla para ensayos no drenados y b) envolvente de falla para ensayos drenados y no drenados.

Líneas de estado crítico

La Figura 5 presenta las líneas de estado crítico para las dos arenas ensayadas obtenidas a través de ensayos triaxiales no drenados, mientras que la Figura 6 presenta las líneas de estado crítico obtenidas a través de los ensayos drenados (Bravo, 2018) y no drenados. Las líneas de estado último se asumen que siguen la forma de una ecuación potencial como se indica a continuación:

$$e = \Gamma - \lambda \left(\frac{p'}{p_{ref}} \right)^n \quad (1)$$

donde p_{ref} corresponde a una presión de referencia igual a 1 MPa, mientras que Γ es el índice de vacíos para $p' = p_{ref}$, λ es la pendiente y n es un parámetro de ajuste.

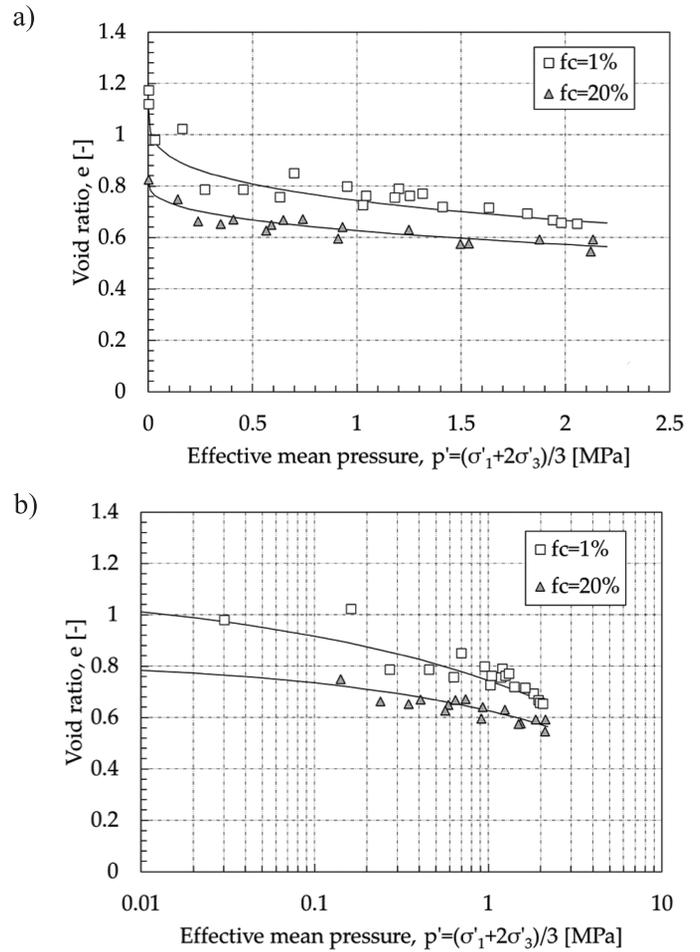


Figura 5: Líneas de estado crítico obtenidas a partir de ensayos CIU: a) escala lineal y b) escala logarítmica

De la Figura 5 se observa que al aumentar el contenido de finos la línea de estado crítico se traslada hacia menores índices de vacío en el plano $e-p'$, comportamiento previamente reportado en arenas con varios contenidos de finos (Yang *et al.*, 2006; Zlatovic e Ishihara, 1995). La Figura 6 incluye los resultados de triaxiales drenados realizados por Bravo (2018) en la misma arena y se observa que los resultados caen en las líneas de estado crítico definidas por los ensayos no drenados, indicando que la línea de estado crítico es independiente de la condición de drenaje de la carga (Verdugo e Ishihara, 1996). Ambas arenas muestran una transición suave de bajas a altas presiones, señal de un bajo daño sobre las partículas (Mesri y Vardhanabhuti, 2009), y parecieran tender hacia un único valor de índice de vacíos a altas presiones.

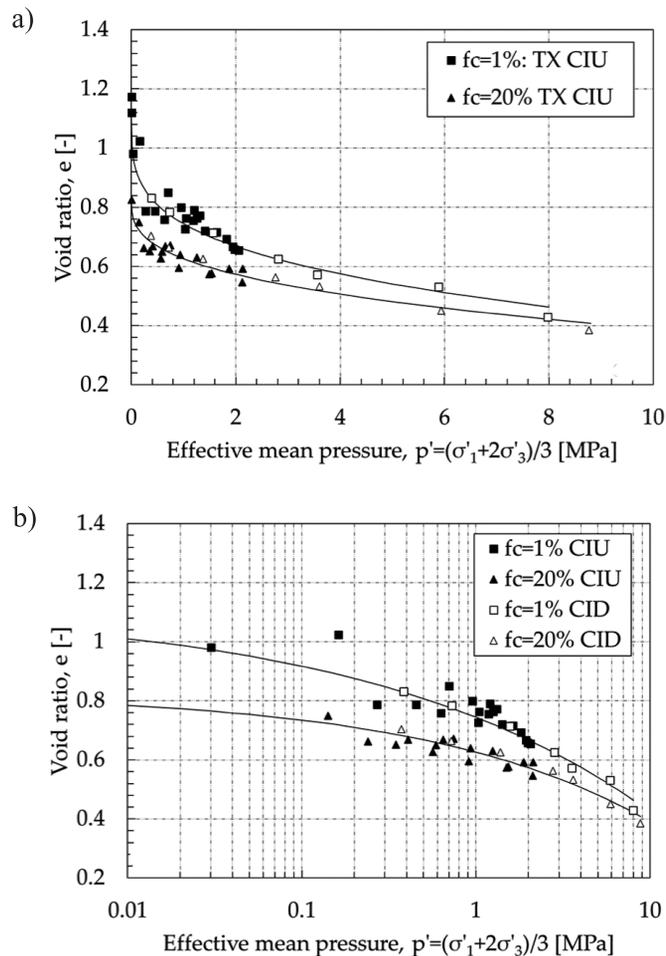
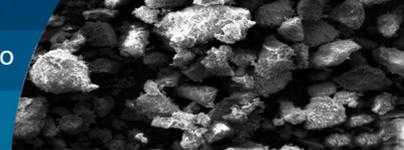


Figura 6: Líneas de estado crítico obtenidas a partir de ensayos CIU y CID (ensayos CID tomados de Bravo, 2018): a) escala lineal y b) escala logarítmica

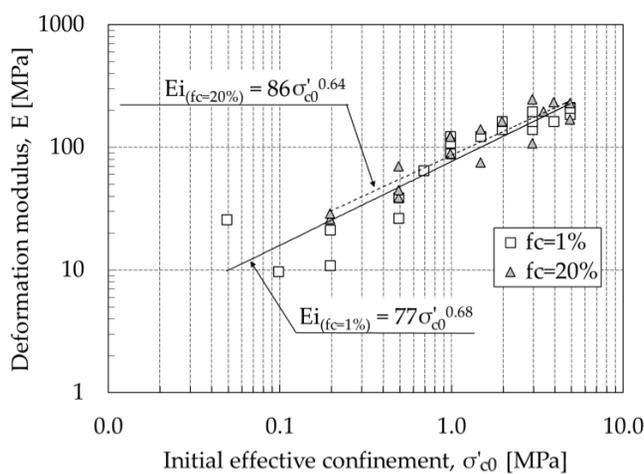


Figura 7: Módulo de deformación inicial E_i versus confinamiento inicial.

Módulo de deformación

La Figura 7 presenta el módulo de deformación E_i para las dos arenas ensayadas y como este varía con el confinamiento inicial. En este caso, se observa que los finos no tienen un efecto significativo sobre el módulo de deformación, cayendo todos los puntos en una delgada banda, aumentando la rigidez con el confinamiento.

Rotura de partículas

La razón entre el contenido de finos final e inicial es utilizada para cuantificar la rotura de partículas. El uso de este parámetro es justificado en observaciones previas en que en arenas de relaves no existe rotura explosiva de los granos (en el rango de presiones estudiadas), si no que un pulido de la superficie de las partículas, generando un aumento del contenido de finos y manteniendo la fracción gruesa prácticamente constante (Bravo, 2018; Córdova, 2017; Córdova *et al.*, 2019; Maureira y Verdugo, 2014; Barrera *et al.*, 2011).

La Figura 8 presenta la variación de la razón del contenido de finos f_{c_f}/f_{c_i} en función del contenido de finos inicial para tres estados de carga: Compresión Isotrópica (IC), Triaxial Drenado (CID) y Triaxial No Drenado (CIU) para confinamientos iniciales entre 1 y 5 MPa. Los resultados para compresión isotrópica son los reportados por Córdova (2017), mientras que los de triaxial drenado son reportados por Bravo (2018). Además, resultados para 5 y 10% de finos de Córdova (2017) y Bravo (2018) son incluidos. Los resultados muestran un rápido y constante descenso

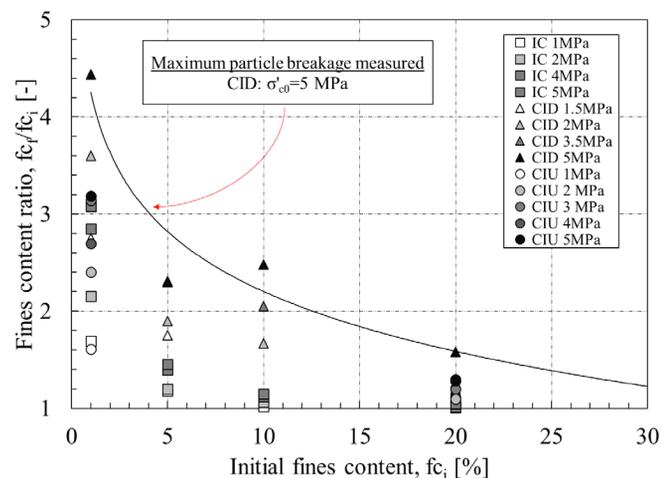
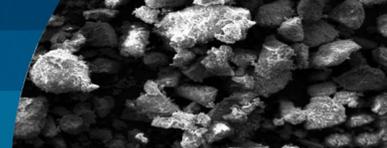


Figura 8: Variación de la razón de contenido de finos con el contenido de finos inicial f_{c_f}/f_{c_i}



de la rotura de partículas a medida que el contenido de finos inicial incrementa, alcanzando su mínimo para un 20% para las tres condiciones de carga. También se observa que la mayor cantidad de rotura de partículas se da bajo condición drenada, seguida por condición no drenada, y la mínima rotura se da para la compresión isotrópica. Resultados similares han sido reportados para otras arenas por otros autores (Yu, 2017; Lade *et al.*, 1996; Bishop, 1966).

Conclusiones

De la interpretación y análisis de los resultados, dentro del rango de presiones y contenido de finos estudiados, se puede concluir lo siguiente:

La normativa Chilena previene que el comportamiento del material (arena de relaves) pueda ser controlado por la fracción fina.

El efecto del contenido de finos es claro cuando se grafica con respecto a la densidad relativa. Aquí se observa que cuando el contenido de finos aumenta de 1% a 20% el contenido de finos, se produce una disminución de la resistencia no drenada del material.

A pesar del amplio rango de contenido de finos, las envolventes de falla son prácticamente la misma, indicando una baja sensibilidad del ángulo de fricción al contenido de finos. Para tensiones superiores a 3 MPa, las cuales son alcanzadas solo a través de ensayos drenados (para los confinamientos iniciales de este estudio), se observa una marcada curvatura de las envolventes de falla, siendo esta mayor en la arena limpia ($f_c = 1\%$).

El contenido de finos no muestra tener un efecto significativo en el módulo de deformación inicial (E_i), sugiriendo que este parámetro también es poco sensible a los finos.

La línea de estado crítico se desplaza hacia menores índices de vacío en el plano ($e-p'$) al aumentar el contenido de finos. Fue posible ajustar una curva potencial para ambas líneas de estado crítico a partir de los resultados de los ensayos CIU, y se observa que los resultados de los ensayos drenados caen sobre dichas curvas, mostrando que la línea de estado crítico es independiente de la condición de drenaje de la carga. Además, las curvas muestran una suave transición desde las bajas presiones a las altas presiones, sugiriendo un bajo nivel de daño en las partículas.

La rotura de partículas fue medida a través de la razón entre

el contenido de finos final e inicial (f_f/f_c). Se observa que al aumentar el contenido de finos se produce un rápido descenso en el daño en las partículas. Sin embargo, se observa que la rotura de partículas cuantificada no tiene un efecto significativo en la respuesta de las arenas.

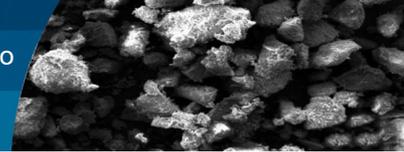
Finalmente, los resultados sugieren que el contenido de finos máximo permitido por la normativa Chilena (DS248, 2007) es adecuado para asegurar un comportamiento controlado por la fracción gruesa del material.

Agradecimientos

Se extienden agradecimientos al Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico FONDECYT por financiar esta investigación a través del aporte N°11181252.

Referencias

- ASTM D4254 (2000). Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. ASTM International, West Conshohoken PA, USA.
- Barrera, S., Valenzuela, L. and Campaña, J. (2011). Sand tailings dams: design, construction and operation. *Tailings and Mine Waste Conference*, University of British Columbia, Norman B. Keevil Institute of Mining Engineering, Vancouver BC, Canada
- Biscontin, G., Cola, S., Pestana, J.M. and Simonini, P. (2007). Unified compression model for Venice lagoon natural silts. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **133**(8), 932-942
- Bishop, A.W. (1966). The strength of soils as engineering materials. *Géotechnique* **16**(2), 91-130
- Bravo, M. (2018). *Efecto del confinamiento y el contenido de finos no plásticos en el comportamiento monótono drenado de arenas de relave*. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Coop, M.R. and Lee, I.K. (1993). The behaviour of granular soils at elevated stresses. *Predictive Soil Mechanics: Proceedings of the Wroth Memorial Symposium*, St Catherine's College, Oxford, G.T. Housby and A.N. Schofield (eds.), Thomas Telford Publishing, UK, 186-198
- Córdova, C. (2017). *Efecto del contenido de finos no plásticos en la compresibilidad y rotura de partículas de arenas de relave*. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile



- Córdova, C., Ochoa, F., Verdugo, R., Olguín, R., Bravo, M. y Mercado, V. (2019). Comportamiento isotrópico a altas presiones de arenas de relave con finos no plásticos. *Obras y Proyectos* **26**, 17-26
- Cubrinovski, M. and Ishihara, K. (2002). Maximum and minimum void ratio characteristics of sands. *Soils and Foundations* **42**(6), 65-78
- DS248 (2007). Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves. Ministerio de Minería, Santiago, Chile
- JGS (2000). Test methods for minimum and maximum densities of sands. Soil testing standards. Japanese Geotechnical Society JGS, 136-138
- Lade, P.V., Yamamuro, J.A. and Liggio, C.D. (2009). Effects of fines content on void ratio, compressibility and static liquefaction of silty sand. *Geomechanics and Engineering* **1**(1), 1-15
- Lade, P.V., Liggio, C.D. and Yamamuro, J.A. (1998). Effects of non-plastic fines on maximum and minimum void ratios of sand. *Geotechnical Testing Journal* **21**(4), 336-347
- Lade, P.V., Yamamuro, J.A. and Bopp, P.A. (1996). Significance of particle crushing in granular materials. *Journal of Geotechnical Engineering* **122**(4), 309-316
- Lee, K.L. and Farhoomand, I. (1967). Compressibility and crushing of granular soil in anisotropic triaxial compression. *Canadian Geotechnical Journal* **4**(1), 68-86
- Lo, K.Y. and Roy, M. (1973). Response of particulate materials at high pressures. *Soils and Foundations* **13**(1), 61-76
- Maureira, S. y Verdugo, R. (2014). El fenómeno de rotura de partículas en suelos arenosos. *VIII Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*, PUC y SOCHIGE, Santiago, Chile, artículo A24
- Mesri, G. and Vardhanabhuti, B. (2009). Compression of granular materials. *Canadian Geotechnical Journal* **46**(4), 369-392
- Pestana, J.M. and Whittle, A.J. (1995). Compression model for cohesionless soils. *Géotechnique* **45**(4), 611-631
- Polito, C.P. and Martin II, J.R. (2001). Effects of nonplastic fines on the liquefaction resistance of sands. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* **127**(5), 408-415
- Thevanayagam, S., Ravishankar, K. and Mohan, S. (1997). Effects of fines on monotonic undrained shear strength of sandy soils. *Geotechnical Testing Journal* **20**(4), 394-406
- Verdugo, R. (2009). Seismic performance based-design of large earth and tailings dams. *Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering*, Tsukuba, Japan, Kokusho, Tsukamoto and Yoshimine (eds.), Taylor & Francis Group, London, UK, 41-60
- Verdugo, R. and Ishihara, K. (1996). The steady state of sandy soils. *Soils and Foundations* **36**(2), 81-91
- Yamamuro, J.A. and Lade, P.V. (1999). Experiments and modelling of silty sands susceptible to static liquefaction. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials* **4**(6), 545-564
- Yang, S., Lacasse, S. and Sandven, R. (2006). Determination of the transitional fines content of mixtures of sand and non-plastic fines. *Geotechnical Testing Journal* **29**(2), 102-107
- Yu, F.W. (2017). Particle breakage and the critical state of sands. *Géotechnique* **67**(8), 713-719
- Zlatovic, S. and Ishihara, K. (1995). On the influence of non-plastic fines on residual strength. *First International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Tokyo, Japan, K. Ishihara (ed.), Balkema, the Netherlands, vol. 2, 239-244
- Zoback, M.D. and Byerlee, J. D. (1976). Effect of high-pressure deformation on permeability of Ottawa sand. *AAPG Bulletin* **60**(9), 1531-1542