

Efecto acoplado confinamiento-corte estático en la resistencia cíclica de arenas de relaves

Coupled effect of confining stress and static shear in cyclic resistance of tailing sands

Fecha de entrega: 21 de enero 2022

Fecha de aceptación: 6 de abril 2022

Marcelo Vargas¹ y Ramón Verdugo²

¹ Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile, marcelovargasg@gmail.com

² CMGI, Santiago, Chile, rverdugo@cmgi.cl

Los altos niveles de producción de cobre en la actualidad generan cantidades importantes de desechos llamados relaves, lo que obliga al estudio de su comportamiento de manera de asegurar la estabilidad mecánica de las presas. En este contexto, es de gran importancia estudiar la resistencia de los relaves frente al fenómeno de licuación. Diversos estudios han mostrado que el nivel de presión de confinamiento afecta la resistencia cíclica de arenas, proponiéndose el factor de corrección K_{σ} . Análogamente, se ha observado que el corte estático inicial también afecta la resistencia cíclica, por lo que se ha introducido el factor de corrección K_{α} . Sin embargo, el efecto acoplado de ambas variables, que corresponde a la condición real de terreno, no ha sido debidamente investigado para arenas de relaves. Mediante ensayos triaxiales cíclicos no drenados consolidados tanto isotrópicamente como anisotrópicamente, en este trabajo se ha estudiado el efecto conjunto de ambas variables en la resistencia cíclica de este material, para distintos niveles de densidad relativa inicial. Los resultados obtenidos del efecto acoplado se han resumido a través del parámetro $K_{\sigma\alpha}$.

Palabras clave: licuación, presión de confinamiento, corte estático, arenas de relaves

Nowadays, the high levels of copper production generates significant amounts of waste called tailings. In response to the latter, there is an increased need to understand the tailings behaviour in order to ensure the mechanical stability of dams. In this context, it is of great importance to study the resistance of tailings against the liquefaction phenomenon. Several studies have shown that the level of confining pressure affects the cyclic resistance of sands, proposing the correction factor K_{σ} . Similarly, it has been observed that the initial static shear stress also affects the cyclic strength, so the correction factor K_{α} has been introduced. However, the coupled effect of both variables, which corresponds to the real ground condition, has not been properly investigated for tailings sands. By means of undrained cyclic triaxial tests consolidated both isotropically and anisotropically, in this work the joint effect of both variables on the cyclic resistance of this material has been studied, for different levels of initial relative density. The results obtained from the coupled effect have been condensed through the parameter $K_{\sigma\alpha}$.

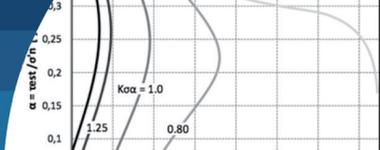
Keywords: liquefaction, confining stress, static shear stress, tailings sands

Introducción

El estudio del desempeño de materiales granulares no cohesivos ante sollicitaciones cíclicas ha sido abordado en numerosas investigaciones, utilizándose enfoques experimentales tanto de laboratorio como de terreno para interpretar el comportamiento del suelo durante eventos sísmicos. En este ámbito, la licuación de arenas es un tópico que ha llamado el interés entre los investigadores,

a raíz de las interrogantes que aún se generan y de los enormes daños que se han generado por este fenómeno en diversos terremotos a lo largo de la historia.

El trabajo pionero de Seed (1983), en el cual se propuso el conocido método simplificado para la evaluación del potencial de licuefacción de arenas saturadas, reconoció la importancia de dos variables que afectan de manera significativa la resistencia cíclica de arenas ante sollicitaciones de carácter sísmico. Estas variables



corresponden a la presión de confinamiento (σ'_o) y al corte estático inicial, representado por el parámetro α ($\alpha = \tau_{est} / \sigma'_o$, siendo τ_{est} el corte estático inicial). Consecuentemente, el método se basa en un estado a presión de confinamiento de 1 kg/cm^2 y sin corte estático inicial ($\alpha = 0$), y se propuso corregirlo a partir de la utilización de factores multiplicativos que condensan el efecto de ambas variables por separado. Dichos factores fueron denominados K_σ , para corregir por presión de confinamiento, y K_α , para corregir por corte estático inicial. Es necesario indicar que los factores anteriores son influenciados por la densidad relativa del suelo, por lo que es pertinente pensar la problemática de la licuación de arenas como un efecto conjunto de todas estas variables.

En términos experimentales, los efectos que poseen en la resistencia cíclica, la densidad relativa, la presión de confinamiento y el corte estático inicial, han sido estudiados profusamente para materiales granulares naturales. Para el caso de la densidad relativa, los resultados han sido concluyentes, ya que muestran que un aumento en su valor genera un aumento de la resistencia cíclica, considerando el resto de las variables constante. Sin embargo, para el caso de la presión de confinamiento y corte estático inicial los resultados no han sido del todo claros, ya que el efecto puede variar profundamente dependiendo del estado inicial del suelo en el espacio q - p '- e (esfuerzo de corte, presión media efectiva, índice de vacíos). En las Figuras 1(a) y 1(b) se indican los elementos de suelos A, B y C para dos situaciones distintas de estados tensionales. La primera de ellas corresponde al caso simplificado de una presa (Figura 1(a)) y la segunda para el caso simplificado del terreno de fundación bajo una estructura (Figura 1(b)).

En las situaciones ejemplificadas en las Figuras 1(a) y 1(b), se observa que en el punto A existe corte estático en el elemento de suelo dado su cercanía con la superficie del talud, o producto de las tensiones inducidas por la estructura existente. Para el caso de los puntos B y C no se debe considerar la presencia de corte estático ya que se encuentran bajo el eje de simetría de la presa y de la estructura. Sin embargo, para el punto C se debe considerar un valor importante de presión de confinamiento dado que se encuentra a mayor profundidad. La información anterior nos permite concluir que un suelo puede estar sometido a estados tensionales muy diferentes, los cuales afectan su respuesta cíclica.

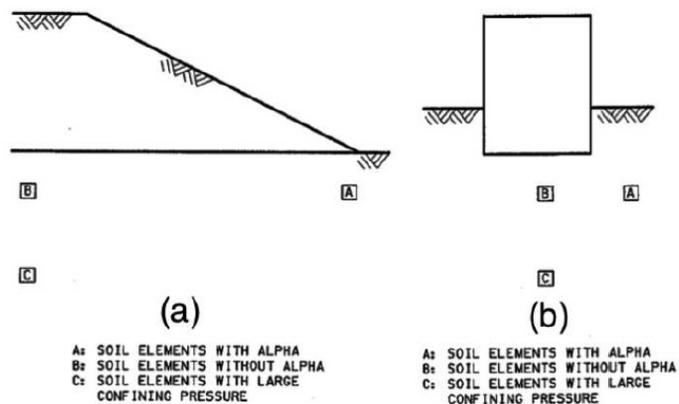
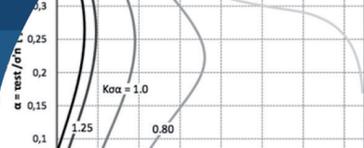


Figura 1: Elementos de suelo bajo: (a) terraplén y (b) estructura (Pillai, 1991)

Contexto minero – depósitos de relaves

En el ámbito de la minería, la explotación del mineral trae consigo una generación importante de material de desecho, el cual debe ser depositado en sectores específicos denominados “tranques de relaves”. Dichas estructuras de tierra pueden llegar a tener dimensiones considerables y por ende taludes importantes, lo que origina que la relación entre la presión de confinamiento y el corte estático inicial sea relevante en los estados tensionales en terreno. Dada la gran producción de cobre en Chile, sumado a la activa sismicidad, es posible señalar que es de vital importancia el estudio del comportamiento cíclico de las arenas de relaves (Verdugo, 2009).

Para el caso del efecto de la presión de confinamiento, a partir de muchas investigaciones experimentales que se han llevado a cabo para distintas arenas naturales, se ha llegado a la conclusión de que la presión de confinamiento tiende a reducir la resistencia cíclica, para un mismo nivel de densidad relativa. El aumento en la presión de confinamiento posee un efecto supresor en la dilatancia y, por ende, se traduce en un incremento de la contractividad del material, es decir, el efecto en la resistencia cíclica de la presión de consolidación y la densidad relativa de una arena está relacionado con la posición relativa que tiene su estado inicial con respecto a la línea de estado último. Se presenta en la Figura 2 una recopilación de la variación de K_σ determinada por diversos investigadores en estudios sobre arena de relaves, junto a la curva de Seed y Harder (1990) para arenas naturales. De dicha figura se puede observar que los resultados para arena de relaves muestran un decrecimiento menor del factor K_σ producto



de la presión de confinamiento, en comparación con lo estipulado para arenas naturales en el rango de presiones de 0 hasta 10 kg/cm².

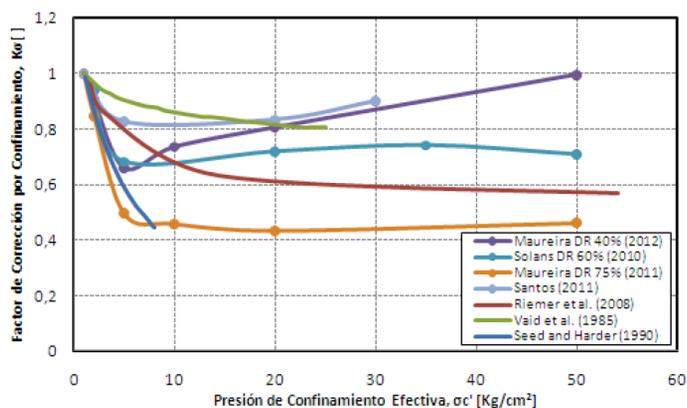


Figura 2: Recopilación de curvas de K_{σ} versus presión de confinamiento efectiva para arenas de relaves.

Lo anterior recalca la razón de porqué es necesario estudiar la arena de relaves en profundidad, ya que las presiones de confinamiento en los proyectos que involucran este material son mayores a las que han sido utilizadas para la determinación de las curvas de arenas naturales (10 kg/cm²). Esto significa que extrapolaciones a partir de ellas originarían diseños no óptimos. Además, es necesario tener en consideración la clara dependencia del factor K_{σ} respecto de la densidad relativa a la cual se está evaluando, argumento que supedita enormemente los valores a utilizar para el diseño de cualquier obra en ingeniería.

Respecto al efecto que posee el corte estático inicial en la resistencia cíclica, muchas investigaciones han sido llevadas a cabo a lo largo de los años buscando caracterizar el papel que juega esta variable de estado, sin embargo, las conclusiones a las cuales se han llegado han sido en gran medida contradictorias. Lee y Seed (1967) concluyeron que a mayor valor del corte estático inicial en un plano con una presión normal dada, mayor es el número de ciclos necesarios para alcanzar cierto nivel de deformación determinada. En contraste a estas conclusiones, Castro y Poulos (1977) concluyeron que el incremento del esfuerzo de corte máximo motiva un aumento de la deformación axial, debido a que el estado tensional al que se somete a la muestra se encuentra más cerca de la superficie de falla. En esa misma línea, otros investigadores para muestras de arena sueltas, han obtenido conclusiones que también

discrepan de las postuladas por Lee y Seed (1967). Destacar además que, en general, la evidencia bibliográfica del efecto del corte estático se enfoca principalmente en el estudio del comportamiento de arenas naturales.

En la Figura 3 se presenta una recopilación de curvas de K_{α} determinadas por Corral (2008) y Asenjo (2010) para una arena de relaves similar a la de este estudio y Santos (2011) en *slurry* de arenas de la misma naturaleza. De dicha figura se puede observar que los resultados para arena de relaves muestran cierta dispersión, pero mantienen en esencia la misma tendencia. Para el caso de muestras sueltas, Corral postula que el factor K_{α} aumenta hasta cierto valor del corte estático, para luego disminuir con incrementos de dicha variable. Para el caso de muestras densas, tanto los resultados de Corral como los de Asenjo muestran un continuo incremento del factor K_{α} con el aumento del corte estático inicial, y la curva propuesta por Santos, para valores del parámetro α hasta 0.20, también exhibe dicha tendencia.

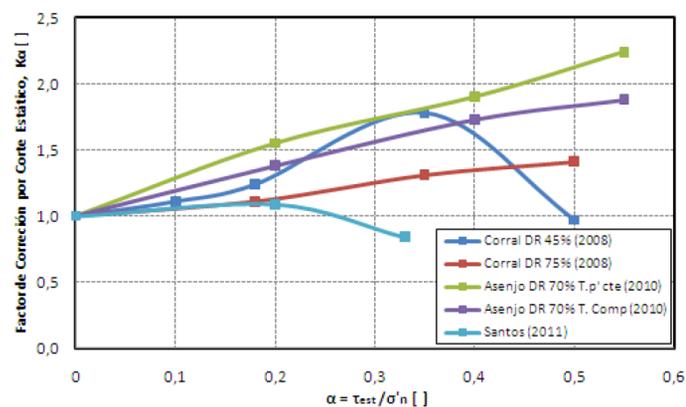
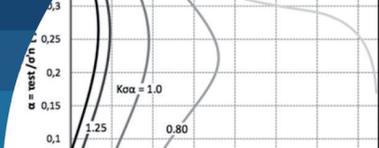


Figura 3: Recopilación de curvas de K_{α} respecto al corte estático para arenas de relaves.

Es muy importante consignar que los esfuerzos que han realizado distintas investigaciones experimentales en esta materia han apuntado a estudiar la variación de K_{σ} y K_{α} por separado y, con ello, representar distintas situaciones que podrían existir en terreno. Sin embargo, es pertinente destacar que la utilización de forma separada, o desacoplada, de los factores de corrección propuestos por Seed (1983), arrojan resultados que difieren de pruebas experimentales en arenas naturales donde se considera la presencia de ambas variables como condiciones iniciales de ensayo (Vaid *et al.*, 2001). Lo anterior trae como conclusión la posibilidad de que el efecto de ambas



variables no se encuentre debidamente representado por los factores existentes y que más bien corresponda a un efecto acoplado entre ellas, el que podría ser condensado en un factor único que se ha denominado K_{σ} .

Material utilizado y programa de ensayos

La arena de relaves utilizada posee un contenido de finos no plásticos de 23%, tamaño medio $D_{50} = 0.148$ mm, coeficiente de uniformidad $C_u = 5.72$ y coeficiente de curvatura $C_c = 1.3$. El índice de vacíos máximo obtenido fue $e_{\max} = 1.111$ y el índice de vacíos mínimo $e_{\min} = 0.462$; la gravedad específica corresponde a un valor de $G_s = 2.77$. El programa de ensayos estipulado consistió en un total de 139 ensayos triaxiales, los que se distribuyeron en 26 ensayos triaxiales monótonos no drenados, 108 triaxiales cíclicos no drenados y 5 consolidaciones isotrópicas. Se utilizaron 3 densidades relativas de confección de probetas (40%, 60% y 75%) y 4 presiones medias efectivas distintas (1, 5, 10 y 15 kg/cm²). Las muestras fueron preparadas bajo el método de compactación húmeda (*moist tamping*). La condición anisótropa de tensiones iniciales para el caso de ensayos con corte estático fue alcanzada en dos etapas. La primera fase correspondió a una consolidación isotrópica hasta un valor de presión media efectiva determinada, luego en una segunda fase se alcanzó el estado inicial de ensayo mediante una trayectoria triaxial drenada. Los niveles de corte estático utilizado se establecen a través de la relación $\eta = q_{est}/p'_0$, los valores corresponden a η igual a 0.30 y 0.45, que en término de K_c es igual a 1.75 y 2.29 ($K_c = \sigma'_1/\sigma'_3$), y en función de α es igual a 0.27 y 0.39 ($\alpha = q_{est}/\sigma'_0$) respectivamente (Vargas, 2015).

Resistencia cíclica no drenada de arena de relaves

De las Figuras 4(a) a 4(c) se puede observar el efecto que tiene la presión de confinamiento en la resistencia cíclica de la arena de relaves a distintos niveles de densidad, observándose que tanto para los casos con $DR_i = 75\%$ y con $DR_i = 60\%$, la resistencia cíclica disminuye al incrementar la presión media efectiva de consolidación. Lo anterior se debe a que a medida que aumenta la presión de confinamiento el comportamiento de las muestras se torna gradualmente más contractivo y, por ende, la resistencia cíclica progresivamente disminuye.

Por otra parte, para $DR_i = 40\%$ se origina un fenómeno diferente al anteriormente descrito, dado que luego de una reducción de la resistencia cíclica al aumentar la presión de confinamiento de 1 kg/cm² hasta 5 kg/cm², existe un aumento de la razón de tensiones cíclicas al incrementar la presión media efectiva. Esto último encuentra respuesta en la alta compresibilidad que exhiben las arenas de relaves en sus estados de densidades más bajas. El efecto beneficioso de la densificación del esqueleto de suelo en la resistencia cíclica tiene mayor preponderancia, que el aumento del comportamiento contractivo de las muestras producto del alza en la presión de confinamiento.

Cabe destacar que en las Figuras 4(a) a 4(c) se incorporan los resultados obtenidos por Corral (2008), Solans (2010) y Maureira (2012) con el fin de complementar la información para los ensayos con presión media efectiva de 1 kg/cm².

Respecto al efecto del corte estático inicial en la resistencia cíclica, en las Figuras 5, 6 y 7 se entregan los resultados de las pruebas triaxiales cíclicas bajo confinamiento anisótropo llevadas a cabo en probetas con densidades relativas iniciales de 40, 60 y 75%, respectivamente. De dichas figuras se puede notar que para un mismo nivel de corte estático inicial, la resistencia cíclica disminuye, al aumentar la presión de confinamiento para cada densidad relativa evaluada, y aumenta al incrementar el nivel de densidad de confección, a presión media efectiva y corte estático inicial constante.

Al considerar la densidad relativa inicial como variable de control, se puede observar que en el caso de los ensayos realizados en probetas con $DR_i = 40\%$ (Figura 5), los resultados muestran que para presiones de confinamiento entre 1 y 10 kg/cm², el efecto del aumento de K_c hasta 1.75 motiva un incremento de la resistencia cíclica respecto al caso sin corte estático inicial, para luego disminuir al aumentar K_c hasta un valor de 2.29. Se distingue, además, que a medida que se incrementa el valor de la presión media efectiva, el aumento inicial de la resistencia cíclica producto del incremento de K_c hasta 1.75 es progresivamente menor, lo cual alcanza el extremo para el caso de la presión de confinamiento de 15 kg/cm², donde se observa que existe una disminución de la resistencia cíclica respecto del caso sin corte estático inicial, para los dos niveles de K_c utilizados.

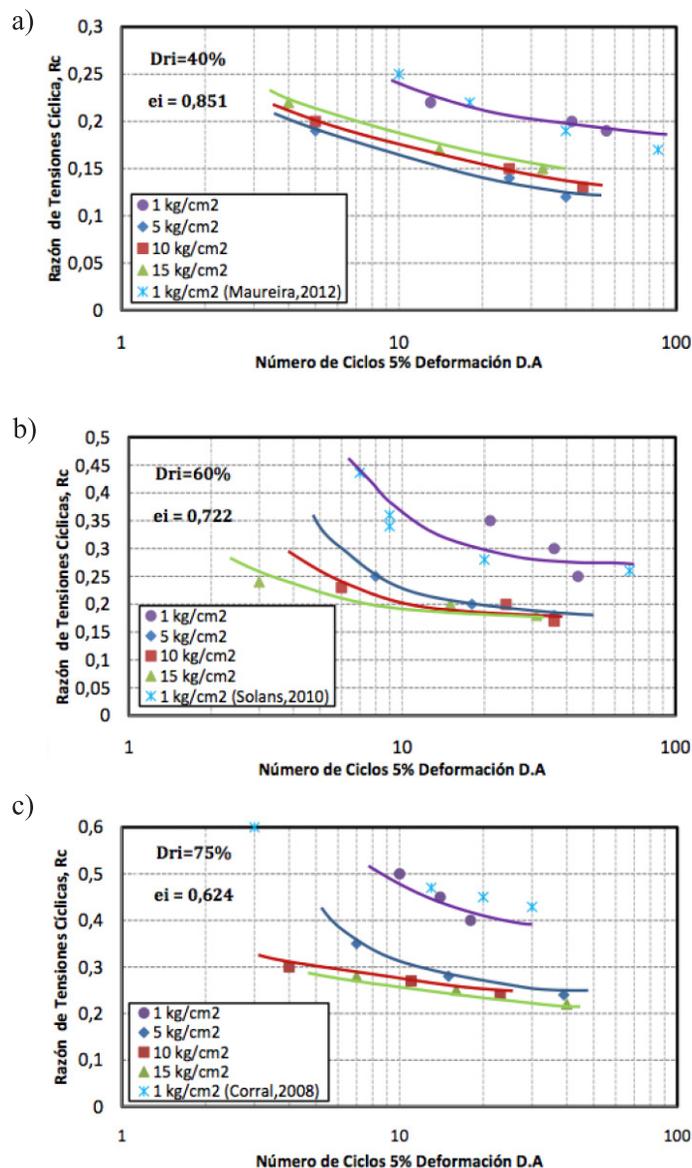
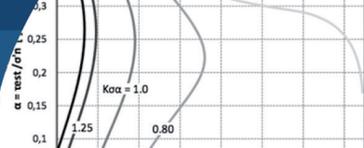


Figura 4: Efecto presión de confinamiento para arenas de relaves en condición isotrópica con DR_i : a) 40%, b) 60% y c) 75%

Cabe mencionar que la curva de resistencia cíclica para K_c igual a 2.29 se ubica por sobre la correspondiente al caso isotrópico sólo para 1 kg/cm^2 . En el caso de los ensayos realizados en probetas con $DR_i = 60\%$ (Figura 6), se observa que cuando las presiones de confinamiento corresponden a 1 y 5 kg/cm^2 , existe un aumento de la resistencia cíclica respecto al caso isotrópico al aumentar K_c hasta 1.75 , para luego continuar creciendo al incrementar el corte estático inicial hasta K_c igual a 2.29 . En contraste a lo anterior, al considerar presiones medias efectivas de 10 y 15 kg/cm^2 , inicialmente se tiene un incremento de la resistencia cíclica

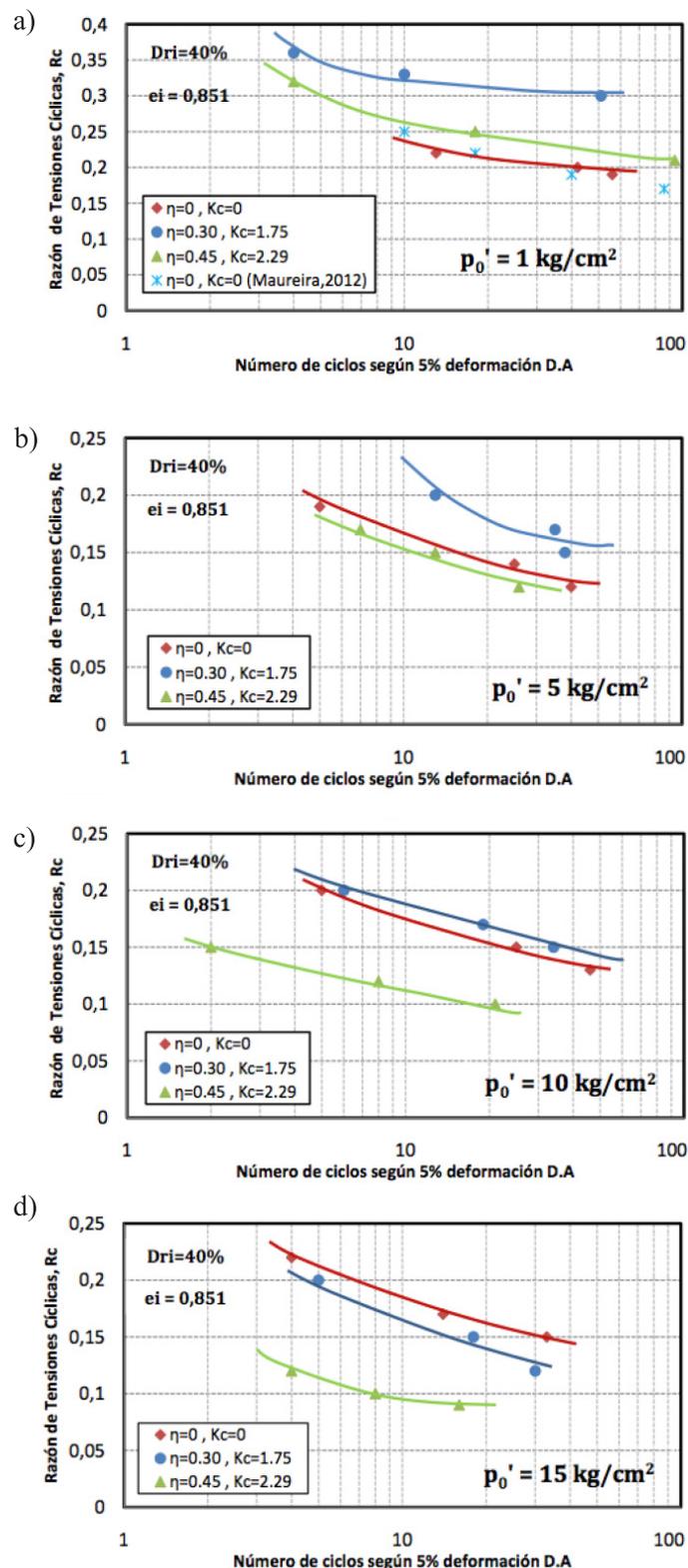


Figura 5: Efecto corte estático inicial para arenas de relaves con $DR_i = 40\%$ y p_0' : a) 1 kg/cm^2 , b) 5 kg/cm^2 c) 10 kg/cm^2 y d) 15 kg/cm^2

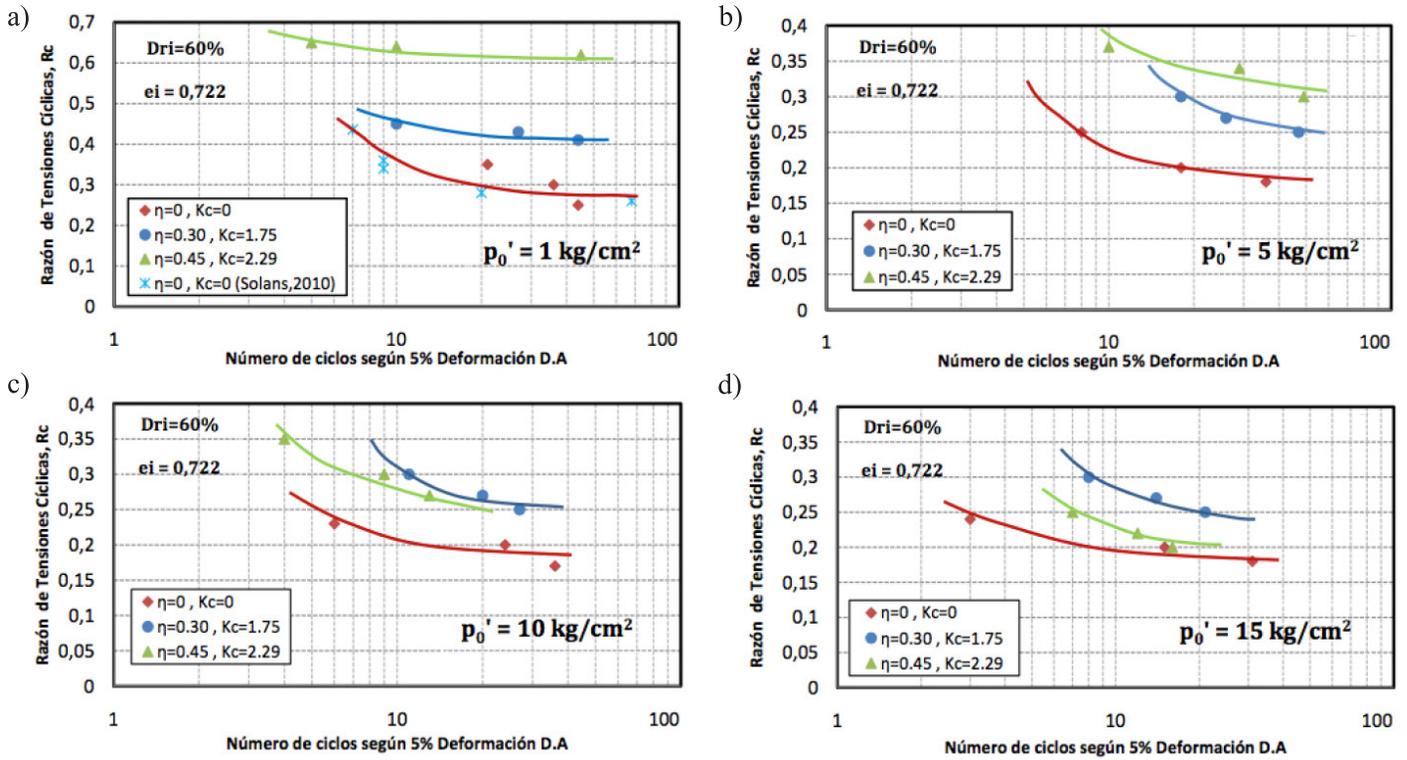
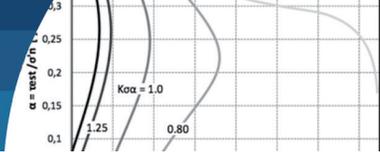


Figura 6: Efecto corte estático inicial para arenas de relaves con $DR_i = 60\%$ y p_0' : a) 1 kg/cm^2 , b) 5 kg/cm^2 , c) 10 kg/cm^2 y d) 15 kg/cm^2

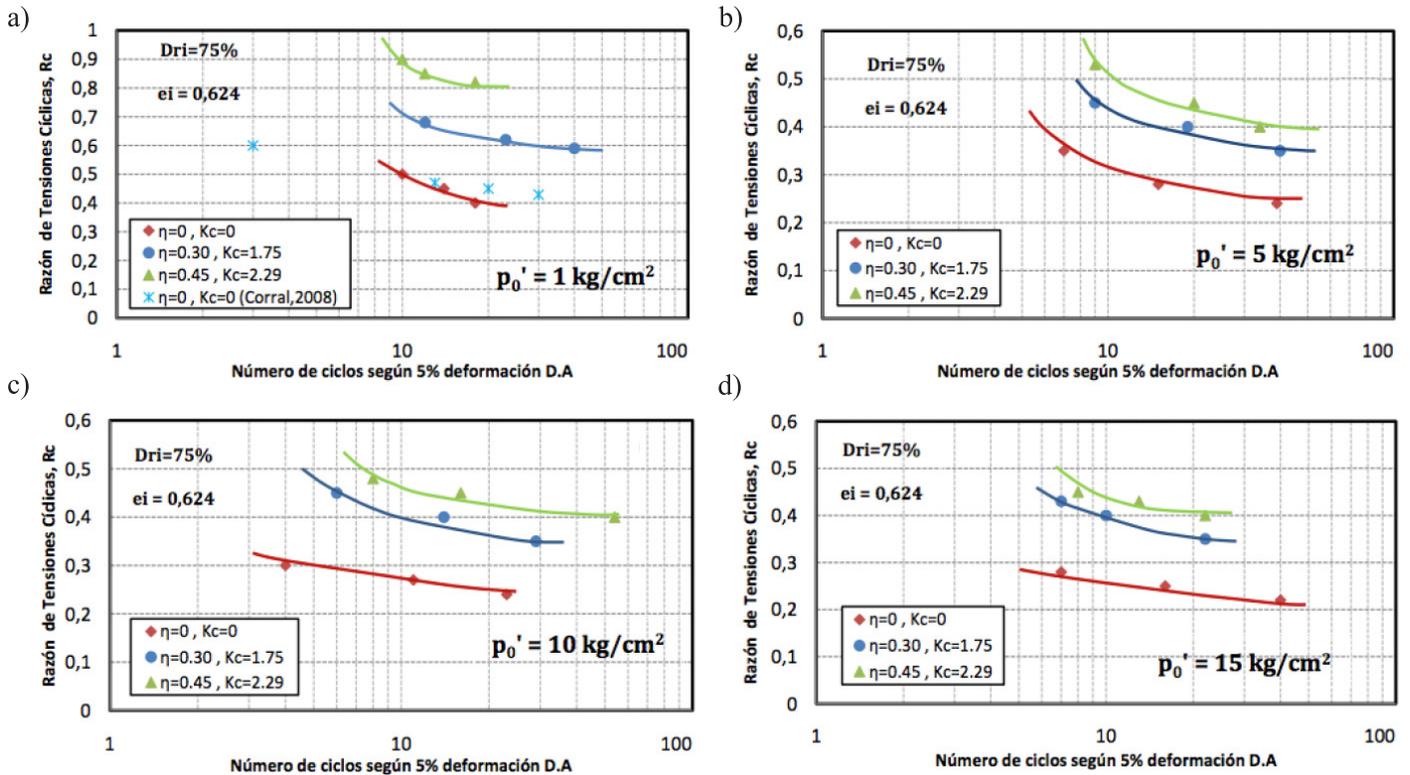
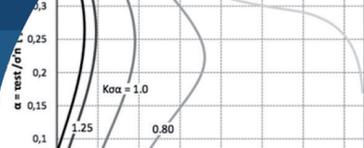


Figura 7: Efecto corte estático inicial para arenas de relaves con $DR_i = 75\%$ y p_0' : a) 1 kg/cm^2 , b) 5 kg/cm^2 , c) 10 kg/cm^2 y d) 15 kg/cm^2



al utilizar K_c igual a 1.75, para luego comenzar a disminuir al aumentar K_c hasta 2.29, lo que permite colegir que el aumento en la presión de confinamiento genera un cambio de tendencia del efecto del corte estático inicial. Cabe destacar que las curvas de resistencia cíclica obtenidas para todas las presiones de confinamiento y niveles de corte estático inicial de este nivel de densidad se ubicaron por sobre aquellas determinadas mediante consolidaciones isotrópicas.

Finalmente, para el caso de los ensayos realizados en probetas con $DR_i = 75\%$ (Figura 7), se advierte de los resultados presentados que para todas las presiones medias efectivas empleadas en el estudio, existe un aumento progresivo de la resistencia cíclica por sobre el caso isotrópico para ambos niveles de K_c utilizados.

Factor de corrección acoplado $K_{\sigma\alpha}$

En el método simplificado para la evaluación de la licuación desarrollado por Seed (1983) se propuso la corrección de la resistencia cíclica de un “estado basal”, para una presión de confinamiento de 1 kg/cm² y sin corte estático inicial ($\alpha = 0$), a partir de la utilización de los factores multiplicativos K_σ y K_α como se observa en la ecuación (1). Estos permiten corregir la resistencia cíclica debido al efecto de la presión de confinamiento y corte estático inicial de manera desacoplada.

$$CRR_{\sigma,\alpha} = CRR_{\sigma'_0=1 \text{ kg/cm}^2, \alpha=0} K_\sigma K_\alpha \quad (1)$$

Sin embargo, es posible determinar el factor de corrección de la resistencia cíclica debido al efecto acoplado de la presión de confinamiento y el corte estático inicial, el cual es denominado $K_{\sigma\alpha}$ y se determina según lo expresado en (2).

$$K_{\sigma\alpha} = \frac{CRR_{\sigma'_0 \geq 1 \text{ kg/cm}^2, \alpha \neq 0}}{CRR_{\sigma'_0=1 \text{ kg/cm}^2, \alpha=0}} \quad (2)$$

En este sentido, el factor de corrección $K_{\sigma\alpha}$ permite condensar el efecto de ambas variables, y de esta manera la modificación de la resistencia del “estado basal” queda mejor representada.

Utilizando la información disponible de la presente investigación es posible construir planos con líneas equipotenciales para distintos valores de $K_{\sigma\alpha}$, en función

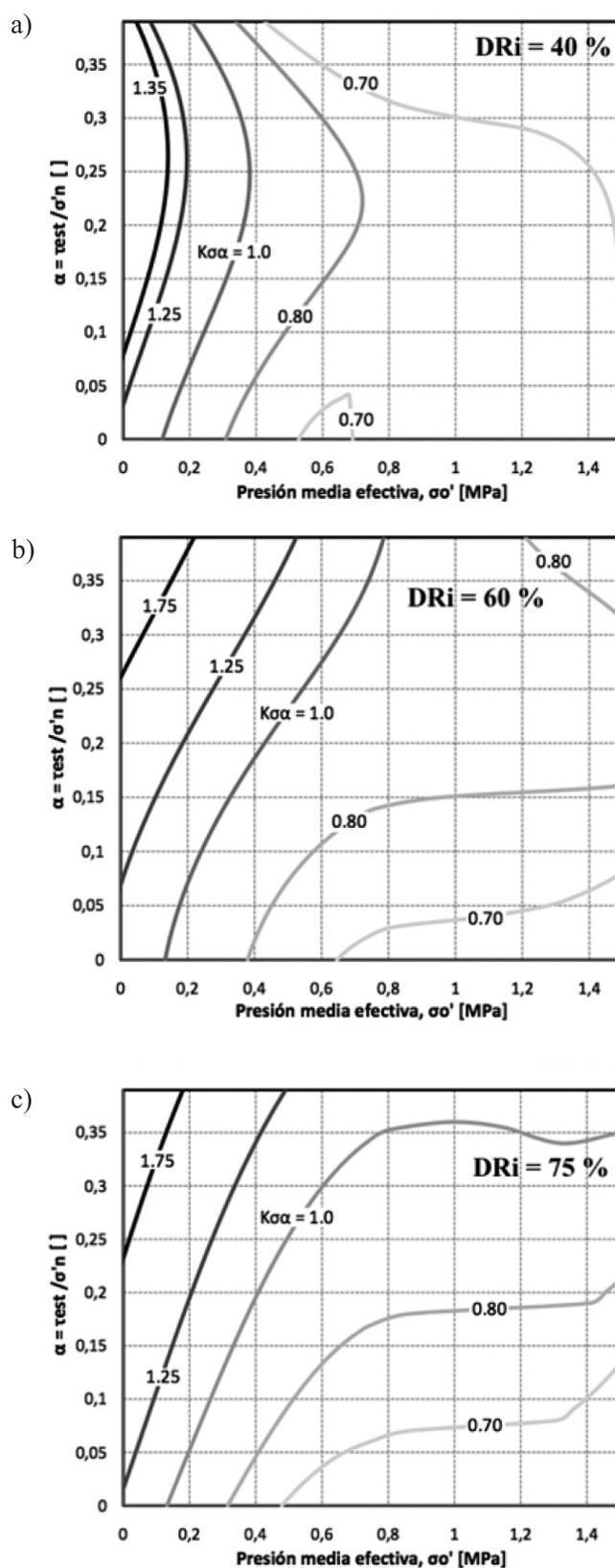
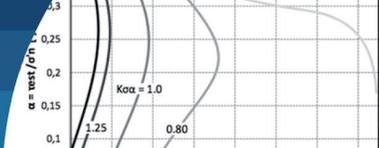


Figura 8: Factor $K_{\sigma\alpha}$ para la arena de relaves estudiada para DR_i : a) 40%, b) 60% y 75%



de la presión media efectiva y el parámetro α , para las diferentes densidades relativas empleadas. Estos planos permiten evaluar el efecto conjunto que tienen ambas variables en la resistencia cíclica de la arena de relaves, mediante la cuantificación directa del parámetro $K_{\sigma\alpha}$. Los planos con las curvas equipotenciales de $K_{\sigma\alpha}$ son presentados en la Figura 8.

Se observa que la presión de confinamiento tiene un efecto en la respuesta cíclica con corte estático inicial y viceversa. Estos resultados permiten concluir de manera directa que el nivel de confinamiento y el corte estático deben ser analizados de manera acoplada. Resulta evidente también que el grado de densificación de la arena juega un rol fundamental en los efectos de las variables antes indicadas. Los resultados presentados en la Figura 8 pueden ser considerados como referenciales y su utilización restringida a arenas de relaves de similares características a la utilizada en este estudio.

Conclusiones

La presión de confinamiento posee efectos en la resistencia cíclica de la arena de relaves que son distintos para los diferentes niveles de densidad, observándose que tanto para los casos densos con $DR_i = 75\%$ y medios densos con $DR_i = 60\%$, la resistencia cíclica (según 5% de deformación axial DA) disminuye al incrementar la presión media efectiva de consolidación. Lo anterior se debe a que a medida que aumenta la presión de confinamiento, el comportamiento de las muestras se torna gradualmente más contractivo, y por ende la resistencia cíclica progresivamente disminuye. Para el caso suelto con $DR_i = 40\%$ se origina un fenómeno diferente; luego de un decrecimiento de la resistencia cíclica al aumentar la presión de confinamiento de 1 kg/cm² hasta 5 kg/cm², existe un aumento de la resistencia cíclica al incrementar la presión media efectiva. Esto debido a la alta compresibilidad que exhiben las arenas de relaves en sus estados de densidades más bajas, por lo que el efecto beneficioso de la densificación del esqueleto de suelo tiene mayor preponderancia que el aumento del comportamiento contractivo de las muestras.

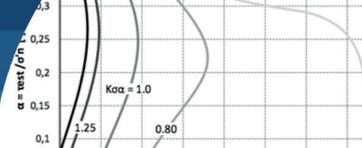
En muestras con comportamientos dilatantes, el incremento del corte estático inicial genera un aumento de la resistencia cíclica. En cambio, en muestras con comportamientos contractivos, el aumento o disminución de la resistencia

cíclica producto del corte estático inicial depende de la reversibilidad de corte cíclico y de la posición relativa de q_{peak} respecto de la resistencia al corte no drenada S_u .

Los factores K_σ y K_α obtenidos para arenas naturales y disponibles en la literatura, no entregan resultados necesariamente aplicables a arenas de relaves. Lo anterior debido a que las partículas naturales difieren en resistencia y angulosidad de las partículas de arenas de relaves. Además, el nivel de altas presiones no está cubierto, por lo que su extrapolación arrojaría diseños no óptimos. Se han obtenido planos con líneas equipotenciales de $K_{\sigma\alpha}$, para cada densidad relativa estudiada, los que permiten evaluar el efecto de la combinación de presión media efectiva y corte estático inicial (representado por el parámetro α) en la resistencia cíclica de la arena de relaves. La estimación del efecto de la presión media efectiva y el corte estático inicial mediante la aplicación de los factores K_σ y K_α por separado, origina que la resistencia cíclica calculada sea mayor a la determinada mediante la utilización del factor acoplado $K_{\sigma\alpha}$, lo cual no es conservador. La diferencia entre ambas metodologías es más evidente al aumentar tanto el corte estático inicial como la presión media efectiva, para DR_i igual a 40% y 60%. Para igual a 75%, ambas metodologías resultan similares.

Referencias

- Asenjo, R.H. (2010). *Efecto del esfuerzo de corte estático inicial en la resistencia cíclica en una arena de relaves*. Memoria de título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Castro, G. and Poulos, S.J. (1977). Factors affecting liquefaction and cyclic mobility. *Journal of the Geotechnical Engineering Division* **103**(6), 501-516
- Corral, G. (2008). *Efecto del esfuerzo de corte estático inicial en la resistencia cíclica en arenas*. Tesis de Magíster, Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Lee, K.L. and Seed, H.B. (1967). Cyclic stress conditions causing liquefaction of sand. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* **93**(1), 47-70
- Maureira, S. (2012). *Respuesta cíclica de arena de relaves en un amplio rango de presiones*. Tesis de Magíster, Universidad de Chile, Santiago, Chile



- Pillai, V.S. (1991). Liquefaction analysis of sands: Some interpretation of Seed's (sloping ground) and (depth) correction factors using steady state concept. *Second International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, St. Louis MO, USA, 579-587
- Riemer, M., Moriwaki, Y. and Obermeyer, J. (2008). Effect of high confining stresses on static and cyclic strengths of mine tailing materials. *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics Congress IV*, Sacramento CA, USA
- Santos, E. (2011). *Comportamiento monótono y cíclico no drenado de arenas de relaves integrales*. Tesis de Magister, Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Seed, H.B. (1983). Earthquake-resistant design of earth dams. *Symposium of Seismic Design of Embankments and Caverns*. T.R. Howard (ed.), ASCE, New York, USA, 41-64
- Seed, R.B. and Harder, L.F. (1990). SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength. *H. Bolton Seed Memorial Symposium*. J.M. Duncan (ed.), University of California, Berkeley, USA, vol. 2, 351-376
- Solans, D. (2010). *Equipo triaxial monótono y cíclico de altas presiones y su aplicación en arenas de relaves*. Tesis de Magister, Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Vaid, Y.P., Stedman, J.D. and Sivathayalan, S. (2001). Confining stress and static shear effects in cyclic liquefaction. *Canadian Geotechnical Journal* 38(3), 580-591
- Vaid, Y. P., Chern, J.C. and Tumi, H. (1985). Confining pressure, grain angularity, and liquefaction. *Journal of Geotechnical Engineering* 111(10), 1229-1235
- Vargas, M. (2015). *Efecto acoplado de la presión de confinamiento y el corte estático inicial en la resistencia cíclica de arena de relaves*. Tesis de Magister, Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Verdugo, R. (2009). Seismic performance based-design of large earth and tailing dams. *International Conference on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering – from case history to practice*. Kokusho, Tsukamoto and Yoshimine (eds.), Tsukuba, Japan, 41-60