



RESPUESTA CICLICA DE ARENA DE RELAVES SOMETIDA A ALTAS PRESIONES



Sebastián Maureira
CMGI Ltda.
smaureira@cmgi.cl

Ramón Verdugo
Universidad de Chile
rverdugo@cmgi.cl

RESUMEN

Los actuales planes de crecimiento de muros de arena de relaves implican que el nivel tensional solicitante en las capas inferiores aumente significativamente. Con el objetivo de estudiar el comportamiento cíclico de este material sujeto a altos niveles de sollicitaciones, se han llevado a cabo ensayos de laboratorio en muestras sueltas y densas en un rango de confinamientos entre 1 y 50 kg/cm², cuyos resultados difieren de lo observado y publicado en arenas de origen natural.

1. INTRODUCCIÓN. Durante el desarrollo del estudio de materiales granulares se ha puesto énfasis en describir el comportamiento geomecánico en un nivel de tensiones que está acorde con la magnitud de la mayoría de los proyectos de la ingeniería civil que se ejecutan en la actualidad. Esto es, en general, en un rango de presiones menores a 10 kg/cm². Sin embargo, cada vez es más frecuente encontrarse en situaciones donde el nivel tensional al que está sujeto una masa de suelos supera ampliamente los márgenes establecidos por la práctica tradicional.

En la realidad nacional, las obras de ingeniería de mayores dimensiones se encuentran en el área minera. En particular, los procesos mineros generan enormes volúmenes de desechos, denominados relaves, que requieren ser almacenados. Generalmente, los relaves son depositados en grandes extensiones de superficie delimitada por una o varias presas construidas con la fracción más gruesa de estos desechos, obtenida luego de un proceso de cicloneo.

Las principales presas de arenas de relaves en operación han sido diseñadas con alturas máximas cercanas a 150 m., pero debido a los actuales precios del cobre y en orden a satisfacer la demanda, ha sido necesario diseñar planes de crecimiento de estas presas que consideran alturas mayores a 250 m. (Campaña et al., 2007), implicando que el nivel tensional solicitante en las capas inferiores de material granular aumente significativamente a valores en torno a 50 kg/cm².

En consecuencia, el estudio del comportamiento de arenas de relaves sujetas a altas presiones resulta de gran interés debido a que las investigaciones sobre la respuesta de materiales granulares sometidos a altas presiones disponibles en la actualidad indican un importante cambio en la respuesta debido principalmente al fenómeno de rotura de partículas. Esto implica que la extrapolación o el establecimiento de relaciones generales entre parámetros basados en datos y ensayos a presiones habituales en la práctica tradicional no permiten predecir con razonable precisión el real comportamiento del suelo sometido a altas presiones.

No está demás señalar que es necesario caracterizar el comportamiento dinámico de arenas de relaves debido a las características sísmicas que posee Chile, y a la gran actividad minera del país. También es importante recalcar que la mayor parte de la información disponible sobre el comportamiento cíclico de arenas corresponde a arenas naturales ensayadas bajo presiones menores a 10 kg/cm². En este contexto la presente investigación aborda el tema de la respuesta cíclica de arenas de relaves bajo altas presiones.

2. MATERIAL ENSAYADO Y PROGRAMA DE ENSAYOS. La arena de relaves utilizada en esta investigación proviene del muro El Torito, de la mina de cobre El Soldado, ubicada en las cercanías de la localidad de El Melón, V Región. La arena se obtuvo luego del proceso de cicloneo. El material en estudio corresponde a una arena fina bien graduada de color gris claro, con partículas angulosas y sub-angulosas generadas por el proceso de obtención del mineral que involucra tronaduras, chancado y molienda. En la Figura 1 se presenta una fotografía microscópica y su distribución granulométrica, y en la Tabla 1 se entregan las propiedades índices de la arena en estudio.

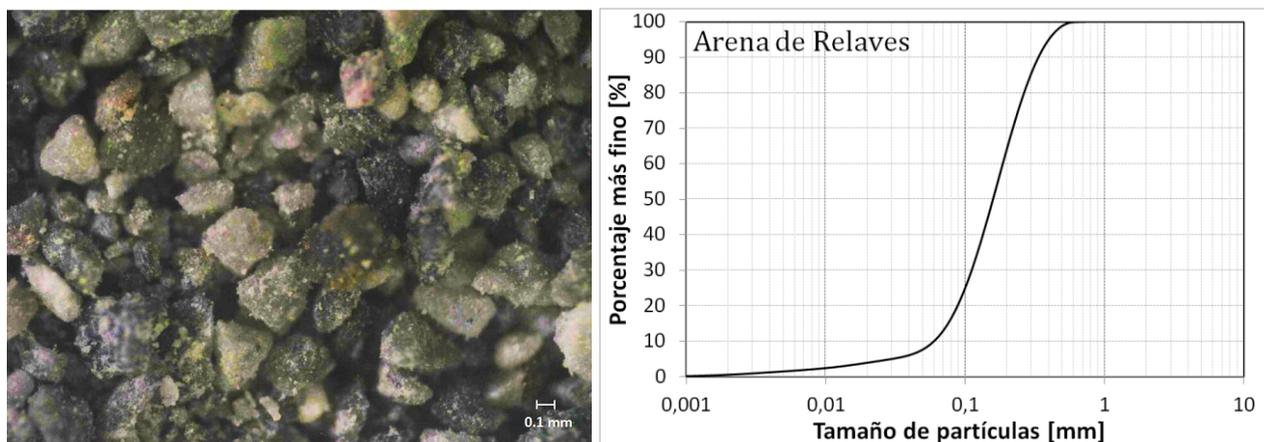


Figura 1.- Fotografía microscópica y distribución granulométrica de la arena de relaves.

Tabla 1.- Propiedades índices de la arena de relaves.

%Finos	G_s	e_{max}	e_{min}	IP	D_{100}	C_c	C_u	USCS
14	2.75	1.184	0.503	NP	0.63	1.12	3.13	SM

El equipo triaxial de altas presiones utilizado en esta investigación fue diseñado e implementado por Solans (2010) en el Laboratorio de Sólidos y Medios Particulados de la Universidad de Chile. Este equipo permite la ejecución de ensayos monótonos y cíclicos a presiones de confinamiento de hasta 60 kg/cm^2 , en probetas de 10 por 20 cm y 5 por 10 cm (diámetro-altura)

El programa de ensayos contempló la ejecución de ensayos triaxiales cíclicos no drenados en muestras de arena densa y suelta. Estos ensayos se realizaron a presión de cámara constante y con una carga axial sinusoidal de frecuencia 1 ciclo/min.

Adicionalmente, se llevaron a cabo ensayos de consolidación isótropa con el objetivo de evaluar las características de compresibilidad y cambio volumétrico del material bajo sollicitación hidrostática.

Todos los ensayos se realizaron en muestras reconstituidas de arena de relaves mediante el método de compactación húmeda ("*wet tamping*"). Las dimensiones del molde de confección de las probetas son 5 cm de diámetro y 10 cm de alto. Se utilizó como criterio de saturación de las probetas, un valor del parámetro B de Skempton mayor o igual a 0.95, aplicando para estos efectos una contrapresión de 2 kg/cm^2 a las muestras.

3. COMPRESIBILIDAD. En el plano $e-p'$ es posible definir fronteras que determinan la región de todas las combinaciones posibles de índice de vacíos y presión media efectiva que pueden existir. En el caso de arenas reconstituidas existen dos líneas que definen los estados de

empaquetamiento máximo y mínimo del esqueleto granular que dependen del método de confección y que caracterizan la respuesta del suelo (Verdugo and Ishihara, 1996). En la Figura 2 se realiza una comparación de la compresibilidad volumétrica exhibida por la arena de relaves con la registrada para dos arenas naturales: Toyoura y Sengenyama, obtenidas en el trabajo de Verdugo (1992) durante ensayos de consolidación isotrópica. Adicionalmente, en la Figura 3 se incluyen los resultados obtenidos por Maureira (2012) en arena de Ottawa, correspondiente a una arena natural ampliamente comercializada y utilizada por numerosos investigadores en el estudio del comportamiento de materiales granulares.

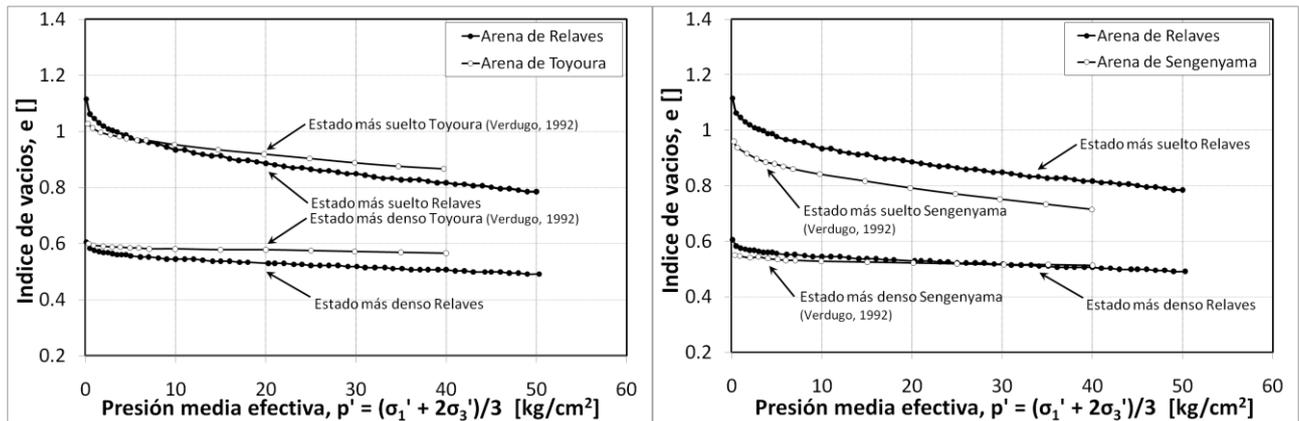


Figura 2.- Comparación de la compresibilidad volumétrica de la arena de relaves con la arena de Toyoura y Sengenyama en ensayos de consolidación isotrópica.

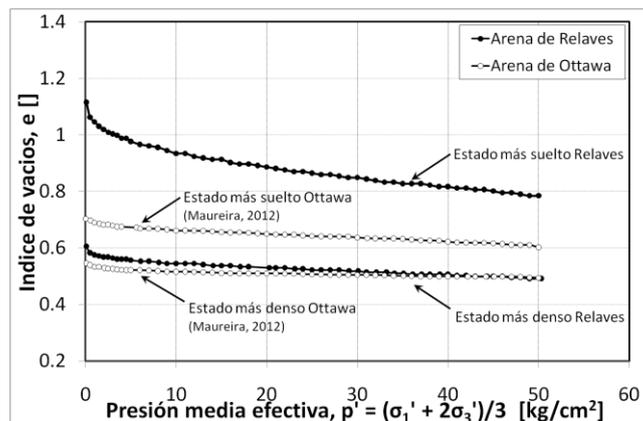


Figura 3.- Comparación de la compresibilidad volumétrica de la arena de relaves con la arena de Ottawa en ensayos de consolidación isotrópica.

Los resultados presentados indican una considerable diferencia en la región de estados posibles y en la compresibilidad entre arenas naturales y la registrada en la arena de relaves en estudio. Esto último se observa con mayor claridad al graficar las curvas de consolidación isotrópicas normalizadas por el índice de vacíos inicial, como se muestra en la Figura 4. Es evidente la diferencia en la compresibilidad que se registra en los estados más sueltos, donde se aprecia que el cambio en el índice de vacíos puede ser hasta dos veces menor en arenas naturales cuando se alcanza la presión de confinamiento más alta del ensayo. En el estado más denso también se observa una mayor compresibilidad de la arena de relaves aproximadamente del mismo orden. Otra particularidad es que la variación en el índice de vacíos aumenta drásticamente durante la primera etapa de la consolidación en muestras de arena de relaves mientras que para las arenas naturales la variación volumétrica es gradual a lo largo de todo el rango de presiones. Estos resultados concuerdan con numerosas investigaciones que muestran la gran diferencia en

compresibilidad entre arenas de relaves con la exhibida por arenas naturales (Solans, 2010; Lee and Farhoomand, 1967; Vaid et al., 1985).

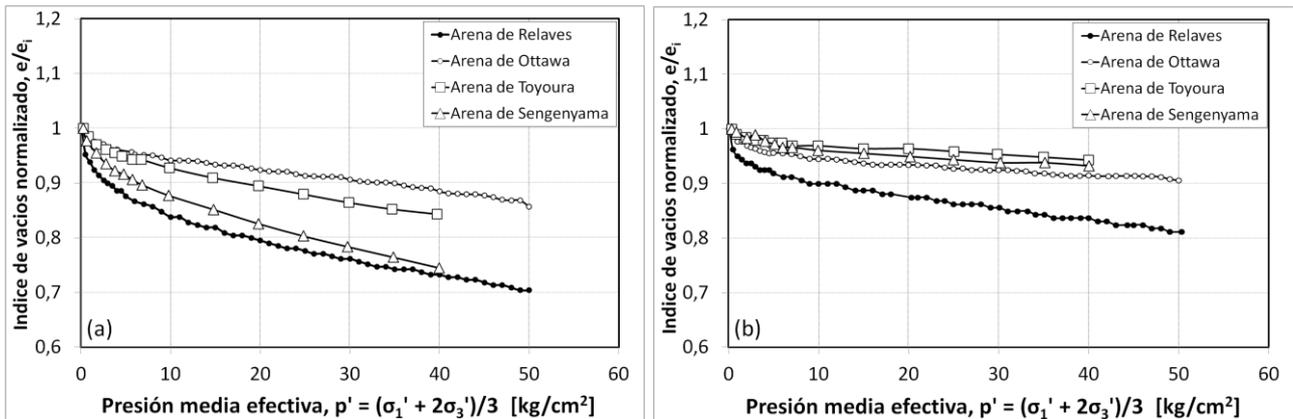


Figura 4.- Comparación de las curvas de consolidación normalizadas en arenas naturales y de relaves: (a) estados más sueltos y (b) estados más densos.

4. ROTURA DE PARTICULAS. Al comparar las curvas granulométricas de la arena de relaves obtenidas luego de la consolidación isotrópica hasta una presión de confinamiento de 50 kg/cm^2 , en muestras preparadas al estado más suelto, 40% y 70% de densidad relativa y al estado más denso (Figura 5) se observa un paulatino incremento en la fracción más fina de la muestra, que depende de la densidad relativa de confección.

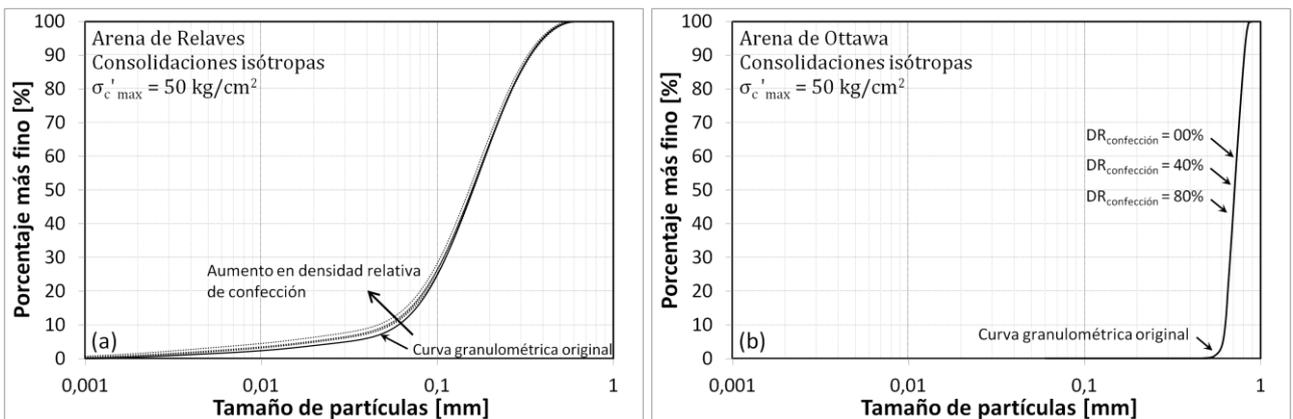


Figura 5.- Distribución granulométrica inicial y post-consolidaciones isotrópicas: (a) arena de relaves y (b) arena de Ottawa.

Al contrario de lo reportado en estudios sobre arenas naturales (Bopp and Lade, 1997; Hardin, 1985; Hagerty et al., 1993), el efecto de la rotura de partículas en la arena de relaves ensayada es más importante a medida que la densidad relativa de confección aumenta, demostrado por un aumento de 1% y 3% en el contenido de finos posterior a la consolidación isotrópica en muestras confeccionadas al estado más suelto y denso, respectivamente. Solans (2010) utilizando la misma arena de relaves en ensayos de consolidación isotrópica observó un similar comportamiento. Este resultado podría deberse a que, por las características angulosas de las partículas de arena de relaves y por el contenido de finos, las muestras más sueltas poseen estructuras con grandes

vacíos, lo que permite una mayor capacidad de reordenamiento o de reorganización de las partículas antes de que la rotura comience.

No obstante a que se ha registrado rotura de partículas en la arena de relaves durante los ensayos de consolidación isótropa, al analizar las curvas de compresión volumétrica (Figura 4) no se aprecian singularidades que permitan indicar el comienzo de un quiebre importante de granos dentro del esqueleto granular. Este hecho indicaría que la rotura de partículas en esta arena debe ser un fenómeno gradual a lo largo del ensayo, probablemente asociado al quiebre y pulido de los cantos angulosos.

Al comparar los resultados presentados en la Figura 5 se aprecia que la arena de relaves sufre rotura en todo el rango de densidades de confección utilizadas, mientras que las partículas redondeadas de la arena de Ottawa quedan intactas bajo el mismo nivel tensional aplicado. Lo anterior se ajusta a lo reportado por Lee and Farhoomand (1967), Hagerty et al. (1993), Lade et al. (1996), entre otros, en cuanto que partículas redondeadas sufren una menor rotura que las angulosas.

5. COMPORTAMIENTO CICLICO. Con el objetivo de estudiar el efecto de la presión de confinamiento en la resistencia cíclica de arena de relaves se llevaron a cabo ensayos triaxiales cíclicos no drenados. En la Figura 6 se presentan las curvas de resistencia cíclica de arena de relaves a 40% y 75% de densidad relativa de confección, en términos del número de ciclos para alcanzar un 100% de generación de presiones de poros.

Se observa que el efecto de la presión de confinamiento es diferente en muestras sueltas que en muestras densas. En el caso suelto, luego de una disminución inicial de la resistencia hasta una presión de 5 kg/cm², el aumento de la presión confinante tiene por consecuencia un aumento de la resistencia cíclica. Este resultado difiere con la mayoría de los estudios en este tema y con el conocimiento general dentro del área, donde es ampliamente aceptado que el aumento de la presión de confinamiento provoca una disminución de la resistencia cíclica. Por el contrario, los resultados obtenidos en este trabajo sobre muestras densas de arena de relave, y en la mayor parte de las investigaciones sobre este tema, indican que la resistencia cíclica disminuye a medida que aumenta la presión confinante.

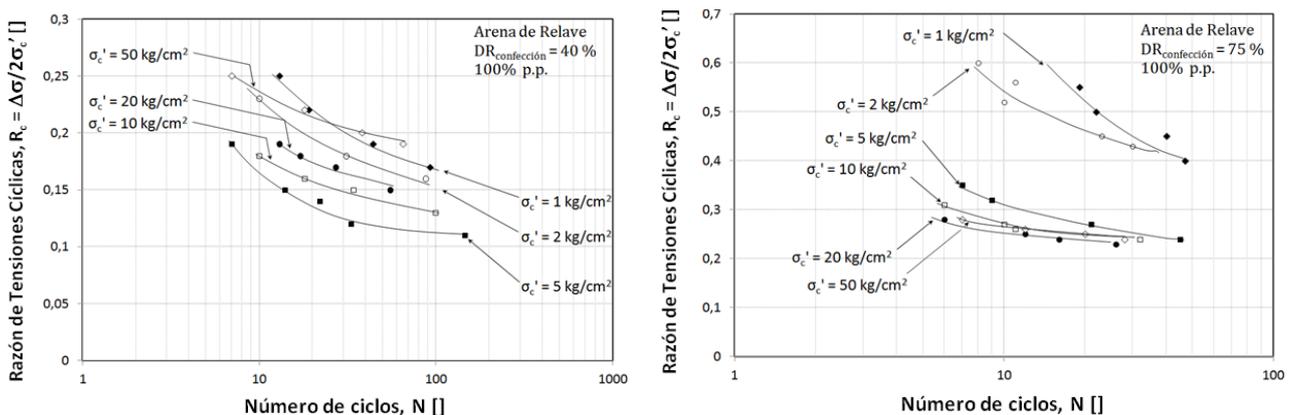


Figura 6.- Curvas de resistencia cíclica de la arena de relaves en muestras sueltas y densas.

Para considerar el efecto de la presión de confinamiento, Seed (1983) recomendó la incorporación de un factor de corrección para estimar la resistencia cíclica a presiones de confinamiento mayores a 100 kPa. Este factor, denominado factor de corrección por confinamiento K_{σ} , es

determinado mediante la razón entre las resistencias cíclicas obtenidas de muestras consolidadas isotrópicamente a un confinamiento dado, $CRR_{\sigma_c'}$, y a una presión de confinamiento igual a 100 kPa, $CRR_{\sigma_c'=100kPa}$.

$$K_{\sigma} = \frac{CRR_{\sigma_c'}}{CRR_{\sigma_c'=100kPa}} \quad (1)$$

En la Figura 7.a se comparan los valores del factor K_{σ} en el caso de muestras sueltas con los habitualmente utilizados en la práctica geotécnica. Es claro que asumir los valores propuestos conduciría a una significativa subestimación de la resistencia cíclica de muestras sueltas de la arena de relaves en estudio y que este error aumenta a medida que la presión de confinamiento crece. Es importante mencionar que las curvas recomendadas en la literatura han sido obtenidas de muestras medias y densas de arenas naturales limpias sujetas a presiones de confinamiento menores a 10 kg/cm². Por este motivo, en la Figura 7.b se comparan los valores del factor de corrección por confinamiento obtenidos por Santos (2011) y por Hynes et al. (1998) en arenas de relaves sueltas. En este caso se observa la misma tendencia de la respuesta cíclica frente al aumento de la presión confinante de muestras sueltas.

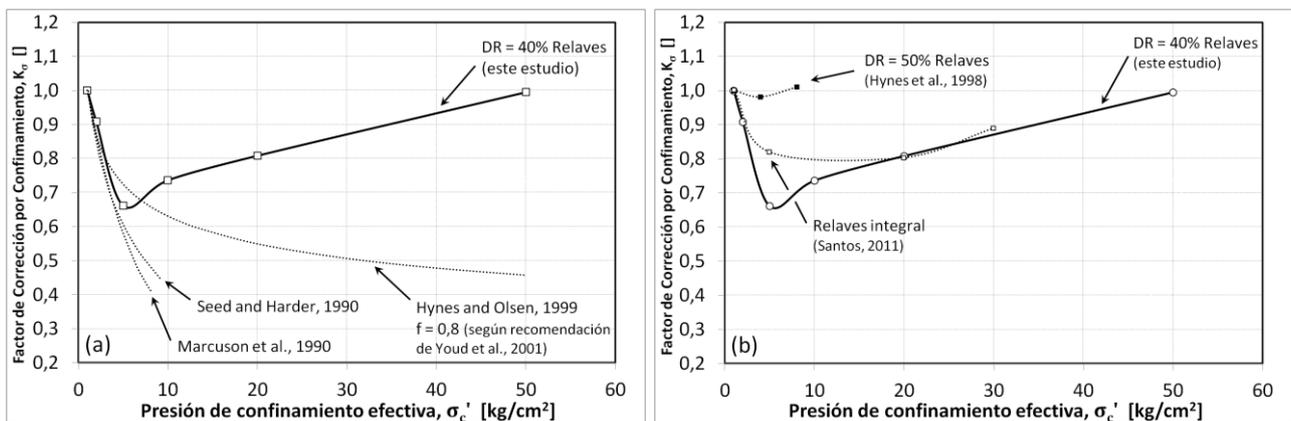


Figura 7.- Comparación del factor de corrección por confinamiento K_{σ} obtenido en muestras sueltas de arena de relaves con: (a) valores recomendados en la literatura técnica, (b) valores reportados en investigaciones sobre muestras sueltas de arenas de relaves.

Por otro lado, al comparar los valores del factor de corrección por confinamiento K_{σ} obtenidos en muestras densas de arena de relaves con los propuestos en la literatura (Figura 8.a) se observa un mejor ajuste en la tendencia pero, debido a la naturaleza intrínseca de las curvas recomendadas comentada anteriormente, sigue existiendo una gran diferencia en los valores a presiones mayores a 10 kg/cm², que podría conducir a una subestimación de la resistencia cíclica de la arena de relaves. Por otro lado, cuando la curva obtenida en este estudio se compara con las obtenidas por otros investigadores en muestras medias densas y densas de arena de relaves (Figura 8.b) se observa un comportamiento similar, caracterizado por una estabilización de la resistencia cíclica a presiones mayores a 10 kg/cm².

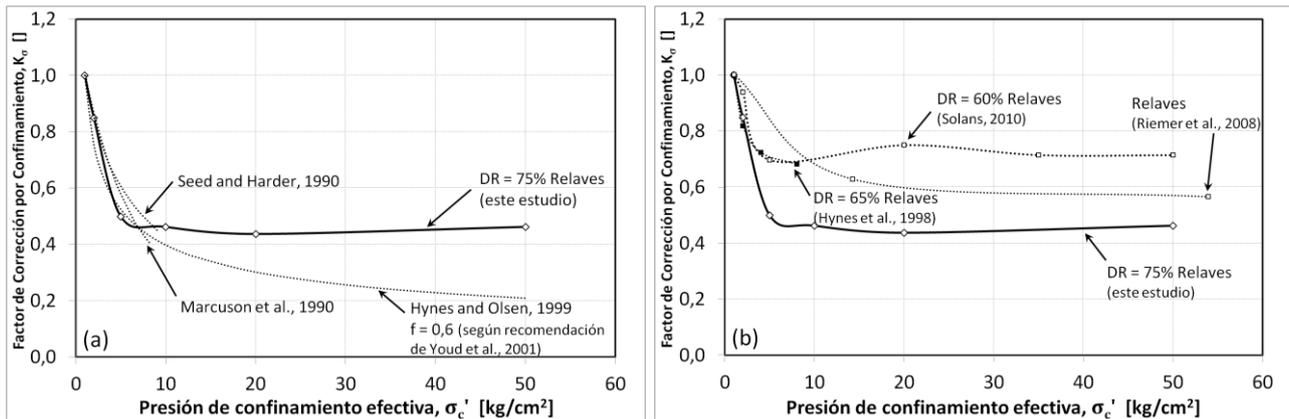


Figura 8.- Comparación del factor de corrección por confinamiento K_σ obtenido en muestras densas de arena de relave con: (a) valores recomendados en la literatura técnica, (b) valores reportados en investigaciones sobre muestras densas de arenas de relaves.

En resumen, la evidencia obtenida indica que asumir una única relación entre el factor de corrección por confinamiento K_σ y la presión de confinamiento para todas las arenas y para todas las densidades conduciría a valores erróneos de la resistencia cíclica, que en el caso de la arena de relaves utilizada en este estudio, sería demasiado conservador. Por lo tanto, el factor de corrección por confinamiento, K_σ , no resulta ser un parámetro que capture apropiadamente el efecto de la presión de confinamiento en la resistencia cíclica de arenas de relaves.

Con el objetivo de encontrar un parámetro que permita entender el comportamiento cíclico de arenas, Maureira (2012) realizó una comparación entre los estados iniciales con el estado último mediante la determinación de los parámetros de estado ψ (Been and Jefferies, 1985) e índice de estado I_s (Verdugo, 1992) utilizando la misma arena de relaves. Al interpretar los resultados se observó que el comportamiento cíclico se correlaciona débilmente con los parámetros antes mencionados, revelando que la resistencia cíclica no dependería mayormente de la posición entre el punto inicial de ensayo y la línea de estado último en término de índice de vacíos.

Como alternativa se ha definido un nuevo concepto denominado Densidad Relativa Modificada por Presión, $DR_{\text{presión}}$ que se determina con la siguiente expresión:

$$DR_{\text{presión}} = \frac{e_{\text{max}}^* - e}{e_{\text{max}}^* - e_{\text{min}}^*} \quad (2)$$

donde

- e Índice de vacíos inicial de ensayo a una presión media efectiva p'
- e_{max}^* Índice de vacíos de la línea de consolidación isotrópica del estado más suelto a la presión p'
- e_{min}^* Índice de vacíos de la línea de consolidación isotrópica del estado más denso a la presión p'

Este parámetro corresponde a la Densidad Relativa clásica, donde se modifican los índices de vacíos extremos (máximos y mínimos) de acuerdo a la variación de éstos con la presión.

La relación obtenida entre la resistencia cíclica y la densidad relativa modificada por presión se presenta en la Figura 9. Se observa que es el estado de densidad, con respecto a los estados más sueltos y más densos, al mismo nivel tensional, lo que determina la respuesta cíclica de la arena de relaves.

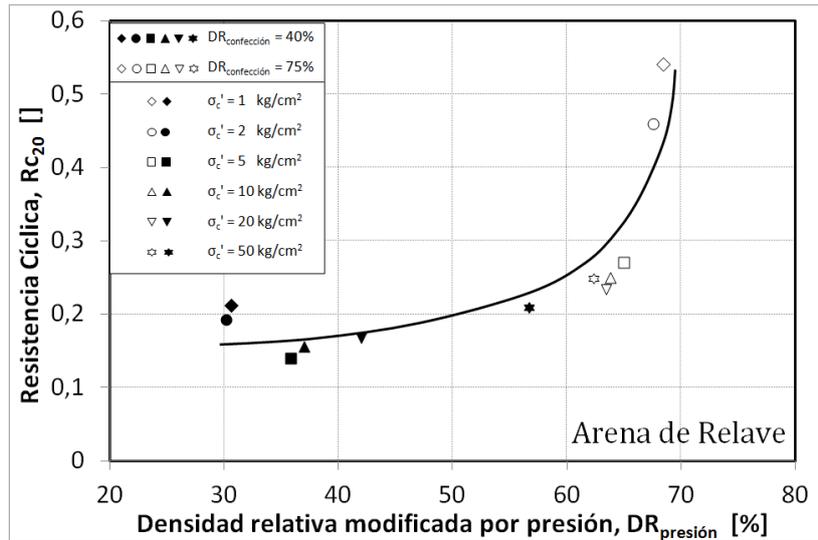


Figura 9.- Resistencia cíclica versus densidad relativa modificada por presión en arena de relaves.

Desde este enfoque es posible entender el comportamiento de las muestras sueltas que registraron un aumento de la resistencia con la presión de confinamiento, hecho que se contrapone a lo habitualmente adoptado en la práctica geotécnica. Como se observa en la Figura 10, la compresibilidad de la curva de consolidación isotrópica de la muestra preparada a una densidad relativa de 40% es mayor a la curva del estado más denso, pero similar a la curva del estado más suelto, lo que tiene por consecuencia un aumento en la densidad relativa modificada por presión. Por ejemplo, a partir de una presión media efectiva $p' = 5 \text{ kg/cm}^2$ se produce un aumento de $DR_{\text{presión}}$ desde 36% hasta 57% al confinamiento máximo de ensayo en la muestra confeccionada a 40% de densidad relativa, tal como se indica en la Figura 10. Este hecho implica un aumento de la resistencia cíclica con el incremento en el confinamiento.

Por el contrario, la curva de consolidación isotrópica de la muestra preparada a una densidad relativa de 75% tiene una compresibilidad significativamente menor a la curva del estado más suelto, pero similar a la del estado más denso, por lo que sucede el efecto contrario y por consiguiente se observa una disminución de la resistencia cíclica.

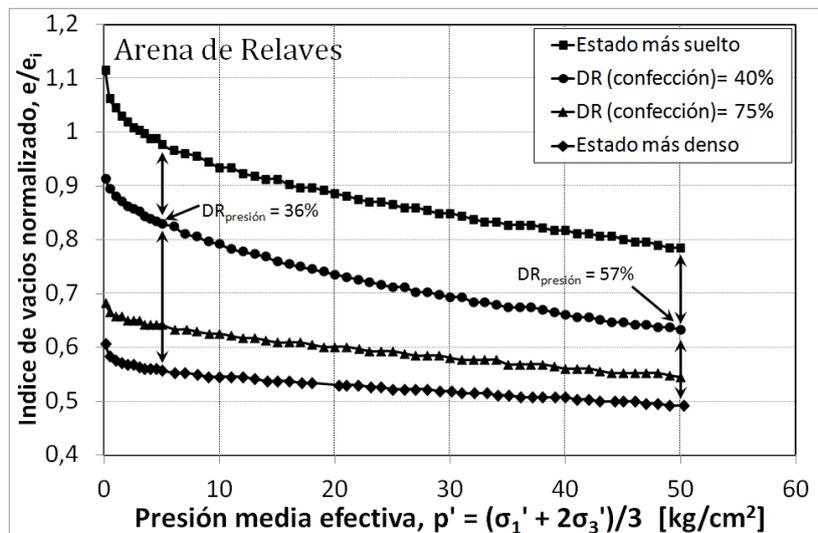


Figura 10.- Curvas de consolidación isotrópica en muestras de arena de relaves confeccionadas a distintas densidades.

6. CONCLUSIONES. De acuerdo a los resultados obtenidos de la ejecución del programa de ensayos experimentales considerados en este trabajo, es posible concluir lo siguiente:

- Las arenas de relaves presentan un comportamiento cíclico a elevadas presiones de confinamiento que difiere de lo observado y publicado en arenas de origen natural.
- Diseños de muros de depósitos de relaves de gran altura aplicando los criterios publicados para arenas naturales podrían resultar excesivamente conservadores, particularmente para bajas densidades relativas, por lo que se justifica un estudio de la respuesta cíclica del material granular para altas presiones de confinamiento.
- Se ha observado que la arena de relaves ensayada es más compresible que arenas naturales, lo que se traduce en una mayor variación del índice de vacíos máximo y mínimo con la presión confinante del relave respecto de arenas naturales. Este hecho resulta en una importante variación de la densidad relativa con el nivel de confinamiento.
- El aumento de la resistencia cíclica con la presión de confinamiento exhibido por la arena de relaves, se explica a través de la densificación que sufre el material durante la etapa de consolidación, que pasa a primar por sobre el efecto del aumento de la contractividad por el confinamiento.
- Existen numerosas relaciones publicadas entre el factor de corrección por confinamiento K_{σ} y la presión de confinamiento para arenas. En el caso de la arena de relave estudiada, el uso de las relaciones propuestas en la literatura está por el lado conservador. El error en la estimación de la resistencia cíclica utilizando los valores de K_{σ} recomendados crece con el aumento de la presión confinante y con la disminución de la densidad relativa. Por lo tanto, el uso de funciones y extrapolaciones de K_{σ} establecidas no es recomendable cuando el confinamiento es mayor a lo habitualmente utilizado en la práctica geotécnica.
- Se ha definido un nuevo parámetro que se ha denominado Densidad Relativa Modificada por Presión, $DR_{\text{presión}}$, que es la Densidad Relativa considerando las variaciones de e_{max} y e_{min} con el nivel de presión confinante. Con respecto al factor de corrección por confinamiento K_{σ} , la Densidad Relativa Modificada por Presión ($DR_{\text{presión}}$) proporciona una mejor interpretación de los resultados.

7. REFERENCIAS

- Been, K. and Jefferies, M. G. (1985). "A State Parameter for Sands". *Geotechnique*, Vol. 35 (2), 99-112.
- Bopp, P. A. and Lade, P. V. (1997). "Membrane Penetration in Granular Materials at High Pressures". *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 20 (3), 272-278.
- Campaña, J., Bard, E., Pollak, D. and Urquidi, J. (2007). "Resistencia al Corte de Arenas de Relaves a Altas Presiones". VI Congreso Chileno de Geotecnia, Valparaiso, Chile.
- Hagerty, M. M., Hite, D. R., Ullrich, C. R. and Hagerty, D. J. (1993). "One-Dimensional High-Pressure Compression of Granular Media". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 119 (1), 1-18.
- Hardin, B. O. (1985). "Crushing of Soil Particles". *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 111 (10), 1177-1192.

Hynes, M. E. and Olsen, R. S. (1999). "Influence of Confining Stress on Liquefaction Resistance". Proc. International Workshop on Physics and Mechanics of Soil Liquefaction, Rotterdam, The Netherlands, 145-152.

Hynes, M. E., Olsen, R. S. and Yule, D. E. (1998). "The Influence of Confining Stress on Liquefaction Resistance". Proc. of the 30th Joint Meeting of the U.S.-Japan Cooperative Program in Natural Resources Panel on Wind and Seismic Effects, NIST SP 931, 168-184.

Lade, P. V., Yamamuro, J. A. and Bopp, P. A. (1996). "Significance of particle crushing in granular materials". Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 122 (4), 309-316.

Lee, K. L. and Farhoomand, I. (1967). "Compressibility and Crushing of Granular Soil in Anisotropic Triaxial Compression". Canadian Geotechnical Journal, Vol. 4 (1), 68-86.

Marcuson, W. F., Hynes, M. E. and Franklin, A. G. (1990), "Evaluation and Use of Residual Strength in Seismic Safety Analysis of Embankments," Earthquake Spectra, Vol. 6 (3), 529-572.

Maureira, S. (2012). "Respuesta Cíclica de Arena de Relaves en un Amplio Rango de Presiones". Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Ingeniería Geotécnica y Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Riemer, M., Moriwaki, Y. and Obermeyer, J. (2008). "Effect of High Confining Stresses on Static and Cyclic Strengths of Mine Tailing Materials". Proc. Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics IV, Sacramento CA.

Santos, E. (2011). "Comportamiento monótono y cíclico no drenado de arenas de relaves integrales". Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Ingeniería Geotécnica y Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Seed, H. B. (1983). "Earthquake-Resistant Design of Earth Dams". Proc. Symposium Seismic Design of Earth Dams and Caverns, ASCE, New York, 41-64.

Seed, R. B. and Harder, L. F. (1990). "STP-based Analysis of Cyclic Pore Pressure Generation and Undrained Residual Strength". Proc. of the Seed Memorial Symposium, Vancouver, B.C., 351-376.

Solans, D. (2010). "Equipo Triaxial Monótono y Cíclico de Altas Presiones y su Aplicación en Arenas de Relaves". Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería mención Ingeniería Geotécnica y Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile.

Vaid, Y. P., Chern, J. C. and Tumi, H. (1985). "Confining Pressure, Grain Angularity, and Liquefaction". Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111 (10), 1229-1235.

Verdugo, R. (1992). "Characterization of Sandy Soil Behavior Under Large Deformation". Ph.D. Thesis, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Japan.

Verdugo, R. and Ishihara, K. (1996). "The Steady State of Sandy Soils". Soils and Foundations, Vol. 36 (2), 81-91.

Youd, T. L., Idriss, I. M., Andrus, R. D., Castro, G., Christian, J. T., Dobry, R., Finn, W. D. L., Harder, L. F. Jr., Hynes, M. E., Ishihara, K., Koester, J. P., Liao, S. S. C., Marcuson, W. F. III, Martin, G. R., Mitchell, J. K., Moriwaki, Y., Power, M. S., Robertson, P. K., Seed, R. B. and Stokoe, K. H. II (2001). "Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils". Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, Vol. 127 (10), 817-833.