

Estimación de los parámetros de resistencia al corte en suelos granulares gruesos

Estimation of shear strength parameter in coarse granular soils

Karem de la Hoz Alvarez

Ingeniero Civil, MSc, SRK Consulting S.A. Chile

kdelahoz@srk.cl

RESUMEN

Cuando se efectúan proyectos donde se involucran suelos granulares gruesos surge el problema de la falta de equipos para ensayar probetas de grandes dimensiones. Luego, resulta interesante poder utilizar una fracción de tamaño menor del material original y ensayar ésta como una muestra equivalente que represente el suelo original. En este artículo, se presentan resultados experimentales obtenidos en tres suelos gruesos, aplicando el método de curvas homotética o paralela, los cuales muestran la aplicabilidad y limitaciones de esta metodología. Además, se incluyen resultados de ensayos a materiales gruesos del Río Maipo, donde se aplica el método de corte, los cuales presentan las limitaciones de este método.

ABSTRACT

When projects take effect where get involved granular coarse soil happens the problem of equipments lack to test samples of large scale. Then, to be able to use an original material's fraction of minor size and to test this as a sample equivalent that represent the original soil is very interesting situation. the original soil is very attractive. In this paper, experimental results applying the parallel gradation method in three different coarse soils are presented, which show the applicability and limitations of this methodology. Also, experimental results applying the cut method in coarse materials of Río Maipo are presented, which show the limitations of this methodology.

1 INTRODUCCIÓN

Para la caracterización de suelos gruesos es habitual encontrarse con la dificultad de realizar ensayos triaxiales a gran escala, debido a la escasez de equipos de estas características o el alto costo económico que significa para algunos proyectos. En general, es usual que se opte por revisar la información disponible en la literatura y utilizar parámetros de resistencia conservadores (Leps, 1970), lo cual descarta una posible optimización del diseño geotécnico de obras. Por este motivo, es esencial disponer de equipos para realizar ensayos a gran escala o en su defecto utilizar metodologías que permiten evaluar el comportamiento geomecánico de suelos gruesos por medio de muestra escaladas.

Consientes de esta situación el Instituto de Investigación y Ensayo de Materiales, IDIEM, perteneciente a la Universidad de Chile, desarrollo en el año 2002 un equipo triaxial a gran escala, capaz de ensayar materiales de tamaño máximo 7". Aún así, para materiales con tamaño máximo mayores es necesario el uso de métodos alternativos para escalar y evaluar las propiedades de resistencia de muestras de menor tamaño. Variadas investigaciones se han realizado en torno a este tema, las cuales se enfocan en la generación de muestras equivalentes que puedan ser ensayadas en equipos triaxiales convencionales. Entre estas metodologías se destacan: Método de Corte (Zeller & Wullimann, 1957; Al-Hussaini, 1983), Método de Corte y Reemplazo (Donaghe & Torrey, 1979), Método de la matriz (Fragaszy et al., 1992) y Método de curvas paralelas u homotéticas (Marachi, 1972; Varadarajan et al, 2003).

2 RESISTENCIA AL CORTE EN MEDIOS GRANULARES

Usualmente la resistencia al corte en estos materiales es asociada básicamente al ángulo de fricción interna, asumiendo una cohesión nula. Pero en ensayos triaxiales realizados en enroscados a presiones de confinamiento elevadas (Marsal, 1973), se ha observado una curvatura de la envolvente de falla. Esta curvatura se asocia a factores como la rotura de partículas, dilatación y reacomodo de partículas (Lee & Seed, 1967). A estos factores se suman los efectos de la forma, dureza y rugosidad de las partículas, asimismo, las condiciones de ensayo como densidad, tamaño de partículas, granulometría, fábrica y nivel de tensiones. Todos estos factores han sido ampliamente estudiados por diferentes autores, pero el que ha generado mayor discordancia es el efecto del tamaño de partículas. En algunos estudios la resistencia aumenta con el tamaño de partículas, en otros disminuye o bien no tiene un efecto significativo. Por este motivo, la investigación realizada, como parte de un trabajo de Tesis de Magíster, se centra en entender las razones de estas diferencias.

3 DESCRIPCIÓN DE METODOLOGÍAS

3.1 Método de granulometrías homotéticas

Este método ha sido empleado por diversos investigadores (Marachi, 1972; Varadarajan et al., 2003; Verdugo et al, 2006), y consiste en generar muestras "equivalente" de menor tamaño con curvas granulométricas paralelas a la original. Este proce-

dimiento tiene sentido si las muestras escaladas no presentan contenido de finos superior al 10% y las características de las partículas se mantienen. Las investigaciones difieren en el parámetro de comparación, algunas utilizan un índice de vacíos constante y otras densidad relativa, DR, constante. Un índice de vacíos constante implica un DR diferente entre ensayo, lo que provocaría un cambio en el comportamiento del suelo pasando de dilatante a contractivo.

En estas investigaciones, en general, cuando el coeficiente de uniformidad (Cu) es menor a 20 y el coeficiente de concavidad (Cc) es cercano a la unidad se produce una disminución del ángulo de fricción con el aumento del tamaño de partículas. También, se debe considerar que la rotura aumenta para un material con $Cu < 1$ y en el caso de enrocados las partículas de menor tamaño presenta menos fisuras que las de mayor dimensión. Para muestra con $Cu > 20$ en ocasiones este procedimiento genera muestras equivalentes con contenido de finos mayores a 10%, esto produce un aumento del ángulo de fricción interna con el aumento del tamaño de partículas.

3.2 Método de Corte

En este caso las partículas que no pueden ser ensayadas en equipos convencionales son removidas de la muestra. En general, se produce un aumento de la resistencia al corte con el aumento del tamaño de partículas, si se considera una densidad relativa constante como punto de comparación entre ensayos. Así lo demuestran los resultados de Al-Hussaini (1983) y Donaghe & Torrey (1979) entre otros.

Por otra parte, Zeller & Wullmann (1957) proponer realizar ensayos a diferentes porosidades para una serie de muestras cortadas, con lo cual se puede extrapolar la variación de la resistencia al corte con la porosidad para la muestra original. Esta metodología implica una gran cantidad de ensayos que pueden presentar una alta dispersión de resultados, provocando un gran sesgo de error en la extrapolación de la resistencia.

4 APLICACIÓN METODO DE CURVAS HOMOTÉTICAS

4.1 Materiales Ensayados

Fueron ensayadas tres muestras de suelos gravosos, identificadas como P-1, M-2 y M-3. Estos materiales provienen de cuencas fluviales, por ende presentan partículas redondeadas a subredondeadas, de baja rugosidad y diferentes mineralogías. A partir de estos materiales se generaron muestras equivalentes de granulometrías paralelas a las originales y de menor tamaño. El contenido de finos fue limitado a 10%, lo que significó que no se lograra un coeficiente de uniformidad constante para las muestras escaladas del material P-1. La Figura 1 presenta las granulometrías y variación de densidad máxima y mínima de estas muestras. Es importante hacer notar que las muestras donde las granulometrías son totalmente paralelas, (M-2, $Cu=14$, $Cc=0.8$; M-3, $Cu=21$, $Cc=3.2$), las densidades máximas y mínimas son relativamente independientes del tamaño medio, D_{50} . Mientras que para las granulometrías que no son totalmente paralelas (P-1), las densidades máximas y mínimas presentan un aumento con el incremento del tamaño medio.

4.2 Procedimiento de Ensayo

Las series de ensayos triaxiales CID fueron realizadas a presiones de confinamiento en un rango de 0.5 a 4.0 kg/cm^2 . Se utilizaron probetas de 5, 10 y 15 cm de diámetro, dependiendo del tamaño máximo de partículas. Las muestras P-1 fueron compactadas a un $DR=80\%$ y las muestras M-2 y M3 a un $DR=70\%$.

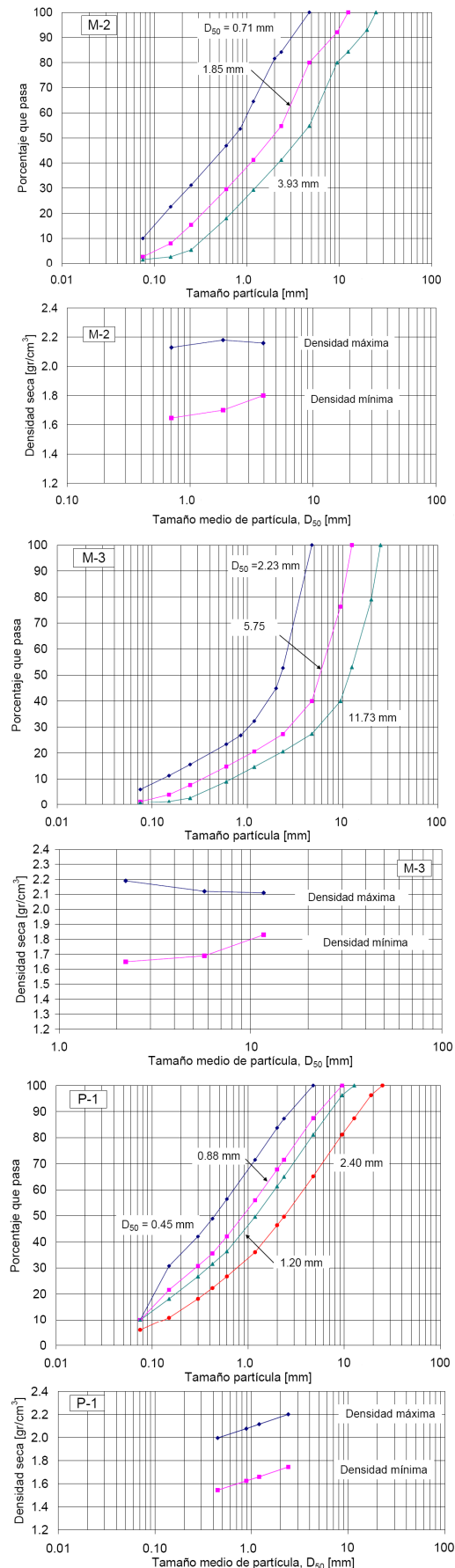


Figura 1: Granulometrías y variación de las densidades límites para los materiales M-2, M-3 y P-1.

4.3 Resultados de ensayos

Los resultados obtenidos para el ángulo de fricción máximo (Figura 2) muestran que este puede ser estimado correctamente por esta metodología, siempre que se cumpla con la condición de C_u constante y las densidades límites no sean afectadas significativamente por el tamaño de partículas. Es así que la muestra P-1 presenta una diferencia significativa del ángulo de fricción al no cumplir con estas condiciones. Además, la muestra M-2 que posee granulometrías con $C_u < 20$ y $C_c \sim 1$ presenta una disminución del ángulo de fricción máximo con el aumento del tamaño de partículas, lo que coincide con lo observado en otras investigaciones.

Por otra parte, las curvas tensión-deformación y deformación volumétrica de los materiales M-2 y P-1 se presentan en las Figura 3. Se aprecia que para las muestras M-2 de granulometrías paralelas tanto la resistencia máxima como la rigidez y la deformación volumétrica son similares. En el caso de la muestra P-1 se observa una gran diferencia de comportamiento producto que las muestras escaladas no poseen granulometrías perfectamente paralelas a la original.

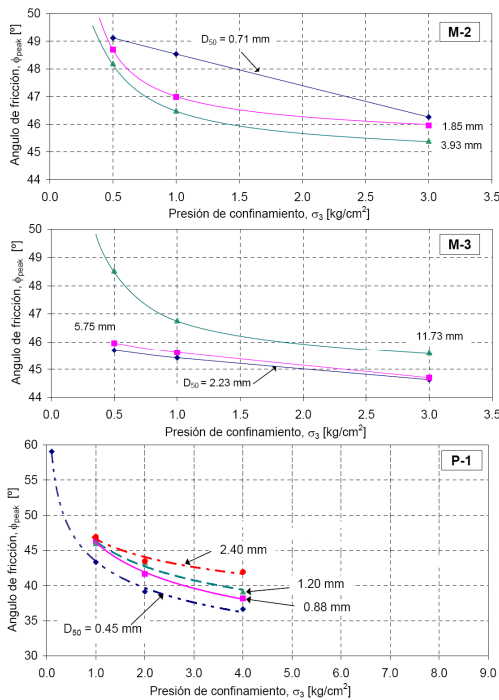


Figura 2: Variación del ángulo de fricción máximo con la presión de confinamiento.

5 APLICACIÓN DE MÉTOD DE CORTE

5.1 Materiales de Ensayo

El material utilizado proviene del Río Maipo. Las partículas presentan formas redondeadas a sub-redondeadas, baja rugosidad y diferente mineralogía. El material original fue separado en dos fracciones, sobre y bajo malla de $3/8''$ (9.2 mm), posteriormente fue mezclado en muestras que contienen un 20%, 40%, 60% y 80% de partículas de sobre-tamaño. Entendiéndose como partículas de sobre-tamaño las que no pueden ser ensayadas en el equipo triaxial del que se dispone. Las granulometrías y densidades límites son presentadas en la Figura 4, en la cual se observa que este método no mantiene constante los coeficientes de uniformidad y concavidad del suelo original. Se aprecia también que existe una gran diferencia de las densidades máximas y mínimas de la muestra equivalente de corte con respecto a las posibles muestras originales.

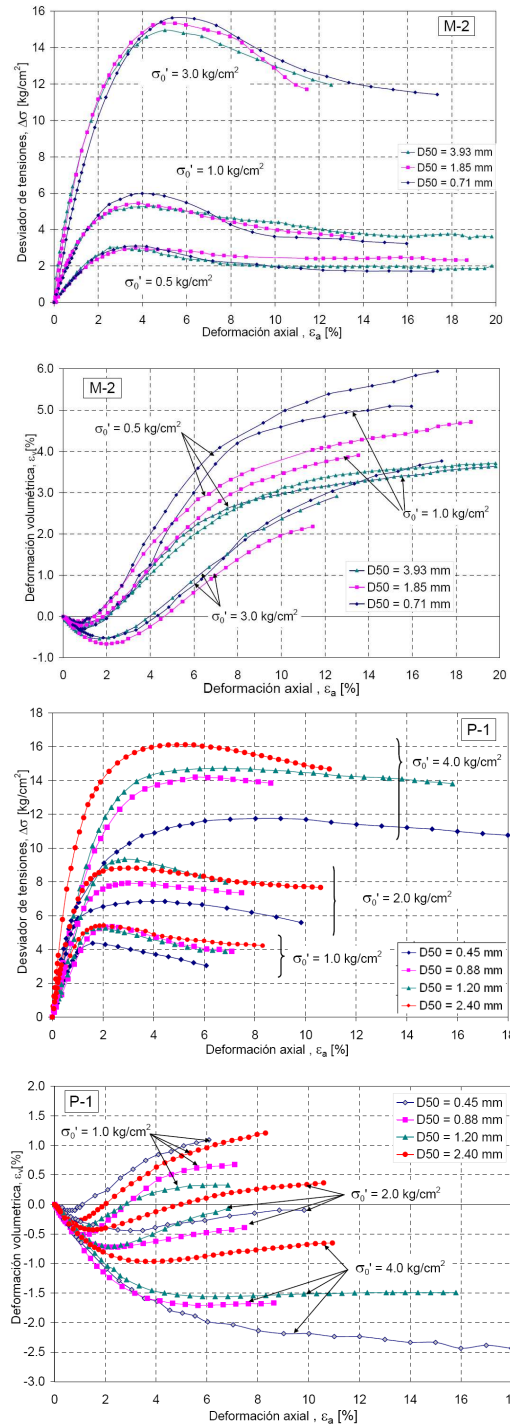


Figura 3: Comportamiento tensión deformación y cambio volumétrico.

5.2 Procedimiento de Ensayo

Los ensayos triaxiales CID fueron efectuados a presiones de confinamiento de 0.5-1.0-3.0 kg/cm^2 . Se utilizaron probetas de 10 y 15 cm de diámetro, dependiendo del tamaño máximo de partículas. Las muestras fueron compactadas inicialmente a una densidad relativa del 70%.

5.3 Resultados de ensayos

En la Figura 5 se observa que la muestra equivalente presenta un ángulo de fricción menor al resto de las muestras, por lo cual subestima la resistencia de las muestras originales. La muestra equivalente puede ser generada por distintas muestras originales, por ende puede representar tanto un 20% como un 80% del

material original. Por este motivo para el suelo estudiado la muestra de corte representaría adecuadamente a un suelo con menos de un 20% de partículas de sobre-tamaño.

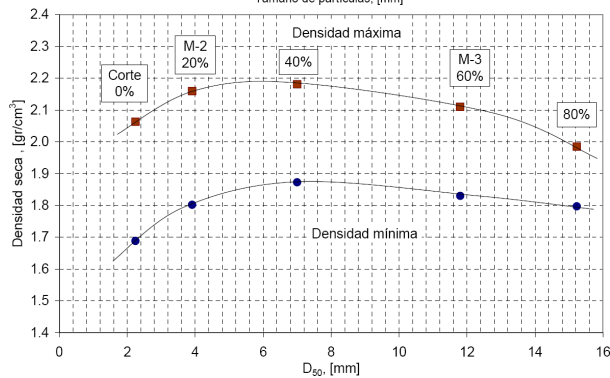
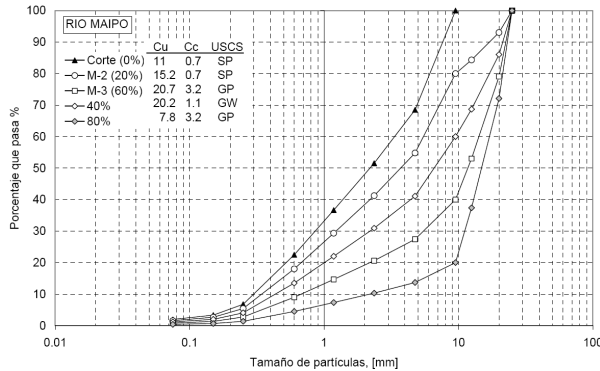


Figura 4: Distribución granulométrica y densidades límites de las muestras del Río Maipo.

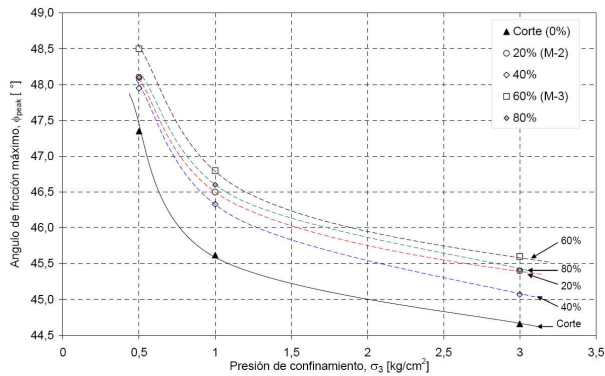


Figura 5: Variación del ángulo de fricción máximo en función de la presión de confinamiento para las muestras del Río Maipo

El comportamiento tensión-deformación observado en los ensayos (Figura 6) evidencia que esta metodología no logra reproducir adecuadamente la rigidez de la muestra original. La muestra equivalente presenta una rigidez inicial mayor al de las muestras originales.

En general, las investigaciones recomiendan utilizar este método si las partículas de sobre-tamaño representan entre un 20% a 40% del suelo. Pero esta cantidad dependerá de las características de cada suelo. Por esta razón, se recomienda extraer menos de un 20% de partículas de sobre tamaño, para obtener parámetros de resistencia al cote conservadores y no subestimarlos exageradamente.

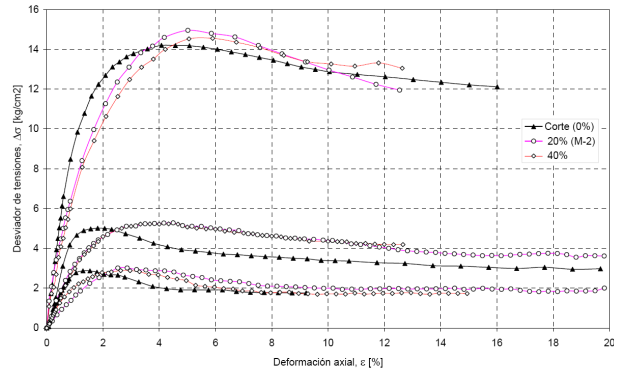


Figura 6: Comportamiento tensión-deformación de las muestras del Río Maipo

CONCLUSIONES

Los resultados de esta investigación señalan que la metodología de curvas homotéticas o paralela, entrega una buena estimación del comportamiento geomecánico de suelos granulares gruesos. Siempre que la granulometría de la muestra equivalente sea perfectamente paralela a la original, contenga menos de un 10% de finos y la forma de las partículas no varíe con el tamaño de estas. En cuanto al método de corte, este puede subestimar la resistencia al corte de la muestra original y no logra reproducir adecuadamente la rigidez de la muestra original.

AGRADECIMIENTOS

Laboratorios IDIEM y MECESUP, de la Universidad de Chile.

REFERENCIAS

Al-Hussaini, Mosaid. 1983, Effect of particle size and strain conditions on the strength of crushed basalt. *Canadian Geotechnical Journal*, 20(4): 706-717,...

Donaghe, R. T. & Torrey, V. H.. 1979, Scalping and replacement effects on strength parameters of earth-rock mixtures. *Proc. Conf. on Design Parameters in Geotechnical Engineering*, vol.2, pp.29-34.

Fragaszy, R.J., Su, J., Siddiqi, F. H. and Ho, C. 1992, Modeling strength sandy gravel. *Journal of Geotechnical Engineering*, 118(6):920-935

Lee, K. L. y Seed, H. B. 1967, Drained strength characteristics of sands. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 93(6):117-141.

Leps, Thomas 1970, Review of shearing strength of rockfill. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(4):1159-1170.

Marachi, D., Chan, C. K. y Seed, H. B. 1972, Evaluation of properties of rockfill materials. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 98(1):95-114.

Marsal, R. 1973, *Mechanical Properties of Rockfill Embankment Dam Engineering*, Casagrande Volume, John Wiley and Sons, New York.

Varadajan, A., Sharma, K., Venkatachalam, K. y Gupta, K. 2003 Testing and Modeling two rockfill materials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 129(3):206-218.

Verdugo, R. De la Hoz, K. 2006, Caracterización geomecánica de suelos granulares gruesos. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*. Vol. 6(2):199-213

Zeller, J. & Wullimann, D 1957, The shear strength of the shell materials for the Göschenenealp Dam, Switzerland. 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Londres, Vol. 2, pp. 399-415..