

FACULTAD DE INGENIERÍA

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Maestría en Ingeniería Geotécnica - MIG
(Carrera Binacional Argentina - Alemania)

Asignatura ACMIG03:

Comportamiento Mecánico de Suelos

SUELOS GRANULARES GRUESOS

NOMBRE AUTOR: **JULIO ANTONIO LARA**

Email autor: julioalara@gmail.com

RESUMEN:

Los suelos granulares gruesos (SGG), son materiales que presentan cierta dificultad al momento de ser caracterizados; esto se debe a las partículas de sobretamaño que poseen, pero son ampliamente utilizados en la construcción de grandes Obras, considerando que poseen condiciones geomecánicas muy buenas. Los sobretamaños en general revisten una dificultad en al momento de realizar los muestreos y los ensayos de laboratorio (granulometrías, resistencia al corte y densidades de campo); en este sentido se pretende, describir los métodos alternativos para la caracterización de los SGG; en particular se explicará la metodología para escalar el material con sobretamaño en muestras de pequeñas dimensiones, y mostrar la alternativa de equipos para realizar ensayos a gran escala tanto en Laboratorio como en terreno.

Palabras clave: Suelos Granulares Gruesos, Caracterización Geomecánica, Granulometría Paralela, Equipos de gran escala.

1. INTRODUCCIÓN

Los Suelos Granulares Gruesos (SGG), en general, se clasifican por su constitución y por su origen; son utilizados en la construcción de grandes obras debido a las excelentes condiciones mecánicas que poseen; por lo tanto, es importante establecer sus **propiedades geomecánicas** de forma de resolver adecuadamente problemas en fundaciones, construcción de túneles y presas, grandes plataformas y obras con grandes empujes laterales, entre otras.

2. QUE SON LOS SUELOS GRANULARES GRUESOS

Según el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos[1]) Los suelos de granos grueso y fino se distinguen mediante el tamizado del material por el tamiz # N° 200 (0,074mm). Se considera que un suelo es grueso si más del 50% de las partículas del mismo son retenidas en el tamiz N° 200 y fino si más del 50% de sus partículas son menores que dicho tamiz.
Los suelos gruesos, se dividen en gravas y arenas, y se separan con el tamiz N° 4 (4,76 mm), de manera que un suelo pertenece al grupo de GRAVA si más del 50% retiene el tamiz N° 4 y pertenecerá al grupo ARENA en caso contrario.
El SUCS, puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se puede clasificar suelos con tamaños menores de tres (3) pulgadas; por lo tanto, no clasifica tamaños mayores a ese diámetro, pero que si están presentes en la naturaleza y son utilizados ampliamente en la construcción.
La presencia de Suelos Granulares Gruesos (SGG) en Argentina tiene estrecha relación con la geografía misma del país. “En el continente americano se desarrolla la cordillera de los Andes que corresponde a uno de los cordones montañosos más importantes del mundo por su altura y extensión” (Verdugo & De la Hoz, 2006, p.199).
“Desde el punto vista de la ingeniería geotécnica es posible señalar que los suelos gruesos, o de grandes partículas, presentan un buen comportamiento y comparativamente desarrollan, en general, mayor rigidez y resistencia que suelos de granos más pequeños como suelos arenosos. Sin embargo, la evaluación de sus propiedades mecánicas es dificultosa y de alto costo, por el tamaño que requieren las muestras a ser ensayadas” (Verdugo & De la Hoz, 2006, p.199).

3. CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE SUELOS GRANUALES GRUESOS

La caracterización de los suelos granulares gruesos (SGG), presenta dificultades inherentes, fundamentalmente, a la dificultad de toma de muestra, realización de ensayos in situ, la falta de equipos para ensayar probetas de grandes dimensiones, sumado a que la toma de muestras “inalteradas” es de gran complejidad técnica y por lo tanto muy rara vez se utilizan.
Ante estos inconvenientes, en la práctica actual o habitual, se tiende a utilizar la parte menos gruesa del material y ensayarla como equivalente de la muestra original.
Para estimar la resistencia de suelos gruesos mediante ensayos de laboratorio, se han propuesto diferentes MÉTODOS ALTERNATIVOS, que implican el ensayo de muestras de suelo “equivalentes”, libres de partículas sobredimensionadas:

a. ***Método de la Granulometría Homotética[2] o Paralela (MGP)***: Tiene como objetivo escalar la granulometría del material granular grueso original por medio de un factor de reducción geométrico constante en cada fracción de tamaño.
   Factor de reducción geométrico=radio de similitud (S).
   Este método es aplicable en los casos en que el contenido de finos de las curvas homotéticas no supere 10-12% del total, y siempre y cuando las variables de mineralogía, de dureza y de forma de partículas sean similares.
   La principal ventaja de este procedimiento es que se mantiene la graduación del suelo.

[1] SUCS: fue desarrollado por Arthur Casagrande, durante la Segunda Guerra Mundial, usado para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación, puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se puede clasificar suelos con tamaños menores de tres (3) pulgadas

[2] Homotética: La Homotecia es una transformación geométrica, una correspondencia entre dos figuras.

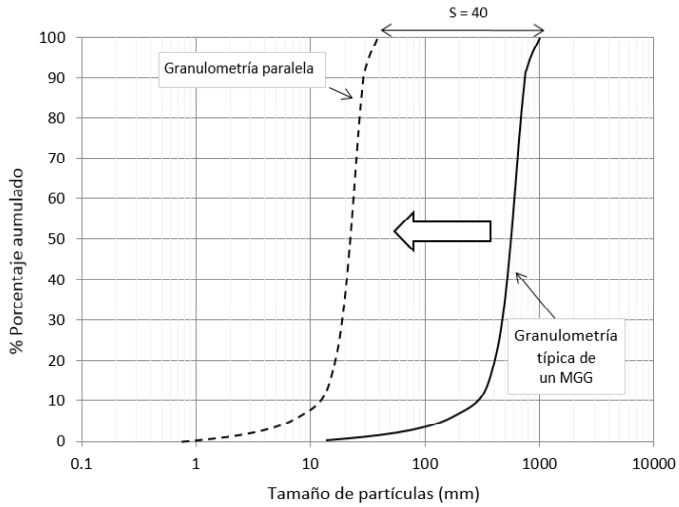


Figura 1. Método de granulometría paralela en materiales granulares gruesos. Para este ejemplo, el radio de similitud (S) es de 40. [4]

$S=D_{máx.}$ original gradation/$D_{máx.}$ Scaled gradatión. (D=diámetro)

b. Método de corte y reemplazo: en este método, las partículas que no pueden ser ensayadas en equipo tradicional o convencional son removidas y reemplazadas por un porcentaje igual en peso de las partículas más pequeñas.

"Los datos reportados indican que este procedimiento presenta un mejor resultado para granulometrías con un porcentaje de grava mayor a 40%. Aun cuando existen algunos datos indicando que este método funciona, no existe ningún fundamento que justifique su utilización". (Verdugo & De la Hoz, 2006, p.207).

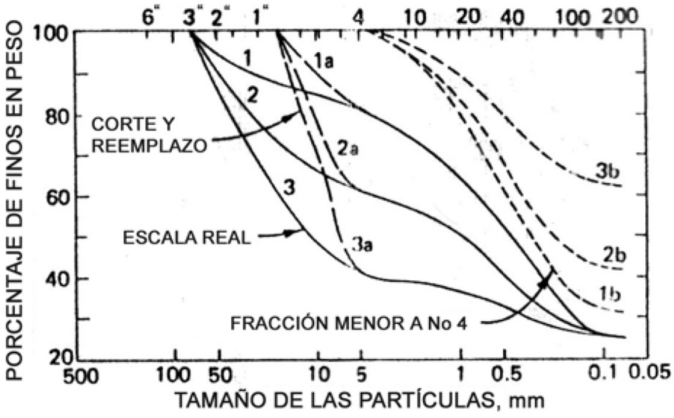


Figura 2. Granulometrías generadas por método de corte en malla Nº4 y reemplazo (Donaghe y Torrey, 1979) [1]

c. Método o Modelo de la matriz: Asume que la resistencia al corte de un material es controlada por la matriz del suelo y que el sobretamaño no afecta la respuesta global. El método solo es aplicable en probetas premoldeadas en las que las partículas de sobretamaño no tienen contacto entre sí.

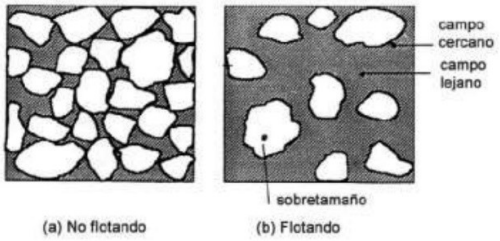


Figura 3. Esquema de sobretamaño en modelo de la matriz, Fragaszy et al. (1992). Fuente: De la Hoz (2007). [3]

Limitaciones según (Verdugo & De la Hoz, 2006, p.199) Ref. [5] para los métodos alternativos mencionados:

Método	Desarrollado por:	Limitaciones
Método de la Granulometría Homotético o Paralela (MGP)	Lowe, 1964	Si el material grueso original tiene un **contenido considerable de finos**, la gradación paralela más fina da como resultado una muestra con un contenido de finos importante, por ejemplo, **superior al 10%.** La respuesta geomecánica de esta nueva muestra está fuertemente controlada por los finos y, por lo tanto, no puede reproducir el comportamiento del material grueso original.
Método de corte y reemplazo	Donaghe y Torrey, 1979	Este procedimiento **cambia** drásticamente la **graduación del suelo original** y, aunque algunos datos experimentales han mostrado resultados prometedores, no hay evidencia real que respalde la equivalencia entre el suelo original y la muestra de suelo creado artificialmente, removido y reemplazado.
Método o Modelo de la matriz	Siddiqi y colaboradores (1987) a	Su uso está limitado por la validez de la suposición de que las partículas de gran tamaño están "flotando" y la precisión del procedimiento para estimar la densidad real de la matriz del suelo en el campo.

Tabla N°1. Limitaciones Métodos según (Verdugo & De la Hoz, 2006, p.199) Ref. [5]

Considerando las ventajas y limitaciones de estos métodos alternativos, el Método de Granulometrías Paralelas (MGP), resulta ser el más utilizado por su capacidad de estimar las características geomecánicas del suelo grueso.

3.1 METODOS DE GRANULOMETRÍAS PARALELAS (MGP)

Estudios recientes con materiales granulares entre los años 2007 a 2018 analizados según Ref. [4], permitió concluir que el Método de Granulometría Paralela (MGP) o curvas homotéticas, podría ser considerado como un estándar en la caracterización geotécnica en materiales de grano grueso. La evaluación de propiedades mecánicas de MGG[3] utilizando el MGP **se ha demostrado empíricamente solo para un radio de similitud "S" de hasta 25** en gravas fluviales redondeadas a subredondeadas y subangulares, materiales de balasto de roca partida y enrocados de rocas sedimentarias **hasta S= 13.**

A modo de ejemplo, se muestra el análisis descripto según Ref. [4] de tres (3) granulometrías paralelas muy uniformes con radio de similitud de 2,5 entre la granulometría de mayor y menor tamaño medio. En base a ensayos triaxiales CID[4] el resultado fue que las 2 granulometrías de menor tamaño consiguieron similares valores de ángulo de fricción interna máximo, pero la granulometría de mayor tamaño tuvo una diferencia

[3] MGG: Materiales Granulares Gruesos.

[4] CID: ensayos de compresión triaxial consolidado isotrópicamente y en condición drenada (CID).

de 7 grados, por lo cual el método no pudo ser corroborado perfectamente para las granulometrías analizadas. Por otra parte, también analizaron la efectividad del MGP ensayando un enrocado de caliza, donde las granulometrías se muestran en la figura siguiente, y poseen un radio de similitud=14. Según ensayos triaxiales CID, la diferencia de ϕ' (ángulo de fricción interna) para las tres granulometrías analizadas, fue entre 3 y 4 grados para cada presión de consolidación.

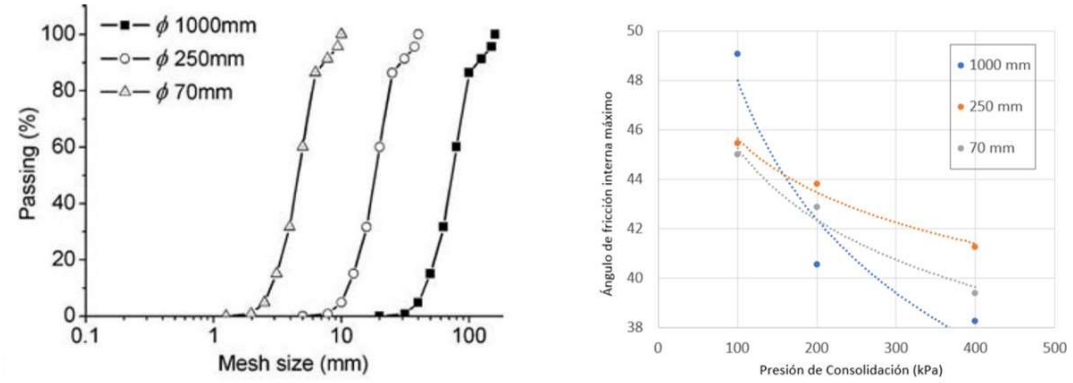


Figura 4 a y b. Granulometrías paralelas analizadas, resultados ángulo de fricción Interna, Leonardo Dorador Ref. [4]

Del estudio de Ramón Verdugo y Karem de la Hoz Ref. [2], para el ejemplo de un suelo gravoso extraído del lecho del Río Maipo en Chile.

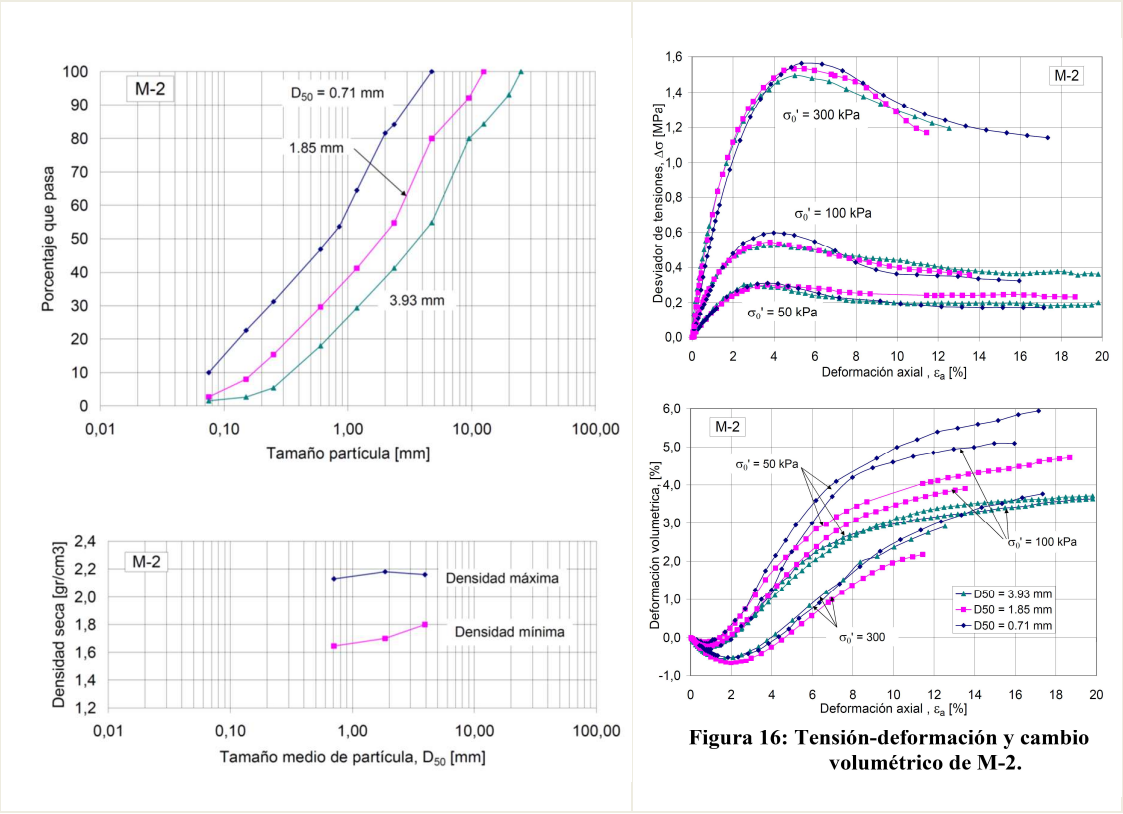


Figura 16: Tensión-deformación y cambio volumétrico de M-2.

Figura 5 a y b. Granulometrías paralelas analizadas para un suelo gravoso Ref. [2]

De la **Figura 5 a** y **b**, se puede observar que las curvas tensión-deformación son prácticamente iguales para cada presión de confinamiento. Demostrando que las 3 granulometrías son similares, porque poseen comportamientos parecidos.

3.1.1 Antecedentes de Uso den Argentina.

A continuación, se presente una breve reseña, del resultado de una caracterización de Suelos Granulares Gruesos realizados por la Universidad Nacional de San Juan para el Proyecto Minero El Planchón. [9]
"En el proyecto minero El Pachón, ubicado en la cordillera de los Andes San Juan, perteneciente a la compañía minera Glencore, se ejecutaron ensayos in situ y en laboratorio que permitieron caracterizar los suelos gravosos del sector de implantación de la planta concentradora de la futura mina. En este trabajo se presentarán los resultados de ensayos triaxiales en probetas de diámetro mayor al tradicional ejecutados en la Universidad Nacional de San Juan que permitieron caracterizar y escalar las propiedades resistentes de los suelos presentes en el sitio. La planta concentradora se ha ubicado sobre un gran depósito glaciar de material granular grueso compuesto por gravas y arenas con finos arcillosos de baja plasticidad, con bloques y bolones que alcanzan hasta 16"(41cm). Dada la gran presencia de partículas de gran tamaño es que se ha observado que los ensayos estándares para obtener parámetros de resistencia y deformación no son escalables a las condiciones reales de terreno.
Ante esto, MWH como ingeniero consultor, ha propuesto a Glencore **una metodología de escalamiento consistente en la extrapolación de los parámetros resistentes al rango representativo de terreno, a partir de aquellos que se obtienen desde materiales con tamaños máximos menores**. Para estos efectos, se determinó una curva granulométrica característica de terreno a partir de la cual es posible definir curvas paralelas, con tamaños máximos menores y que son fácilmente ensayables en los equipos de ensayos de resistencia y deformación disponibles en Argentina. Estas curvas granulométricas así definidas se denominan homotéticas. En esta metodología (Verdugo R., De la Hoz K.), se realiza el montaje de las series de ensayos de resistencia para cada curva, tomando como referencia una densidad relativa representativa para cada una de ellas.

Tamiz	Tamaño Partículas [mm]	Curva Terreno Promedio	Homotética 1 ½"	Homotética ¾"	Homotética Nº 4
6"	152.4	100			
4"	101.6	93			
3"	76.2	87			
2"	50.8	80			
1 ½"	38.1	72	100		
1"	25.4	62	93		
¾"	19.05	58	87	100	
3/8"	9.525	48	72	87	
Nº 4	4.76	39	58	72	100
Nº 10	2	33	46	56	83
Nº 40	0.42	23	32	37	54
Nº 60	0.25	20	29	33	46
Nº 100	0.149	16	27	25	39
Nº 200	0.074	11	11	11	11

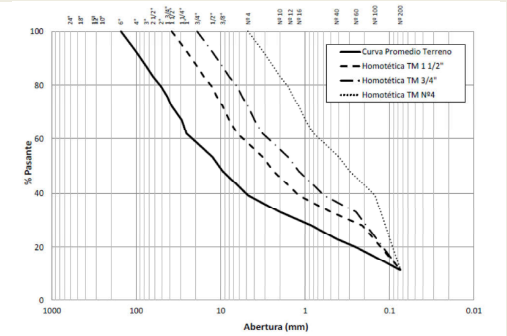


Figura 6 a y b. Curvas Homotéticas obtenidas Ref. [9] pp. 1427

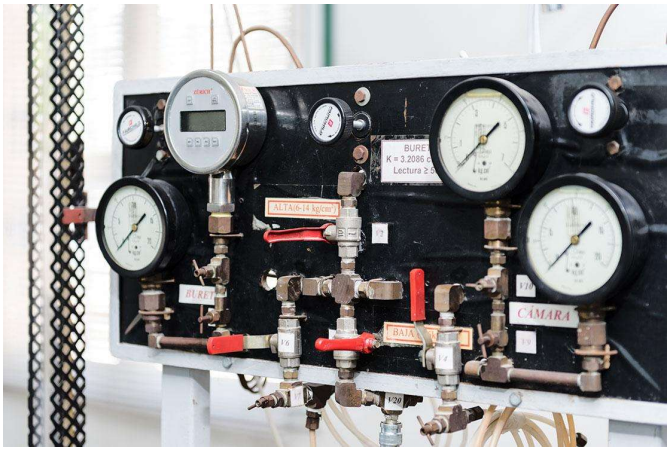
Para cada una de las curvas se realizaron ensayos para determinar densidad máxima y mínima, de ref. para confección de las probetas; también ensayos triaxiales CID y CIU para determinar las propiedades resistentes de los suelos con presiones de confinamiento efectivo de 1, 4 y 8 kg/cm^2. A partir de estos ensayos se puedo estimar el ángulo de fricción interna para cada homotética. Del análisis de cada resultado los autores del estudio indican que "considerando el material con un diámetro máximo de 150mm es posible extrapolar un ángulo de fricción interna del orden de 43°"; "Concluyendo que este valor se corresponde bien con los valores informados en la bibliografía para materiales gravo-arenosos". [9] pp.1429.

Los resultados de estos ensayos han sido satisfactorios y representativos de los suelos que se estudiaron y se encontró una buena correlación que permitió extrapolar parámetros de resistencia a tamaños mayores como los presentes en el lugar de implantación del proyecto.

3.1.2 Equipo triaxial cíclico (para gravas)

El equipo fue desarrollado y construido en el IDIA (INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ANTISÍSMICAS), está compuesto por una cámara de acero que permite alojar una probeta de 17,5 cm de diámetro por 35 cm de altura, actuador hidráulico servocontrolado y marco de carga. Tamaño máximo de partícula 25,4 mm (1”). Máxima presión de cámara 2 MPa.







Figuras 7 a, b y c. Equipo Triaxial Cíclico-IDIA - UNSJ - *Fuente: https://idia.unsj.edu.ar/desarrollo/equipo-triaxial-ciclico/*

4.EQUIPOS PARA ENSAYO DE GRANDES DIMENSIONES

EL Instituto de Investigaciones y Ensayos de Materiales (IDIEM), hace referencia que a que estudiar suelos con gran tamaño de partículas con equipos convencionales conlleva una sobre estimación de su resistencia. Por lo cual estos equipos son necesarios y representativos, pero muy costosos.

4.1. ENSAYO DE MATERIAL GRUESO EN PROBETAS DE GRAN TAMAÑO

El IDIEM de la Universidad de Chile, construyó un equipo triaxial de gran escala que permite el ensayo de **probetas de hasta 1 m de diámetro y 2 m de altura**

Como antecedente de aplicación, según cita (Verdugo & De la Hoz, 2006, p.203), El Proyecto del Túnel del Metro de Santiago de Chile, en un sector de material aluvional con partículas de tamaño máximo 18 cm y un contenido de finos de 34% de arcilla de baja plasticidad, se optó por ensayar probetas en su condición de depositación natural, lo que obligó a recurrir a la extracción de probetas "inalteradas". Con ese propósito se desarrolló una metodología de extracción.

Este equipo, le permite a IDIEM realizar ensayos triaxiales a gran escala en condición drenada (CID) y no drenada (CIU) hasta presiones de confinamiento de 30 kg/cm^2. También ensayos edométricos y de permeabilidad.

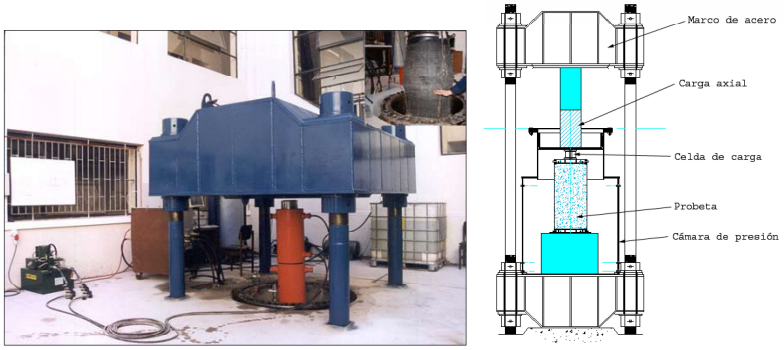


Figura 8. Triaxial a Gran escala IDIEM.
Fuente: https://www.idiem.cl/

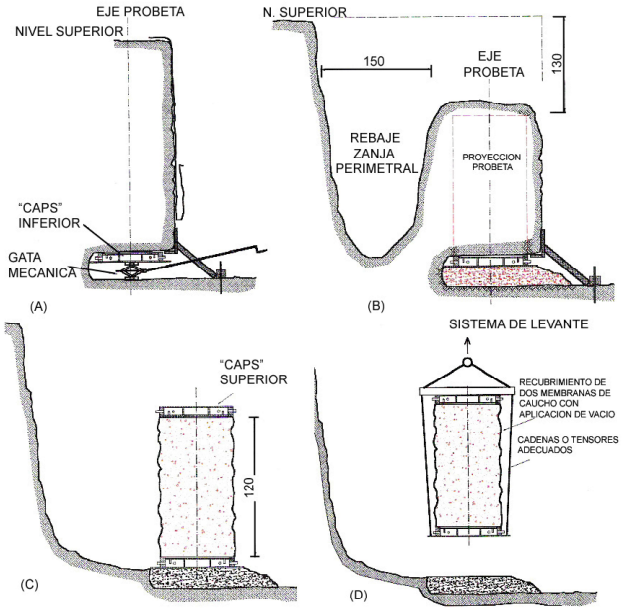


Figura 9. Secuencia de Extracción de Probetas "inalteradas" Ref. [1]

En el siguiente link, del IDIEM, se puede ver el proceso de extracción de una probeta inalterada para ensayo triaxial: https://www.youtube.com/watch?v=95m08FqxHeM

4.1.1 Tamaño de muestras para ensayo triaxial.





Figuras 10 a y b. Muestras de gran tamaño para ensayo triaxial.-Fuente: https://www.idiem.cl/

4.2. PRUEBA DE CORTE DIRECTO PARA SUELO GRANULAR GRUESO

La Universidad Tecnológica de Bialystok en Polonia, utilizó un gran aparato de corte directo para probar un suelo granular grueso, tipo base estabilizada Tmáx 31,5mm. [8]

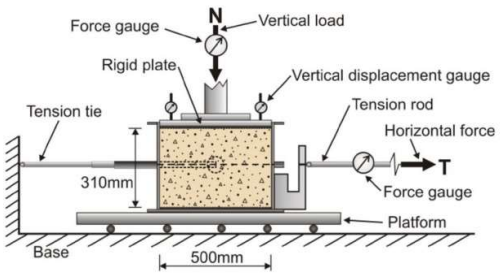




Figura 11 a y b. Equipo de Corte Directo a gran escala ϕ= 500mm Ref. [8].

Como referencia local de este tipo de equipos, la Universidad Nacional de San Juan, posee una caja de corte de 50x50cm (dimensiones en planta), de 25cm de altura, con capacidades de carga vertical y horizontal de 50tn. Actualmente se están ensayando especímenes de rocas blandas de 45x45x23cm (Ref. Germán Rodari germanrodari@unsj.edu.ar).



Figura 12. Equipo de Corte UNSJ - IDIA

5. CONTROL DE COMPACTACIÓN

El Proctor[5] es el método más utilizado para determinar densidad máxima de los suelos. La Norma de Vialidad Nacional, VN-E5-93 - Compactación de Suelos, menciona que cuando se emplean materiales granulares, o sea aquellos que poseen más del 5 % retenido sobre el tamiz IRAM 4,75 mm. (Nº 4), se pasa la muestra representativa por el tamiz IRAM 19 mm. (3/4").
A lo largo del tiempo, se han establecido diferentes métodos y correcciones del ensayo de Laboratorio, con el objeto de controlar los materiales granulares gruesos y la dificultad que presenta dichos ensayos.
Algunos métodos, utilizan moldes de laboratorio de gran diámetro, en los que se utiliza toda la muestra, incluido el material retenido en Tamiz ¾" (19mm), incluso algunos tamaños más grandes [6].

5.1. COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO

Tipo de Proctor	Modificado s/ AASHTO T-180	Modificado s/ AASHTO T-224	Modificado 1 a grana escala	Modificado 2 a grana escala	Modificado 3 a grana escala
T Máx(mm)	19 *	Establece una corrección cuando hay sobre tamaño en T180	102	152	102
Molde diámetro [mm]	152		508	508	508
Número de capas	5		5	3	3
Numero de golpes x capa	56		68	77	77
Masa pison [kg]	5		70	70	70
Altura de caida [cm]	46		46	46	46
Energia [kg.cm/cm^3]	27		27	18	18
Volúmen [cm^3]	2.320		40.533	40.533	40.533

*Aplica a mezclas de suelo que tienen un 30% o menos del material retenido en la malla de 19,0mm

Tabla N°2. Proctor Modificado de uso estándar y a gran escala.

[5] A principios de la década de 1930, la Universidad de California, el estudiante de Berkeley Ralph R. Proctor desarrolló un método para determinar la densidad máxima de los suelos.

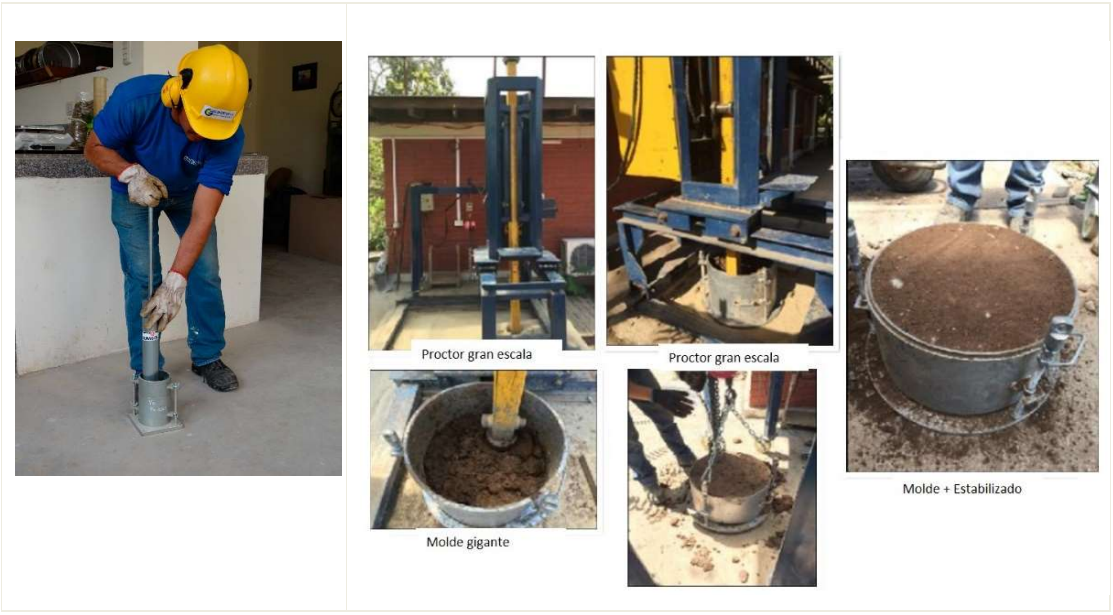
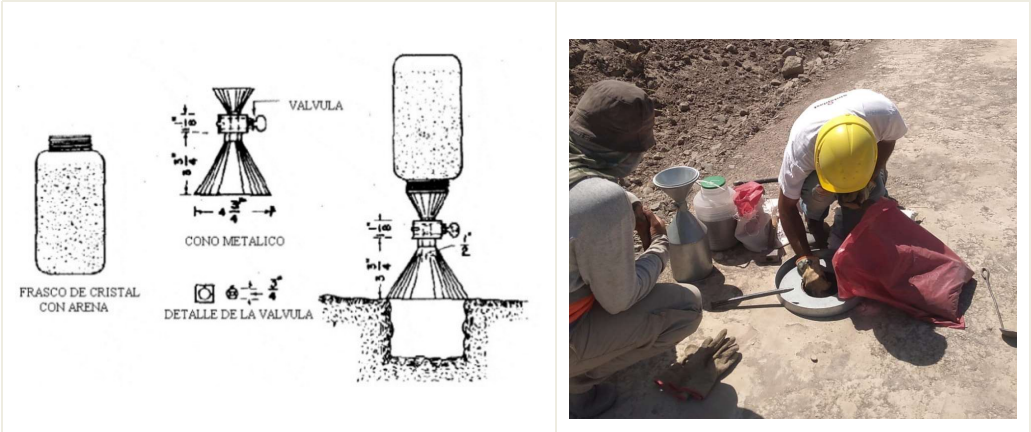


Figura 13 a y b. Equipo de Proctor de uso corriente y uno de gran escala.

5.2. CONTROL DE COMPACTACIÓN DE SUELOS EN TERRENO

- ***Método de la Arena (VN-E8-66 /ASTM D-1556):*** Es uno de los métodos más utilizados para medir densidades en capas granulares, pero requiere correcciones en materiales granulares gruesos por retenido en Tamiz # ¾", dependiendo que el retenido sea mayor o menor del 15%, se corrige el Proctor o la densidad.



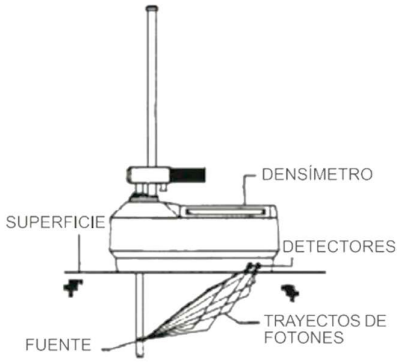
Figuras 14 a y b. Método de la Arena equipos s/ VN-E8-66.





Figuras 15 a y b. Método de la Arena con Cono de mayor dimensión.

- **Método del Densímetro Nuclear (ASTM D 6938 / D2922):** El método *del Densímetro* nuclear presenta el mayor grado de correlación con el Método de la Arena, para los suelos del tipo SW-SM, es decir, arenas bien graduadas limosas. Esto se debe a que son suelos que requieren bajos porcentajes de humedad para su compactación [7]. En la práctica habitual el densímetro no se aplica cuya Tmáx. No sea superior a ¾" a 1". Por lo tanto, suelos con sobretamaños no se debería controlar con este método.





Figuras 16 a y b. Método de la Arena con Cono de mayor dimensión.

En la Practica existen otros métodos que solo se mencionan para identificar su existencia y aplicación: REFRACCION SISMICA s/ Reglamento CIRSOC 401 y Ensayo de Placa de Carga (DIN 18.3134)

6. CONCLUSIONES

Dado el amplio uso que tienen los Materiales Granulares Gruesos (MGG) en la actualidad, resulta imprescindible su estudio y evaluación para una mejor caracterización, a fin de evaluar condiciones de servicio; los equipos de gran escala, que permiten una mejor caracterización, no siempre están al alcance de todos los laboratorios, por lo que se debe ajustar los métodos alternativos actualmente en vigencia y disminuir los errores que puede ocasionar una incorrecta evaluación del material.

Del estudio se ha podido concluir además, que en aquellos lugares donde se han desarrollado grandes obras como diques o proyectos mineros, los laboratorios de suelos se han visto obligados a desarrollar equipamiento que permita bridar un servicio a la altura de los requerimientos que este tipo de obra necesita. Como ejemplo, se puede citar el IDIEM en Chile, país minero por excelencia, y el IDIA en San Juan Argentina provincia cuya minería se ha desarrollado ampliamente en los últimos años además de la construcción de grandes diques.

7. REFERENCIAS

[1] Ramón Verdugo y Karem de la Hoz, Caracterización de Geomecánica de Suelos Granulares Gruesos, 2006.
[2] Ramón Verdugo y Karem de la Hoz, Strength and Stiffness of coarse granular soils, 2006.
[3] Susana Valeria Cornejo Aedo, Propiedades Geomecánicas de Medios Granulares Gruesos con triaxial gigante, 2019.
[4] Leonardo Donador, Una revision de la Metodología de Granulometría Paralela o Escalamiento de Curvas Hoteticas aplicado a la caracterización geotécnica de materiales granulares gruesos, 2018.
[5] Ramón Verdugo y Karem de la Hoz, Strength and stiffness of coarse granular soils, 2006.
[6] D. James and H.G. Larew, Compaction of Coarse-Grained Granular Materials, pp.676.
[7] Gomez Lorenzi y otros, Correlación entre Densímetro Nuclear y Cono de Arena para Suelos Finos de Baja Plasticidad y no Cohesivos, 2006, pp. 31.
[8] Katarzyna Dołżyk-Szypcio, Direct Shear Test for Coarse Granular Soil, 2019.
[9] Gabriel Perez Quiroga & Joaquín Canchero, Caracterización de Suelos Granualres Gruesos, 2015, pp. 1423.