

Artículo de investigación

Cómo citar: J. S. Manrique, J. C. Cordero y O. D. Moreno. "Influencia de las características físicas en el comportamiento mecánico de los suelos granulares". *Inventum*, vol. 17, n.º 32, pp. 57-67, enero-junio 2022. doi: 10.26620/uniminuto.inventum.17.32.2022.57-67

Editorial: Corporación Universitaria Minuto de Dios - UNIMINUTO.

ISSN: 1909-2520
eISSN: 2590-8219

Fecha de recibido: 1 de febrero de 2022
Fecha de aprobado: 1 de marzo de 2022
Fecha de publicación: 15 de marzo de 2022

Conflicto de intereses: los autores han declarado que no existen intereses en competencia.

Influencia de las características físicas en el comportamiento mecánico de los suelos granulares

Influence of physical characteristics on the mechanical behavior of granular soils

Influência das características físicas sobre o comportamento mecânico dos solos granulares

Resumen

El objetivo de esta investigación es determinar cómo influyen las características físicas de los materiales granulares en su comportamiento mecánico. Para tal fin, se escogieron dos arenas nacionales, Guamo y Guayuriba, y otra internacional, Ottawa. Partiendo de los ensayos de caracterización física, se obtuvieron resultados de C_u , G_s , e_{min} , e_{max} , ρ_{min} y ρ_{max} , para determinar su efecto en los parámetros de resistencia, resultantes del ensayo de corte directo en condición consolidada drenada. La campaña experimental consta de 27 ensayos realizados a las 3 arenas para los esfuerzos verticales de 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa con densidades relativas de 30%, 60% y 90%, y una velocidad de corte de 1 mm/min. De esta manera, se encontró la relación directa entre los valores físicos de ρ_r y las variables correspondientes a la resistencia al esfuerzo cortante máximo ($\tau_{máx.}$), de ángulo de fricción (ϕ) y de cohesión.

Palabras clave: ángulo de fricción interna, cohesión, densidad relativa, ensayo de corte directo, gravedad específica, granulometría, masas unitarias.

Abstract

The objective of this research is to determine how the physical characteristics of granular materials influence their mechanical behavior. For that end, two national sands were chosen, which are Guamo and Guayuriba, and another international one, which is Ottawa. Starting from the physical characterization tests, results of C_u , G_s , e_{min} , e_{max} , ρ_{min} and ρ_{max} are obtained, in order to determine their effect on the resistance

J. S. Manrique

Universidad Piloto de Colombia
Facultad de Ingeniería Civil
Nuevos Conocimientos, Componente investigación
Bogotá, Colombia.
e-mail: jhon-manrique@upc.edu.co
ORCID 0000-0002-1495-429X

J. C. Cordero

Universidad Piloto de Colombia
Facultad de Ingeniería Civil
Nuevos Conocimientos, Componente investigación
Bogotá, Colombia.
e-mail: juan-cordero@upc.edu.co
ORCID 0000-0002-9190-0818

O. D. Moreno

Universidad Piloto de Colombia
Facultad de Ingeniería Civil
Nuevos Conocimientos, Componente investigación
Bogotá, Colombia.
e-mail: oscar-moreno3@upc.edu.co
ORCID 0000-0003-0113-0635



parameters, result of the direct cutting test in consolidated drained conditions (CD) having an experimental campaign of 27 tests carried out on the 3 sands for the vertical forces of 50 kPa, 100 kPa and 200 kPa with relative densities (ρ_r) of 30%, 60% and 90% and a cutting speed of 1.0 mm/min. In this way, the direct relationship between the physical values of ρ_r with the variables corresponding to the shear resistance of τ_{max} , friction angle (ϕ) and cohesion (c) was found.

Keywords: cohesion, direct shear test, internal friction angle, relative density.

Resumo

O objetivo desta pesquisa é determinar como as características físicas dos materiais granulares influenciam seu comportamento mecânico. Para esse fim, foram escolhidas duas areias nacionais, que são Guamo e Guayuriba e outra internacional, que é Ottawa. A partir dos testes de caracterização física, são obtidos resultados de G_s , e_{min} , e_{max} , ρ_{min} e ρ_{max} , a fim de determinar seu efeito sobre os parâmetros de resistência, resultado do teste de corte direto em condições consolidadas de drenagem (CD) tendo uma campanha experimental de 27 testes realizados nas 3 areias para as forças verticais de 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa com densidades relativas (ρ_r) de 30%, 60% e 90% e uma velocidade de corte de 1,0 mm/min. Dessa forma, encontrou-se a relação direta entre os valores físicos do ρ_r com as variáveis correspondentes à resistência da tesoura de $\tau_{máx.}$, ângulo de atrito (ϕ) e coesão (c)

Palavras-chave: O ângulo de atrito interno, coesão, densidade relativa, teste de corte direto.

I. INTRODUCCIÓN

La resistencia juega un papel muy importante en la ingeniería civil, puesto que es el factor inicial desde el cual se parte hacia diferentes procesos: estructurales, viales, geotécnicos, entre otros. Para la geotecnia, es significativo conocer la resistencia que puede tener un suelo al ser afectado por distintos tipos de carga y esfuerzos, por lo cual este ha sido un tema importante de estudio en sus diferentes componentes.

En relación con lo anterior, una de las resistencias que resulta ser un factor relevante en el estudio del comportamiento de los suelos es la resistencia al corte, definida como la resistencia interna por área unitaria que la masa de suelo ofrece para resistir la falla por los esfuerzos y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano dentro de este [1]. Es posible conocer esta resistencia mediante un ensayo de corte directo, que consiste en determinar parámetros de resistencia del suelo según el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb. Entre estos parámetros están el ángulo de fricción y la cohesión [2].

De este modo, son varios los avances y estudios [3], [4] que se han realizado sobre la resistencia al esfuerzo cortante que exhiben los suelos, más específicamente los granulares, al ser ensayados, logrando distintas conclusiones que sirven de aporte a la literatura y al estudio de estos. Por ejemplo, una de las afirmaciones que resulta importante sobre el comportamiento de una arena es que este depende también de la forma y tamaño de los granos, del contenido de humedad y de la velocidad con que se realiza el corte [5].

Dentro de este marco, se tienen dos parámetros que son los resultados principales de un ensayo de corte directo: *la cohesión*, definida como la atracción entre partículas, generada por sus fuerzas internas, y *el ángulo de fricción interna*, el cual corresponde a una propiedad de los suelos que permite evaluar sus capacidades portantes última y admisible. Así mismo, se han estudiado los factores que pueden influir en los valores de estos dos parámetros que resultan ser un aspecto importante al momento de someter determinada muestra a un esfuerzo cortante. Por una parte, se ha encontrado que el ángulo de fricción interna (ϕ) depende esencialmente de factores como la compacidad del material, la forma de los granos, su grosor y la granulometría, que repercuten en el comportamiento mecánico de la arena.

Inicialmente, [6] determinó una correlación entre la densidad relativa (ρ_r) y el ϕ para diferentes suelos granulares, con la cual obtuvo una dimensión diferente de

influencia del material, variándola en gravilla uniforme, arena gruesa, arena media y arena fina, como se puede observar en la tabla 1.

Gravilla uniforme	Arena gruesa	Arena media	Arena fina
$\phi = 38 + 0,08 \rho_r$ (%)	$\phi = 34,5 + 0,10 \rho_r$ (%)	$\phi = 31,5 + 0,115 \rho_r$ (%)	$\phi = 28 + 0,14 \rho_r$ (%)

Tabla 1. Relación entre densidad relativa y ángulo de fricción, según Burmister [6].

Fuente: Elaboración propia.

Más adelante, en [7] se estableció la relación según el porcentaje de finos y limos que contenía la muestra, con lo cual evidenció cómo aumentan los valores de ϕ a medida que este porcentaje incrementa. Por otro lado, se han estudiado otros factores que influyen en el valor de ϕ , como lo es la ρ_r . Estas investigaciones coinciden en que el incremento de la ρ_r afecta positivamente los valores de ϕ , obteniendo así valores mayores de resistencia. Así mismo, en suelos granulares los resultados obtenidos arrojaron variaciones de hasta el $\pm 10\%$ en el ángulo de fricción interna, teniendo en cuenta la densidad relativa de la muestra se hallaron efectos negativos, principalmente en arenas mal gradadas de densidad relativa media [8]. Dentro de esta misma línea, la forma y tamaño de las partículas han sido de igual manera estudiadas en torno al efecto que pueden tener en el comportamiento mecánico de las partículas [9], concluyendo que, si bien la forma de las partículas es una característica que se pasa por alto en los datos de clasificación actuales, resulta ser un parámetro determinante en el comportamiento del suelo.

En este mismo sentido, refiriéndose a uno de los parámetros importantes del ensayo de corte directo, en [10] se afirma que el ángulo de fricción del estado crítico de un suelo mixto se ve afectado no solo por la forma de las partículas gruesas, sino también por la forma de las partículas finas. Complementando esta idea, al evaluar el efecto del tamaño de la partícula en la resistencia al corte respecto al ángulo de fricción interna, se ha demostrado que este último es mayor en los suelos arenosos con partículas de mayor tamaño que en los suelos que contienen partículas pequeñas [11].

Respecto al segundo parámetro, que es la cohesión (C), en [12] este valor es despreciable en los suelos granulares, porque considera que la cohesión es una propiedad de las arcillas de los tipos expansibles poco o muy poco existentes en los suelos franco-arenosos. En la investigación realizada en [13], se evidenció la influencia de la arcilla y humedad en las mezclas de arena y arcilla respecto al ensayo de corte directo. En dicho estudio se

concluyó que entre menor sea el porcentaje de arcilla en la mezcla, más cercanos serán los valores de cohesión a 0 y, por el contrario, las muestras con mayor porcentaje de arcilla obtuvieron menores valores de ángulo de fricción interna.

Existen dos modalidades de ensayos que se pueden aplicar a este tipo de estudios. El primero de ellos es el ensayo consolidado drenado, que se usa en casos específicos en los cuales el material debe tener una permeabilidad alta y la carga aplicada se hace lentamente, de manera que se puede usar en arenas o materiales granulares. El segundo ensayo es el consolidado no drenado, que se aplica cuando la permeabilidad del material es muy baja y la carga se aplica muy rápidamente. Esta última modalidad se practica con el fin de determinar los parámetros de cohesión y ángulo de fricción interna, relacionados con los esfuerzos totales y esfuerzos efectivos. Para ambas modalidades, la condición depende de la velocidad con la que el agua pueda moverse dentro del cuerpo o material hacia afuera o dentro del mismo, en comparación con el tiempo en que el suelo soporta el cambio de carga.

En relación con lo expuesto, se ha decidido estudiar el comportamiento mecánico respecto al ensayo de corte directo en condiciones de consolidado drenado (CD) de tres arenas específicas: dos arenas nacionales (arena del Guamo y arena de Guayuriba), y una internacional (arena de Ottawa).

Sobre las arenas nacionales se han hecho suficientes investigaciones, en torno a su caracterización y comportamiento mecánico, las cuales han permitido ampliar el conocimiento que se tiene sobre ellas, ya que son usadas constantemente. Por un lado, respecto a la arena de Guayuriba, en [14] realizaron una clasificación de la fracción fina de materiales provenientes del río Guayuriba y concluyeron que este es un material no plástico, por lo cual sus límites de consistencia están en el orden de cero; no presenta cohesión entre las partículas finas; es permeable, y en estado compacto se caracteriza por presentar una buena resistencia al corte. Con respecto a la arena del Guamo, también existen investigaciones que han ampliado el conocimiento sobre ella. En cuanto a su comportamiento mecánico, en [15] se demuestra que el ángulo de fricción crítico de la arena del Guamo obtenida a través de ensayos drenados se puede aproximar al ángulo de reposo del material.

Con el propósito de profundizar en el conocimiento de la caracterización y comportamiento mecánico de las arenas de Guamo, Guayuriba y Ottawa, se realizaron pruebas de laboratorio para clasificar físicamente los materiales y realizar ensayos de resistencia. En este caso, se ejecutaron ensayos de corte directo en condiciones consolidado-drenado.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Descripción del material granular ensayado

Para identificar los diferentes comportamientos de resistencia al corte se utilizaron 3 arenas diferentes, dos de ellas nacionales: la del Guamo y la de Guayuriba, pertenecientes a los departamentos del Tolima y del Meta, respectivamente. La tercera fue la arena de Ottawa, que ha sido estudiada en diferentes ámbitos [16], [17] y de la cual se tiene mayor información y caracterización en la teoría.

En ese orden de ideas, se tiene la arena del Guamo, uno de los suelos granulares más conocidos en términos académicos y que proviene del periodo Cuaternario. Su formación procede de los abanicos del Guamo, que son depósitos de arenas puzolánicas de origen volcánico. Su origen parte de erupciones explosivas del volcán cerro Machín, que generaron depósitos de piroclastos de caída y flujos piroclásticos, conformando así flujos de lodo que se canalizaron a través del río Coello. Los tamaños encontrados de este material son de fino a medio [18].

La arena de Guayuriba, por su parte, es una muestra constituida por diferentes agregados en los cuales sobresalen las cuarcitas y el cuarzo policristalino, de origen metamórfico y cuarzo de tamaño fino, en ocasiones con matriz lodosa y ferrosa de origen sedimentario [14]. Su origen parte del río Guayuriba, una formación de agua cuyas condiciones y características especiales permiten abastecer la gran demanda de materiales de construcción debida al crecimiento de la infraestructura en el país. Además, entre sus características principales, se destaca la gran cantidad de sedimentación. El río Guayuriba nace en la cordillera oriental, limita con Villavicencio y es cercano a diferentes municipios en todo su trayecto, y es uno de los ríos más importantes del sector [14].

La última arena utilizada fue la de Ottawa (20-30), sílice natural, clasificada especialmente para que pueda pasar por un tamiz 20 y ser retenida en el #30. Está compuesta en su mayoría por granos redondeados de cuarzo puro, que sirven para la preparación de cemento hidráulico. Es un material puramente granular, que proviene de la extracción y procesamiento cercano a los ríos Illinois y Fox en los Estados Unidos. También se pueden encontrar en las formaciones geológicas de Minnesota.

La caracterización física obtenida para las tres arenas ensayadas se encuentra en la tabla 2, donde se evidencia el resultado de los ensayos de granulometría, gravedad específica y masas unitarias.

Arenas	Cu	Cc	Gs	$\rho_{\text{máx.}}$	$\rho_{\text{mín.}}$	$e_{\text{máx.}}$	$e_{\text{mín.}}$
Ottawa	1,51	1,37	2,67	1,76	1,49	0,80	0,52
Guayuriba	6,21	0,66	2,68	1,91	1,53	0,81	0,40
Guamo	1,40	0,94	2,69	1,85	1,36	0,96	0,44

Donde

- Cu: Coeficiente de uniformidad
- Cc: Coeficiente de curvatura
- Gs: Gravedad específica
- $\rho_{\text{máx.}}$: Masa unitaria máxima
- $\rho_{\text{mín.}}$: Masa unitaria mínima
- $e_{\text{máx.}}$: Relación de vacíos máxima
- $e_{\text{mín.}}$: Relación de vacíos mínima

Tabla 2. Caracterización Física.
 Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo el orden en el cual se realizaron los ensayos de caracterización física, en la figura 1 se muestran las curvas granulométricas obtenidas para cada una de las tres arenas investigadas. Allí se observa un tamaño de partículas y gradación similar en las arenas de Ottawa y Guamo; con una retención aproximada del 85% en el tamiz #50 para la primera y del 95% en el tamiz #30 para la segunda. Por el contrario, la arena de Guayuriba presentó mayor variedad de tamaños en su composición y hubo retención de material entre los tamices #4 al #200.

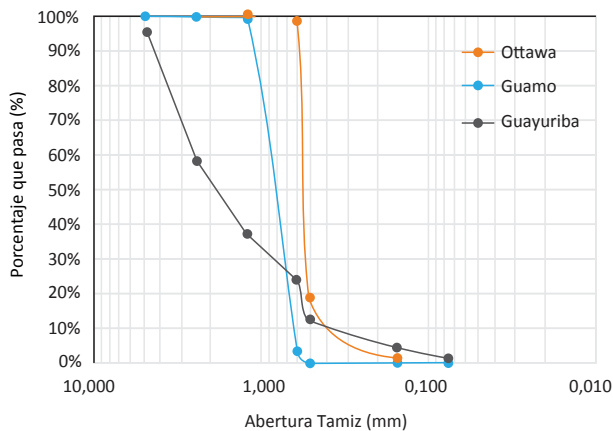


Figura 1. Curvas granulométricas de las arenas: Guamo, Guayuriba y Ottawa.
 Fuente: Elaboración propia.

B. Campaña experimental

El objetivo de esta investigación fue determinar la relación entre las características físicas de las arenas de Ottawa, Guamo y Guayuriba con su comportamiento mecánico, concretamente con su resistencia al corte, mediante 9 ensayos de caracterización física y 27 ensayos de corte directo, teniendo en cuenta que las tres mues-

tras son de diferente procedencia. Se estudió la influencia desde sus características físicas, según los ensayos de laboratorio planteados por la norma [19] en relación con la granulometría, la gravedad específica y las masas unitarias, analizando su influencia en el comportamiento mecánico, considerado como la resistencia al corte del material en condiciones de consolidado drenado. Se inició con los ensayos de caracterización física, en los cuales se llevó a cabo la granulometría con el objetivo de obtener la distribución del tamaño de las partículas que forman parte del material, según lo que indica la norma [20].

Los estudios de granulometría se pueden hacer a través de dos métodos. El primero es mediante el hidrómetro, que se utiliza en la mayoría de los casos para arcillas y limos; el segundo, por medio de los tamices que se utilizan para gravas y arenas. Por la naturaleza del estudio, el segundo método fue el que se utilizó en este caso. Como resultado de este ensayo se obtuvieron, para cada uno de los materiales observados, los valores de Cu y Cc que se presentan en la tabla 2, así como la curva granulométrica mostrada en la figura 1.

A continuación, se llevó a cabo el ensayo de la norma [21], referente a la gravedad específica, definida como la correlación de la masa con un determinado volumen de sólidos a una temperatura específica. Este ensayo permitió determinar la relación entre peso y volumen del agregado, y así mismo calcular el contenido de vacíos en las mezclas.

Para el siguiente ensayo, se utilizó el método de determinación de las masas unitarias máxima y mínima para el cálculo de la densidad relativa como lo indica la norma [22], el objeto de este método permite determinar la densidad máxima y mínima de una arena seca, no cementada, que en su totalidad pueda pasar por el tamiz de 4,75 mm y que no contenga más de un 10% del material. La densidad máxima es aquel estado que alcanza la arena cuando se compacta en estado seco por medio de una energía externa, y la densidad mínima es el estado más suelto de la compactación que presenta el material. De esta manera, los resultados obtenidos se pueden observar en la tabla 2 en los parámetros de $e_{\text{mín.}}$, $e_{\text{máx.}}$, $\rho_{\text{mín.}}$ y $\rho_{\text{máx.}}$.

El cuarto y último ensayo que se aplicó fue el de corte directo siguiendo los lineamientos establecidos en la norma [23], el cual consistió en determinar la resistencia al corte de una determinada muestra por medio del hallazgo de los coeficientes de cohesión y ángulo de fricción interna mediante diferentes parámetros definidos en la norma. El primer parámetro es la deformación de la muestra a una velocidad controlada, que para este caso fue de 1 mm/min; el segundo son los esfuerzos verticales, que en este caso fueron de 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa;

el tercer parámetro es la densidad relativa aplicada al 30%, 60% y 90%. También se tiene en cuenta la condición del material que puede ser drenada o no drenada. En este caso, se utilizó la primera opción, ya que la norma establece que este tipo de muestras granulares se deben ensayar en condición drenada. Este ensayo permite obtener variables acerca del material, entre ellas el ángulo de fricción interna, que permite comprender y analizar la resistencia al corte del material.

En las figuras 2 a 7, se presenta un registro fotográfico del equipo de corte y el proceso que se realizó con cada arena para los 27 ensayos. En estas imágenes, se evidencia el procedimiento con la arena de Guayuriba: la preparación y colocación de la muestra en la cámara de corte, su estado inicial y final después de ser sometida al esfuerzo cortante.



Figura 4. Estado del material dentro de la cámara de corte (Arena de Ottawa)
Fuente: Elaboración propia.



Figura 2. Preparación masa de la muestra (Arena de Ottawa)
Fuente: Elaboración propia.



Figura 5. Colocación de piedra porosa (Arena de Ottawa)
Fuente: Elaboración propia.

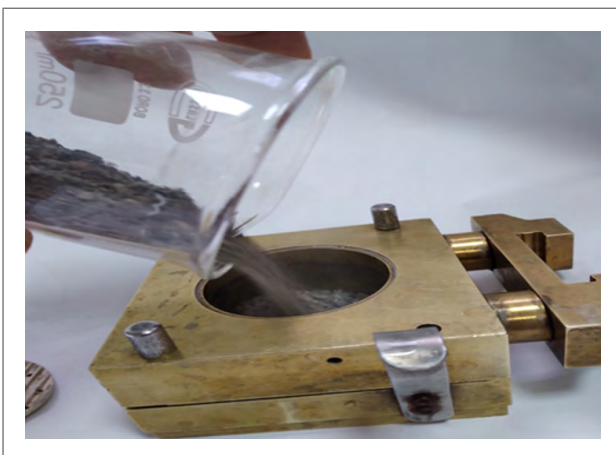


Figura 3. Colocación de la muestra en la cámara de corte (Arena de Ottawa)
Fuente: Elaboración propia.



Figura 6. Cámara de corte lista para ser ensayada (Arena de Ottawa)
Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. Resultado de muestra fallada en el equipo de corte directo (arena de Ottawa)
 Fuente: Elaboración propia.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los datos obtenidos desde la granulometría para el coeficiente de uniformidad (C_u), describen lo observado en la tabla 1 y la figura 1. A partir de ello, en primer lugar, se puede inferir que la arena de Ottawa y la arena del Guamo son materiales uniformes, pues según [24], los valores de C_u menores de 4 o 6 se caracterizan de esta manera. Por el contrario, la arena de Guayuriba presenta un C_u de 6,21, lo cual indica que es bien gradada, ya que “en cuanto más alto sea el valor de C_u más amplio será el rango de tamaños de partículas en el suelo” [24]. De esta manera, se encontró que la arena de Guayuriba presenta variedad de tamaños, es decir, material gradado, como el que se ilustra en la figura 8, literal a; mientras que la arena del Guamo y la de Ottawa, presentaron tamaños similares en el total de la muestra, es decir, material uniforme, sin diferencia significativa en sus tamaños, como el que se ilustra en el literal b de la figura 8.

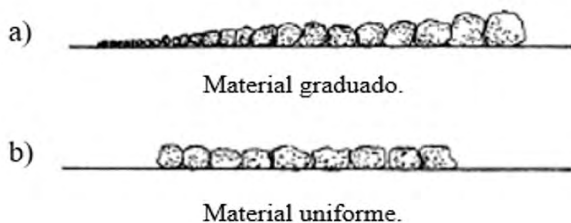


Figura 8. Tamaño de partículas de materiales. [25]
 Fuente: Elaboración propia.

Continuando con la caracterización física, es importante revisar la gravedad específica obtenida de cada arena. En este caso, se hallaron valores de 2,67, 2,68 y 2,69 para las arenas de Ottawa, Guayuriba y Guamo, respectivamente. A partir de lo encontrado en la investigación de varios autores en [26] se establecieron un rango de valores para materiales granulares similares, en el orden anteriormente establecido, de 2,67, 2,68 y 2,70, lo que evidencia que hubo concordancia y cercanía en los valores obtenidos.

De igual manera, en la tabla 2, se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de masas unitarias máxima y mínima [22], para 4 variables distintas, $\rho_{máx.}$, $\rho_{mín.}$, $e_{máx.}$ y $e_{mín.}$. Con base en los valores típicos para arenas granulares uniformes o bien gradadas establecidos en [27], los valores hallados en este caso se encuentran dentro de los rangos establecidos para este tipo de arenas, lo cual permite validar los resultados obtenidos en esta investigación.

La primera correlación realizada para evidenciar la influencia de las características físicas en la resistencia a corte directo es aquella que se da entre el esfuerzo cortante máximo ($\tau_{máx.}$) y la densidad relativa (ρ_r). En las figuras 9, a 11, se presentan los análisis que permiten entender mejor el comportamiento, según los esfuerzos verticales de 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa respectivamente. [28] reconoce una relación significativa entre la densidad aparente y la resistencia mecánica de un suelo, lo que coincide con lo que se muestra en estas figuras, de las cuales se infiere, en principio, que existe una relación directa entre $\tau_{máx.}$ y ρ_r , de tal manera que, a mayor densidad, mayor el esfuerzo que presenta la arena.

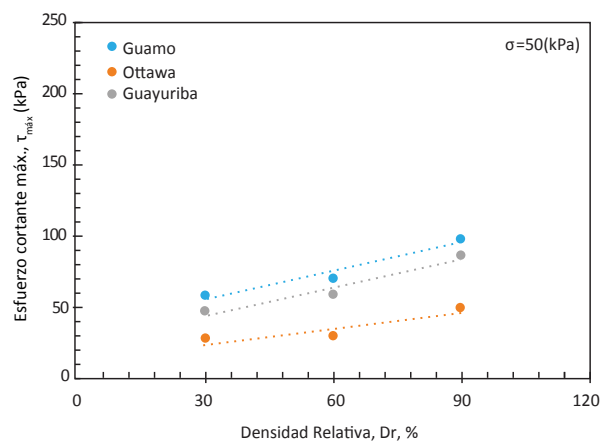


Figura 9. $\tau_{máx.}$ (kPa) vs. D_r (%), 50 kPa
 Fuente: Elaboración propia.

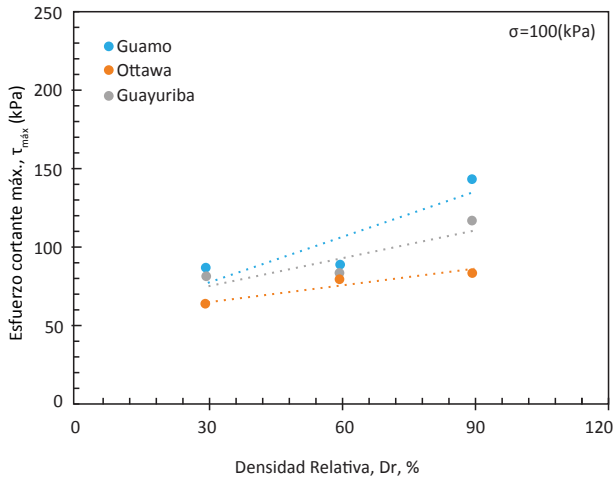


Figura 10. τ_{\max}^* (kPa) vs. D_r (%), 100 kPa
 Fuente: Elaboración propia.

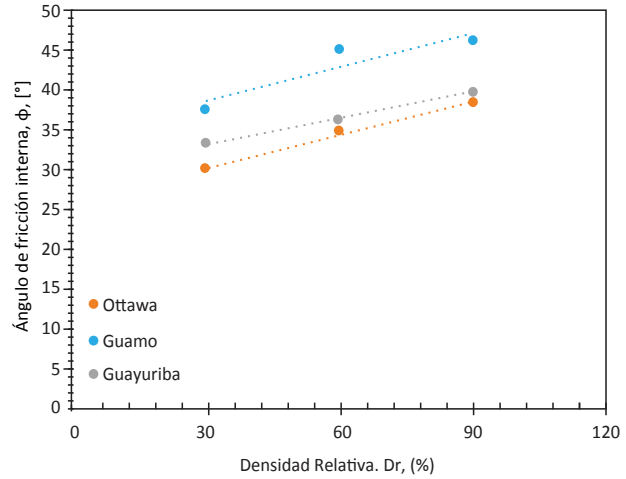


Figura 12. Relación entre ángulo de fricción interna (ϕ) y densidad relativa (ρ_r)
 Fuente: Elaboración propia.

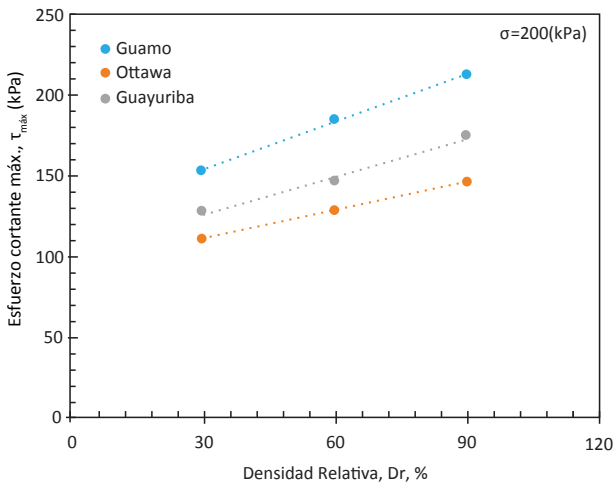


Figura 11. τ_{\max}^* (kPa) vs. ρ_r (%), 200 kPa
 Fuente: Elaboración propia.

La arena que ha presentado una resistencia mayor es la arena del Guamo, seguida de la arena de Guayuriba y, por último, está la arena de Ottawa. Para un esfuerzo normal de $\sigma = 200$ kPa y un valor de ρ_r de 90%, los esfuerzos máximos de corte alcanzan los valores de 211,76 kPa, 174 kPa y 146,45 kPa para las arenas de Guamo, Guayuriba y Ottawa respectivamente. La característica de densidad relativa en las tres arenas tuvo una clara influencia en los datos obtenidos de ángulo de fricción interna, como se puede observar en la figura 12, donde se muestra la relación directa que existe entre estas dos variables. De acuerdo con lo obtenido, se puede corroborar la hipótesis planteada por [29], respecto a que el ángulo de fricción interna aumenta cuando la densidad relativa es mayor.

Respecto a la cohesión, los resultados se muestran en las figuras 13 a 15. Como se puede observar, para las tres arenas, con diferentes densidades relativas de 30%, 60% y 90%, se obtuvieron valores muy cercanos a 0 en los tres casos. En [27] analizaron los valores típicos de cohesión para los diferentes tipos de suelos y de su investigación se infiere que en los suelos granulares los valores de cohesión no son significativos, ya que no son cohesivos. Esto, apoyado en los valores establecidos para los suelos cohesivos, cuyos rangos de cohesión están por encima de 10 kPa. De esta manera, los valores de C obtenidos, de 9,02, 9,49 y 4,57 kPa, para las arenas de Guayuriba, Guamo y Ottawa, respectivamente, no fueron valores lo suficientemente significativos para establecer un análisis.

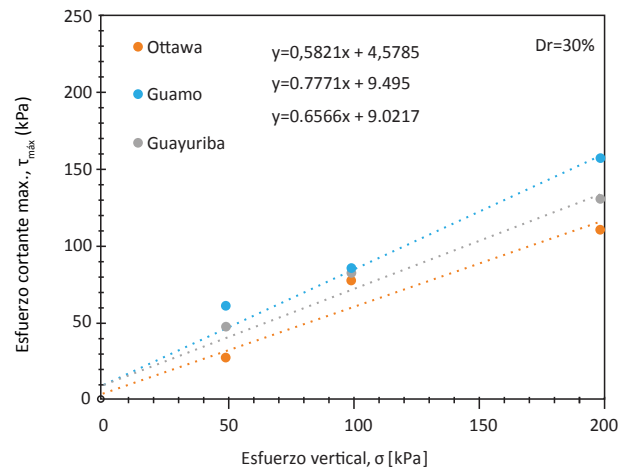


Figura 13. Parámetros corte directo, $\rho_r = 30\%$
 Fuente: Elaboración propia.

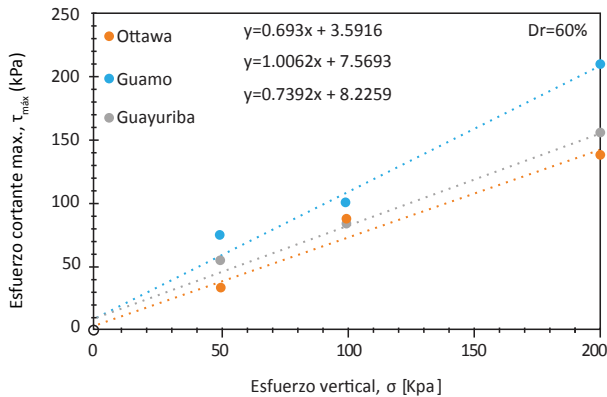


Figura 14. Parámetros corte directo, $\rho_r = 60\%$
 Fuente: Elaboración propia.

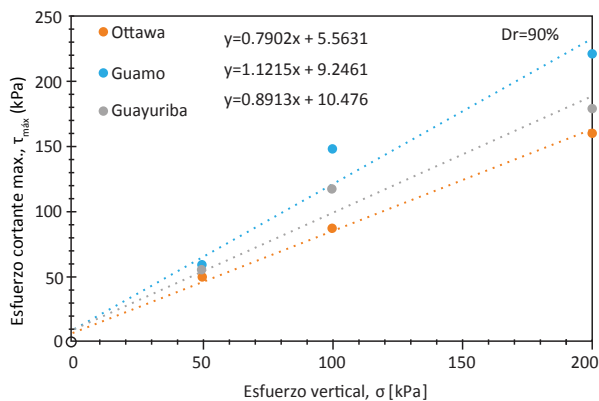


Figura 15. Parámetros corte directo, $\rho_r = 90\%$
 Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, el comportamiento observado en las tres arenas con respecto a su deformación puede corroborar que cuando estas son sometidas inicialmente a un esfuerzo vertical, se compactan y luego dilatan, debido al fenómeno llamado *dilatancia* [30].

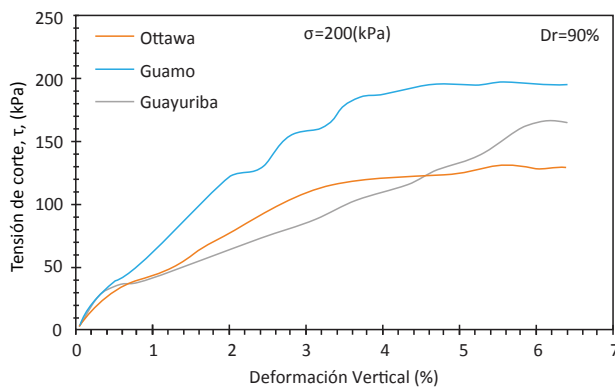


Figura 16. Tensión de corte directo vs. deformación vertical, $\rho_r = 90\%$, $\sigma = 200$ kPa
 Fuente: Elaboración propia.

En la figura 16 se puede observar este procedimiento en los tres materiales, donde se evidencia un punto pico en diferentes porcentajes de deformación vertical en el cual las arenas empiezan a dilatarse.

IV. CONCLUSIONES

De acuerdo con los ensayos de caracterización física y mecánica realizados para las tres arenas, a partir del análisis e interpretación de los resultados, se presentan las siguientes conclusiones para esta investigación:

Las arenas de Ottawa y Guamo son uniformes, ya que presentan valores de coeficiente de uniformidad (C_u) menores de 4, mientras que la arena de Guayuriba es bien gradada, ya que presenta un valor de C_u mayor de 6, lo que indica que tiene un mayor rango de tamaños de partículas.

Los valores de τ_{max} se ven influenciados por las densidades relativas para cada caso, es decir, las arenas al ser ensayadas con una ρ_r de 30% obtuvieron menores esfuerzos al corte que las que fueron ensayadas con una ρ_r de 60% y de 90%. El incremento que se evidencia presenta un promedio de 12% para los valores del ρ_r entre 30% y 60%, y un 24 % para las ρ_r de 60% y 90%.

Los resultados obtenidos de ángulo de fricción interna (ϕ) para las tres arenas fueron coherentes con los valores típicos establecidos por la teoría, permitiendo así conocer la capacidad portante última y admisible de los tres materiales.

De acuerdo con los valores de ϕ obtenidos, se puede inferir que la arena del Guamo presenta una mejor acomodación de partículas, puesto que con ρ_r de 60% y 90% mostró valores de ϕ cercanos o mayores a 45° , los cual indica que es una arena muy densa.

Para nuestra investigación, los ensayos de corte directo resultaron ser acertados y confiables, ya que las muestras utilizadas fueron alteradas y de tipo granular, situación contraria al ensayo triaxial, en el que se dificulta el manejo de los materiales en estas condiciones, dando por hecho que para una condición granular se hace necesario cambiar las condiciones del suelo.

Otro de los efectos de las características físicas que influyó en el comportamiento mecánico de las tres arenas, se observó en el ángulo de fricción interna ϕ , puesto que se encontró una relación directa de crecimiento entre los parámetros de ρ_r y ϕ , exponiendo así que las arenas más consolidadas y/o densas tendrán una mayor capacidad portante.

Las tres arenas presentaron un comportamiento de dilatación esperado, ya que, al ser sometidas inicialmente a un esfuerzo cortante, la deformación volumétrica disminuyó gradualmente hasta llegar a un punto máximo de tensión, donde comenzaba a presentarse un aumento en la deformación volumétrica, evidenciando así un fenómeno de dilatación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestros agradecimientos al Laboratorio de Suelos de la Universidad Piloto de Colombia y al personal técnico de laboratorio, por todo el soporte brindado durante la campaña experimental de este proyecto de investigación. Sin sus enseñanzas y aportes, esta investigación no se habría dado de la mejor manera. Asimismo, a la universidad, por permitirnos diseñar este proyecto, darnos los espacios para desarrollar esta investigación y brindarnos las herramientas pertinentes para abordar cada experimento y cada prueba durante desarrollo del proyecto. Además, deseamos agradecer a nuestros familiares y amigos, ya que sin su acompañamiento y su apoyo sería muy difícil llegar hasta este punto. Esta investigación es siempre fruto de ideas y proyectos previos que corresponden a estas personas en nuestra vida. Agradecemos también a la ingeniera Eliana Martínez, por su orientación y atención a todas nuestras consultas e inquietudes, por la dedicación y el apoyo brindados, así como por su respeto a nuestras sugerencias e ideas.

REFERENCIAS

- [1] J. A. Pineda-Jaimes, C. D. Adames-Reyes y C. A. Rodríguez-Machado, "Parametros de resistencia al corte para interfases de arena-concreto: propuesta de investigación", en *Twelfth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2014)*, Guayaquil, Ecuador, 22-24 de julio, 2014. [En línea]. Disponible: <https://repository.usta.edu.co/handle/11634/1930>
- [2] Š. Skuodis, A. Norkus, N. Dirgėlienė y L. Rimkus, "Determining characteristic sand shear parameters of strength via a direct shear test", *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 22, n.º 2, pp. 271-278, mar. 2016.
- [3] L. F. Tenesaca Illescas and D. F. Caiza Flores, "Correlación entre el ángulo de fricción y la relación de vacíos en arenas utilizando el ensayo de corte directo", trabajo de grado, Ing. Civ., Univ. Politéc. Salesiana, Quito, Ecuador, 2019. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/17738>
- [4] F. J. Nanclares Arango, "Comportamiento mecánico de suelos grueso granulares de origen aluvial", tesis doctoral, Dep. Ing. Civ. Agríc., Univ. Nac. Colomb., Bogotá, Colombia, 2018. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/63792>
- [5] L. E. Marín Nieto, *Mecánica de Suelos*. Guayaquil, Ecuador: Universidad de Guayaquil, 1991.
- [6] D. M. Burmister, "The importance and practical use of relative density in soil mechanics", en *Proc. -Am. Soc. Test. Mater.*, vol. 48, 1948, pp. 1249-1268.
- [7] G. Meyerhof, "Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils", *J. Soil Mech. Found. Div.*, vol. 82, n.º 1, pp. 819-866, ene. 1956.
- [8] J. F. Camacho Tauta, O. J. Reyes Ortiz y A. Nieto Leal, "Anisotropía de esfuerzos y resistencia al corte de arenas", *Cienc. Ing. Neogranadina*, vol. 16, n.º 1, pp. 5-8, ago. 2006.
- [9] C. Gye-Chun, D. Jake y S. J. Carlos, "Particle Shape Effects on Packing Density, Stiffness, and Strength: Natural and Crushed Sands", *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, vol. 132, n.º 5, pp. 591-602, mayo 2006.
- [10] J. Yang y L. M. Wei, "Collapse of loose sand with the addition of fines: the role of particle shape", *Géotechnique*, vol. 62, n.º 12, pp. 1111-1125, dic. 2012.
- [11] A. Rasti, H. Adarmanabadi, M. Pineda y J. Reinikainen, "Evaluating the effect of soil particle characterization on internal friction angle", *Am. J. Engin Appl. Sci.*, vol. 14, n.º 1, pp. 129-138 2021.
- [12] A. J. Hossne, G. Paredes, R. Carvajal, E. Santaella y J. Malaver, "Cohesión aparente de un suelo agrícola franco arenoso de sabana", *Acta Univ.*, vol. 21, n.º 3, pp. 5-13, 2011.
- [13] M. A. Dafalla, "Effects of clay and moisture content on direct shear tests for clay-sand mixtures", *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2013, art. 562726, 2013, doi: <https://doi.org/10.1155/2013/562726>

- [14] M. A. Mejía Niño y Y. G. Herrera Álvarez, “Clasificación de la fracción fina de materiales provenientes del río Guayuriba en la ciudad de Villavicencio, Meta, a partir de su valor de azul de metileno y su relación con la clasificación por el sistema unificado y Sistema AASHTO”, trabajo de grado, Fac. Ing., Univ. Catól. Colomb., Bogotá, Colombia, 2016. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10983/13971>
- [15] J. C. Patiño, “Parámetros hipoplásticos de la arena del Guamo-Colombia”, tesis de MSc., Dep. Ing. Civ. Ambient., Univ. Andes, 2006. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/1992/9116>
- [16] A. M. Parra Bastidas, “Ottawa F-65 sand characterization”, tesis PhD, Dept. Civ. Environm. Eng., Univ. Calif., Davis, 2016.
- [17] M. A. ElGhoraiby, H. Park y M. T. Manzari, “Stress-strain behavior and liquefaction strength characteristics of Ottawa F65 sand”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 138, art. 106292, nov. 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106292>
- [18] J. C. Ruiz Acero y J. F. Bermúdez Cuervo, “Estudio experimental de la línea de inestabilidad bajo condiciones anisotrópicas de carga no drenada monotónica”, tesis de maestría, Dep. Ing. Civ., Pontif. Univ. Javeriana, 2015. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10554/16813>
- [19] Instituto Nacional de Vías. *Normas de Ensayo de Materiales para carreteras*. Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia, 2013.
- [20] INVIAS, “Determinación de los tamaño de las partículas de los suelos”, en *Normas de Ensayo de materiales para carreteras*, 2013, ch INV E 123, pp 185-206
- [21] INVIAS, “Determinación de la gravedad específica de las partículas sólidas de los suelos y del llenante mineral, empleando un picnómetro con agua”, en *Normas de Ensayo de materiales para carreteras*, 2013, ch INV E 128, pp 245-260
- [22] INVIAS, “Determinación de las masas unitarias máxima y mínima para el cálculo de la densidad relativa”, en *Normas de Ensayo de materiales para carreteras*, 2013, ch INV E 136, pp 331-338
- [23] INVIAS, “Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD)”, en *Normas de Ensayo de materiales para carreteras*, 2013, ch INV E 154, pp 523-544.
- [24] L. B. Berry y D. Reid, *Mecánica de suelos*. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill, 1993.
- [25] C. Crespo Villalaz, *Mecánica de suelos y cimentaciones/Mechanics of Grounds and Laying of Foundations*. México: Limusa, 2005.
- [26] J. F. Camacho-Tauta, F. A. Molina Gómez y Ó. J. Reyes Ortiz, “Preparación de especímenes de arena para ensayos triaxiales mediante un método controlado de compactación”, *Rev. Cient. General José María Córdova*, vol. 12, n.º 14, pp. 185-196, 2014.
- [27] E. Hoek y J. W. Bray, *Rock slope engineering*, 3rd ed. Londres: Institution of Mining and Metallurgy, 1991.
- [28] R. Blanco, “La relación entre la densidad aparente y la resistencia mecánica como indicadores de la compactación del suelo”, *Agrociencia*, vol. 43, n.º 3, pp. 231-239, abr.-may. 2009.
- [29] G. González de Celis, E. De Barcia, Y. Sulbaran y R. Ucar Navarro, “Determinación del parámetro de resistencia, ángulo de fricción Interna (ϕ) y su relación con los parámetros densidad relativa (D_r) y relación de vacíos (e) en suelos granulares”, *Cienc. Ing.*, vol. 35, n.º 3, pp. 135-146, feb. 2014.
- [30] E. Pedrero Huete, “Análisis del comportamiento de arenas medias mediante la mesa de corte directo y las diferentes tipologías de ensayo”, 2017. [En línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10317/8303>