

**COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO
CORTANTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO Y
COMPRESIÓN SIMPLE PARA UNA ARENA MAL GRADADA EN LA
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA**

**ALEXANDRA NIÑO WILCHES
ANGGIE CAROLINA PLATA BALETA**

**DIRECTOR:
GERARDO BAUTISTA GARCÍA
MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SECCIONAL BUCARAMANGA
2012**

**COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO
CORTANTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO Y
COMPRESIÓN SIMPLE PARA UNA ARENA MAL GRADADA EN LA
UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA**

**ALEXANDRA NIÑO WILCHES
ANGGIE CAROLINA PLATA BALETA**

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**DIRECTOR:
GERARDO BAUTISTA GARCIA
MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
SECCIONAL BUCARAMANGA
2012**

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Octubre de 2012

DEDICATORIA

La vida se encargó de darme la oportunidad de ingresar a un prodigioso lugar donde sabía muy bien que no sólo crecería como profesional, sino también como persona íntegra y llena de valores.

Este lugar con el tiempo se fue convirtiendo en mi segundo hogar donde pasaba gran parte de mis días creciendo y aprendiendo más de esta carrera hermosa de la cual me enamoré.

Todo este proceso lo puedo definir con una sola palabra “GRACIAS”, gracias a todas esas personas que hicieron parte de mi vida en la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, a mis compañeros que con el tiempo se fueron convirtiendo como en mis hermanos, con quienes compartí alegrías, tristezas, discusiones, noches en vela; gracias mil gracias a todos mis maestros que con su sabiduría me enseñaron a amar esta hermosa carrera, que con sus exigencias me hicieron crecer aun más, gracias por ser tan estrictos, sé que eso se verá reflejado al momento de salir como toda una profesional; gracias a todas las personas que hacen parte de todo un equipo logístico, directivos, secretarias, señoras de aseo, laboratorios, biblioteca, gracias a todas estas personas daban ganas de llegar a la universidad y ver que en cualquier rincón de ella me sentiría a gusto; gracias a mi familia que con paciencia me apoyaron en todo mi proceso y por último pero no menos importante, gracias a Dios por ser el motor de mi vida y por brindarme la oportunidad de hacer parte de ésta gran familia Bolivariana.

Gracias Universidad Pontificia Bolivariana siempre recordaré este lugar como un templo de crecimiento personal y profesional.

ALEXANDRA NIÑO WICHES

DEDICATORIA

Desde que ingresé a la Universidad Pontificia Bolivariana a hacer mi primer semestre de ingeniería civil, emprendí una travesía, la cual me ha llevado a conocer muchas personas que de una u otra forma han hecho aportes importantes en mi vida.

Hoy, a poco tiempo de terminar esa travesía, quiero agradecer a mis padres principalmente, que han sido y serán siempre el motor de mi vida, quienes inculcaron los valores que hoy me han servido para ser la buena persona que soy, me apoyaron en todo momento y estuvieron en mis aciertos y desaciertos, me mostraron el camino indicado y fueron y serán siempre mi mejor ejemplo a seguir. A Dios, mi familia, amigos y compañeros de estudio, profesores y demás personas que dieron su aporte para poder alcanzar este sueño les quiero dar encarecidamente las gracias, éste logro es de ustedes también, sin su apoyo y ayuda esto no hubiera sido posible.

La felicidad que invade mi corazón es enorme porque éste es un gran paso en mi vida, pasar de ser estudiante a ser profesional, y es a ellos mismos a quienes les dedico este triunfo.

ANGGIE CAROLINA PLATA BALETA

AGRADECIMIENTOS

Somos Alexandra Niño Wilches y Anggie Carolina Plata Baleta, dos estudiantes a pocos pasos de ser profesionales y de lograr la meta que nos trazamos al empezar esta carrera.

Queremos agradecer a Dios, por permitirnos cumplir nuestros sueños y nunca abandonarnos, a nuestros padres Orlando Niño Prieto, Luz Miryam Wilches Rueda y Ramón Augusto Plata Montero, Damaris Leonor Baleta Orozco, las personas que nos impulsan y motivan a esforzarnos, a dar todo de nosotras y a no rendirnos nunca, quienes nos dieron la oportunidad de estudiar en una prestigiosa institución como lo es la Universidad Pontificia Bolivariana Seccional Bucaramanga, a nuestros amigos, que nos brindaron su ayuda cuando la necesitamos, a nuestros profesores, que nos llenaron de su conocimiento y nos enseñaron lo necesario para enfrentarnos a una vida profesional y a la Universidad Pontificia Bolivariana, sus directivos y empleados, que cada día dan todo de sí mismos para lograr el mejor ambiente de estudio, familiaridad y comodidad que nosotros los estudiantes necesitamos.

De igual forma, darle las gracias a nuestro director de tesis Gerardo Bautista García por su apoyo incondicional, por la dedicación de su tiempo y por su colaboración y paciencia en todo momento; a los laboratoristas Heli Rueda Aparicio, José Vicente Páez Mendoza y Leonel Ojeda Sánchez, quienes fueron nuestra guía en la realización de los ensayos y estuvieron pendientes para atender a nuestras inquietudes.

CONTENIDO

	Página
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	17
1.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. ANTECEDENTES	18
2.1 RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO Y COMPRESIÓN SIMPLE PARA ARENAS LIMOSAS	18
2.2 CORRELACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA Y CBR TIPO I PARA ARENAS LIMOSAS (SM)	18
2.3 RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO Y COMPRESIÓN SIMPLE PARA ARENAS ARCILLOSAS	19
2.4 CORRELACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA Y CBR TIPO I PARA ARENAS ARCILLOSAS (SC)	20
3. METODOLOGÍA	21
3.1 TOMA DE MUESTRAS DE SUELO	21
3.2 REALIZACIÓN DE ENSAYOS	21
3.2.1 Granulometría	21
3.2.2 Proctor Modificado	22

3.2.3	Corte Directo	22
3.2.4	Compresión Inconfinada	22
3.3	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	23
4.	MARCO TEÓRICO	24
4.1	SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS	24
4.2	ARENAS MAL GRADADAS	25
4.3	ENSAYO DE CORTE DIRECTO	25
4.3.1	Principios generales	25
4.3.2	Clasificación	27
4.3.2.1	Ensayo no consolidado, no drenado o ensayo u	27
4.3.2.2	Ensayo consolidado drenado	27
4.3.2.3.	Ensayo consolidado no drenado	28
4.4	ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA	28
4.4.1	Principios generales	28
4.4.2	Formas de realización del ensayo	29
4.4.2.1	Experimento de Compresión Inconfinada con control de deformación unitaria	29
4.4.2.2	Experimento de Compresión Inconfinada con control de esfuerzo	30
4.5	PARÁMETROS DE CORTE DIRECTO Y COMPRESIÓN INCONFINADA	30
5.	RESULTADOS OBTENIDOS	32

5.1	CLASIFICACIÓN	32
5.2	COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO	36
5.3	CORTE DIRECTO	39
5.4	COMPRESIÓN INCONFINADA	40
6.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	43
7.	CONCLUSIONES	45
8.	RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES	47
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

ANEXOS

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla 1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos	24
Tabla 2. Resultados de Granulometría, muestra 1	32
Tabla 3. Resultados de Granulometría, muestra 2	33
Tabla 4. Resultados de Granulometría, muestra 3	34
Tabla 5. Promedio de los resultados de Granulometría de las muestras	35
Tabla 6. Promedio de los resultados de Proctor Modificado	38
Tabla 7. Resultados de los ensayos de Corte Directo	39
Tabla 8. Resultados de los ensayos de Compresión Inconfinada	41

LISTA DE ILUSTRACIONES

	Página
Ilustración 1. Máquina manual de Corte Directo	26
Ilustración 2. Máquina de Compresión Inconfinada	29
Ilustración 3. Aplicación de cargas en Corte Directo	30
Ilustración 4. Granulometría, muestra 1	32
Ilustración 5. Granulometría, muestra 2	34
Ilustración 6. Granulometría, muestra 3	35
Ilustración 7. Curvas de granulometría de las tres muestras	36
Ilustración 8. Compactación Proctor Modificado, muestra 1	36
Ilustración 9. Compactación Proctor Modificado, muestra 2	37
Ilustración 10. Compactación Proctor Modificado, muestra 3	38

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Registro fotográfico

Anexo B. Norma Invias I.N.V. E – 123 – 07
Análisis granulométrico de suelos por tamizado

Anexo C. Norma Invias I.N.V. E – 142 – 07
Relaciones de Humedad – Masa Unitaria Seca en los suelos
(ensayo modificado de compactación)

Anexo D. Norma Invias I.N.V. E – 154 – 07
Determinación de la resistencia al corte
Método de Corte Directo (CD) (Consolidado Drenado)

Anexo E. Norma Invias I.N.V. E – 123 – 07
Compresión Inconfinada en muestras de suelo

Anexo F. Ensayos de Granulometría

Anexo G. Ensayos Proctor Modificado

Anexo H. Ensayos de Corte Directo

Anexo I. Ensayos de Compresión Inconfinada

GLOSARIO

ÁNGULO DE FRICCIÓN: Ángulo cuya tangente es la relación entre la fuerza que resiste el deslizamiento, a lo largo de un plano, y la fuerza normal.

COHESIÓN: Es la fuerza de atracción entre moléculas que mantiene unidas las partículas del agua.

LEY DE FALLA DE MOHR-COULOMB: Es el criterio que propone la ecuación de la envolvente de falla (línea tangente a los círculos de Mohr) y se define en función de la tensión normal y la tensión tangencial.

LL: (Límite líquido). Cuando el suelo pasa de un estado semilíquido a un estado plástico y puede moldearse.

LP: (Límite plástico). Cuando el suelo pasa de un estado plástico a un estado semisólido y se rompe.

MÓDULO DE ELASTICIDAD: Representa el grado de rigidez de un material.

MUESTRAS INALTERADAS: Muestras que conservan teóricamente las mismas propiedades que tiene el terreno.

PERMEABILIDAD: Es la capacidad que tienen los materiales de permitir el paso de fluidos a través de su estructura sin afectarlos internamente.

RELACIÓN POISSON: Es la relación existente entre la tensión normal al esfuerzo aplicado y la tensión paralela al mismo.

TOMAMUESTRAS BISHOP: Es un tomamuestras abierto, de pared delgada, introducido dentro de un tubo de mayor diámetro el cual se puede llenar de aire comprimido.

SP: Arena mal gradada.

SUCS: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

Fuentes:

CRESPO VILLALAZ, Carlos. 2004. Mecánica de suelos y cimentación. México. Editorial: Limusa.

JUÁREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. 2004. Mecánica de suelos, teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos. Tomo II. México. Editorial: Limusa.

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO Y COMPRESIÓN SIMPLE PARA UNA ARENA MAL GRADADA EN LA UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA.

AUTORES: ALEXANDRA NIÑO WILCHES
ANGGIE CAROLINA PLATA BALETA

FACULTAD: INGENERÍA CIVIL

DIRECTOR: GERARDO BAUTISTA GARCÍA

RESUMEN

Las arenas mal gradadas son materiales que no tienen cohesión y por tanto se dificulta la obtención de muestras inalteradas. El presente trabajo tuvo inicio en el momento de conseguir la fuente del material, que pudo encontrarse en la zona al margen derecho de la vía hacia el Edificio I de la Universidad Pontificia Bolivariana, en la quebrada Palmichala.

Una vez obtenido el suelo, se procedió a realizar los ensayos de granulometría para la clasificación del suelo, donde se corroboró que era una arena mal gradada (SP), luego se realizaron los ensayos Proctor Modificado para conocer el valor de la humedad óptima y el peso específico seco máximo.

Finalmente se hicieron ensayos de Corte Directo y Compresión Inconfinada donde se obtuvieron los datos de la resistencia a la compresión y el ángulo de fricción y con base a estos valores, se realizaron algunas tendencias y comparaciones entre los parámetros de resistencia del esfuerzo cortante, conclusiones y observaciones.

PALABRAS CLAVES: Arena, cohesión, fricción, compresión inconfinada, humedad óptima.

GENERAL SUMMARY OF WORK OF DEGREE

TITLE: COMPARISON OF PARAMETERS SHEAR STRENGTH OBTAINED IN DIRECT SHEAR TESTS AND SIMPLE COMPRESSION FOR BAD GRADED SAND IN UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA BUCARAMANGA.

AUTHORS: ALEXANDRA NIÑO WILCHES
ANGGIE CAROLINA PLATA BALETA

FACULTY: CIVIL ENGINEERING

DIRECTOR: GERARDO BAUTISTA GARCIA

ABSTRACT

The sands are poorly graded materials that have no cohesion and therefore difficult to obtain undisturbed samples. This work began in the time of getting the source material that could be found in the right margin of the road to the building I of the Universidad Pontificia Bolivariana in Palmichala ravine.

Once the soil, proceeded to perform granulometry tests for soil classification, where it was confirmed that it was a poorly graded sand (SP), then Modified Proctor tests conducted to determine the optimal value and moisture maximum dry weight.

Finally made test of Shear Direct and Compression Unconfined which yielded data compression strength and the friction angle and based on these values, there were some trends and comparisons between the parameters of shear strength, conclusions and observations.

KEY WORDS: Sand, cohesion, friction, compression unconfined, optimal value.

INTRODUCCIÓN

Los suelos arenosos son materiales que tienen un ángulo de fricción alto, sin embargo no poseen cohesión. Al no tenerla se dificulta tanto la toma de muestras como la ejecución de ensayos sobre testigos inalterados, dado que cuando se colocan las formaletas en el campo al extraerlas el material se pierde, se queda adherido a éstas o se deshace.

Por tal motivo en el presente trabajo se correlacionaran dos parámetros físicos obtenidos en diferentes ensayos como lo son la resistencia a la compresión inconfiada y el ángulo de fricción interna.

El trabajo comenzó con un reconocimiento de campo, en el cual se visitaron posibles fuentes de materiales, escogiéndose las arenas mal gradadas de la quebrada Palmichala.

Una vez definido el material a estudiar y su ubicación, se tomaron muestras para clasificar el suelo y realizar ensayos de compactación. Después de conocer el tipo de suelo, su peso específico seco máximo y su humedad óptima se procedió a realizar los ensayos de corte directo y de compresión inconfiada sobre muestras compactadas con la humedad óptima.

Finalmente se realizó un análisis de resultados, se emitieron unas conclusiones y unas recomendaciones.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Encontrar la relación existente entre el ángulo de fricción interna y la resistencia a la compresión inconfiada en las arenas mal gradadas presentes en la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir el suelo con el cual se va a realizar la tesis y ubicar el sitio donde éste se encuentra.
- Realizar ensayos de clasificación para establecer el nombre del suelo.
- Estimar la humedad óptima y la densidad seca máxima del suelo escogido mediante ensayos de compactación Proctor modificado.
- Realizar ensayos de corte directo sobre muestras compactadas con la humedad óptima con el fin de obtener el ángulo de fricción interna para el suelo escogido.
- Ejecutar los ensayos de compresión simple para hallar la resistencia a la compresión inconfiada del material.
- Obtener la relación entre la resistencia a la compresión inconfiada del suelo y su ángulo de fricción interna.

2. ANTECEDENTES

La Universidad Pontificia Bolivariana junto con cuatro grupos de estudiantes aspirantes a obtener el título de Ingenieros Civiles, realizaron trabajos afines con el tema de estudio donde se relacionan los parámetros de Ángulo de Fricción y Resistencia a la Compresión Inconfinada en diferentes muestras de suelo. A continuación se muestran los trabajos como antecedentes locales.

2.1 RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO Y COMPRESIÓN SIMPLE PARA ARENAS LIMOSAS

Este trabajo fue realizado por Sergio Andrés Quesada Orejarena y Luis Carlos Duran Rueda en el año 2010.

Las relaciones estudiadas fueron:

- Densidad Seca Máxima Vs Humedad.
- Ángulo de Fricción Vs Humedad.
- Cohesión Vs Humedad.
- Ángulo de Fricción Vs Resistencia a la Compresión Inconfinada.
- Cohesión Vs Resistencia a la Compresión Inconfinada.

Los valores obtenidos en estas relaciones, les permitieron adquirir la siguiente ecuación con la cual es posible obtener el valor del Ángulo de Fricción Interna a partir de correlaciones con la Resistencia a la Compresión Inconfinada:

$$Y = 0,9858 X^2 - 22,831 X + 166,42$$

Donde Y corresponde al Ángulo de Fricción y X a la Resistencia a la Compresión Inconfinada.

2.2 CORRELACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA Y CBR TIPO I PARA ARENAS LIMOSAS (SM)

La tesis con el título mencionado, fue realizada en el año 2010 por Paul Andrés Alvarado Salcedo e Iván Darío Muñoz Ayala.

Con la realización de ensayos de Corte Directo y CBR Tipo I con diferentes humedades, se analizaron las siguientes tendencias:

- Ángulo de Fricción Interna Vs Humedad.
- Cohesión Vs Humedad.
- Densidad Seca Vs Humedad.
- CBR Vs Humedad.
- CBR Vs Ángulo de Fricción Interna.

Para el material estudiado, se obtuvo una relación que muestra que los valores de CBR y Ángulo de Fricción Interna son directamente proporcionales y es posible obtener uno de los dos valores con el dato que se conozca con la siguiente ecuación:

$$Y = -0,001 X^3 + 0,319 X + 27,35$$

Donde Y corresponde a los valores del Ángulo de Fricción Interna y X a los valores de CBR.

2.3 RELACIÓN ENTRE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA AL ESFUERZO CORTANTE OBTENIDOS EN LOS ENSAYOS DE CORTE DIRECTO Y COMPRESIÓN SIMPLE PARA ARENAS ARCILLOSAS

Para obtener el título de ingenieros civiles, Alexis Fernando Villamizar Lemos y José Jaime Díaz Gutiérrez, desarrollaron esta tesis en el año 2010 y realizaron 90 ensayos de Corte Directo y 90 de Compresión Inconfinada con diferentes humedades y a partir de los resultados obtenidos en éstos y su comparación, se obtuvieron las siguientes tendencias:

- Ángulo de Fricción Vs Humedad.
- Cohesión Vs Humedad.
- Resistencia a la Compresión Inconfinada Vs Humedad.

- Ángulo de Fricción Vs Resistencia a la Compresión Inconfinada.
- Cohesión Vs Resistencia a la Compresión Inconfinada.

Con los datos que mostraron estas relaciones, se obtuvo la siguiente ecuación:

$$\Phi = -0,525 q_u^2 + 8,893 q_u + 11,46$$

Al conocer el valor de la Resistencia a la Compresión Inconfinada (q_u) por medio del ensayo de compresión inconfinada y reemplazando este valor en la ecuación anterior, se obtiene un valor muy cercano del Ángulo de Fricción Interna (ϕ) para una arena arcillosa.

2.4 CORRELACIÓN DEL ÁNGULO DE FRICCIÓN INTERNA Y CBR TIPO I PARA ARENAS ARCILLOSAS (SC)

Esta tesis fue realizada en el año 2010, sus autores fueron Carlos Andrés Ochoa Osorio y Elkin Yebrail Bonilla Gallo. Se analizaron las siguientes tendencias:

- Ángulo de Fricción Interna Vs Humedad.
- Cohesión Vs Humedad.
- CBR Vs Humedad.
- Cohesión Vs CBR.
- Ángulo de Fricción Interna Vs CBR.

La ecuación que permite obtener los valores de la incognita que se tenga en los ensayos y relaciona el CBR con el Ángulo de Fricción Interna es:

$$Y = -0,041 X^2 + 4,354 X - 69,33$$

Donde Y es el Ángulo de Fricción Interna y X el CBR.

3. METODOLOGÍA

Ya que se han realizado trabajos muy similares en otros tipos de suelo como arenas limosas, arenas arcillosas, arcillas y limos de baja compresibilidad, por consiguiente se quiso implementar una correlación con parámetros de resistencia de un material diferente que no había sido estudiado en etapas previas.

3.1 TOMA DE MUESTRAS DE SUELO

Debido a que no se tiene conocimiento del comportamiento de las arenas sin cohesión, se escogió este material para la realización del estudio.

Existían varias fuentes para adquirir dicha arena, tales como: Rio Chicamocha, Quebrada Mensulí, Quebrada Palmichala; debido a que en las quebradas es donde se encuentra material arenoso y contiene pocos finos, pero se decidió realizar el sondeo en la zona a la margen derecha de la quebrada Palmichala por su facilidad de traslado a las instalaciones del laboratorio de la Universidad Pontificia Bolivariana.

Una vez recopilada la información de trabajos anteriores, se procedió a sacar el material de la quebrada (Anexo A) e introducirlo en costales, llevarlo al laboratorio atravesando las zonas comunes de la universidad con carretillas cargadas de la arena y dejarlo reposar.

3.2 REALIZACIÓN DE ENSAYOS

Luego de tener el material en el laboratorio, se realizó el cuarteo (Anexo A) para secarlo y seleccionar una cantidad representativa, se pasó por el tamiz No. 4 para sacar el material granular grande, se tomaron muestras y se realizaron los ensayos de granulometría por tamizado con lavado por la malla No 200, compactación, corte directo y compresión inconfinaada.

3.3.1 Granulometría. Se hicieron tres (3) ensayos con el fin de cerciorarse de los resultados, comparando los obtenidos en la primera muestra con los de la segunda y la tercera. Se busca en este ensayo conocer las características del material, clasificarlo e identificarlo.

La arena fue lavada y pasada por el tamiz No. 200, luego pesada la cantidad que era retenida en cada tamiz para poder construir la curva granulométrica. Se siguió el procedimiento de la Norma Invías ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO I.N.V. E – 123 – 07 (Anexo B).

3.3.2 Compactación Proctor Modificado. El objetivo principal de realizar este ensayo es el hallar el valor de la humedad óptima y el peso específico máximo. Se realizó un ensayo y para verificar si el valor obtenido en éste era el indicado, se procedió a hacer dos ensayos más; en total fueron (3) ensayos de Proctor Modificado.

Antes de empezar el ensayo, el material se extendió en una bandeja y se secó al aire. Luego se procedió a hacer una compactación con una humedad baja y se fue aumentando ésta entre punto y punto de 3 a 4 %. Después de adicionar el agua necesaria y desarrollar el ensayo teniendo en cuenta la Norma Invías RELACIONES DE HUMEDAD - MASA UNITARIA SECA EN LOS SUELOS I.N.V. E – 142 – 07 (Anexo C); se obtuvo la humedad óptima con la cual se compactaron las muestras para realizar los ensayos de corte directo y compresión inconfiada.

3.3.3 Corte Directo Normal. Se llevaron a cabo treinta (30) ensayos. Con la humedad óptima ya obtenida, se realizaron las compactaciones Proctor Modificado con su máquina correspondiente (Anexo A, Ilustración 14) para tener los moldes en los que se hincaron las formaletas. Luego de esto se procedió a fallar las muestras. Cada ensayo se realizó con tres (3) puntos con esfuerzos normales de 0.5, 1, 2 Kg/cm². Los ensayos de Corte directo fueron hechos con base a la Norma Invías DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE, MÉTODO DE CORTE DIRECTO (CD), CONSOLIDADO DRENADO I.N.V. E – 154 – 07 (Anexo D).

Con los datos obtenidos se dibujó la envolvente de falla y de ella se obtuvieron los parámetros de resistencia C y Φ .

3.3.4 Compresión Inconfiada. Se realizaron treinta (30) ensayos en los cuales el resultado de cada uno, consta del promedio de dos ensayos de compresión inconfiada.

Conocida la humedad óptima, se hicieron las compactaciones Proctor Modificado, algunas manualmente (Anexo A), las demás con la máquina de compactación para tener los moldes donde se introdujeron los tubos de pared gruesa. Las muestras eran sacadas en buenas condiciones gracias al extractor con gato hidráulico (Anexo A). Ya obtenidos los especímenes a fallar, se tomaron sus medidas y pesos y se dió inicio al ensayo de compresión inconfínada donde se le aplicó una carga axial y se tomaron datos de su deformación. Se siguió el procedimiento de la Norma Invías COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS I.N.V. E – 152 – 07 (Ver Anexo E).

3.3 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de terminados los ensayos y obtenidos los valores del Ángulo de Fricción Interna y la Resistencia a la Compresión Inconfínada, se procedió a sacar el promedio de las mismas con su coeficiente de variación correspondiente.

Se relacionaron los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante y con esto se hizo un análisis de resultados y se establecieron unas conclusiones y recomendaciones.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (S.U.C.S)

Arthur Casagrande, propone esta clasificación y nombra cada material con un símbolo de grupo que indica el tipo de suelo, como se muestra en la Tabla 2.

DIVISIÓN PRINCIPAL		SÍMBOLO DEL GRUPO	NOMBRES TÍPICOS	CRITERIO DE CLASIFICACIÓN		
SUELOS DE GRANOS GRUESOS 50% o más es retenido en el tamiz No. 200	GRAVAS 50% o más de la fracción gruesa es retenida en el tamiz No.4	GRAVAS LIMPIAS	GW	Gravas bien gradadas y mezclas de arena y grava con pocos o sin finos.	$C_U = D_{60}/D_{10}$ $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ Mayor que 4. Entre 1 y 3.	
			GP	Gravas y mezcla de gravas y arenas mal gradadas con pocos o sin finos.		
		GRAVAS CON FINOS	GM	Gravas limosas, mezclas de grava-arena y limo.	Si los criterios para GW no se cumplen. Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4. Límites de Atterberg sobre la línea "A" e índice de plasticidad inferior a 7.	Si los límites de Atterberg se localizan en el área sombreada en el área sombreada utilizando símbolos dobles.
			GC	Gravas arcillosas, mezclas de grava-arena y arcilla.		
	ARENAS Mas del 50% de la fracción gruesa pasa por el tamiz No.5	ARENAS LIMPIAS	SW	Arenas y arenas gravosas bien gradadas con pocos o sin finos.	$C_U = D_{60}/D_{10}$ $C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$ Superior a 6. Entre 1 y 3.	
			SP	Arenas y arenas gravosas mal gradadas con pocos o sin finos.		
		ARENAS CON FINOS	SM	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.	Si no se cumplen los criterios para SW. Límites de Atterberg localizados bajo la línea "A" o índice de plasticidad inferior a 4. Límites de Atterberg sobre la línea "A" e índice de plasticidad inferior a 7.	Para los límites de Atterberg localizados en el área sombreada se debe clasificar utilizando símbolos dobles.
			SC	Arenas arcillosas, mezclas de arena y arcilla.		
SUELOS DE GRANOS FINOS 50% o más pasa por el tamiz No. 200.	LIMOS Y ARCILLAS Limite líquido de 50% o inferior.	ML	Limos inorgánicos, arenas muy finas, polvo de roca, arenas finas limosas o arcillosas.	CARTA DE PLASTICIDAD Clasificación para suelos de grano fino y suelos de grano grueso con fracciones de grano fino. 		
		CL	Arcillas inorgánicas de plasticidad baja a media, arcillas gravosas, arcillas arenosas, arcillas limosas, suelos sin mucha arcilla.			
		OL	Limos orgánicos y arcillas limosas orgánicas de baja plasticidad.			
	LIMOS Y ARCILLAS Limite líquido superior a 50%.	MH	Limos inorgánicos, arenas finas o limos micáceos o de diatomeas limos elásticos.			
		CH	Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, arcillas grasas.			
		OH	Arcillas orgánicas de plasticidad alta o media.			
	Suelos altamente orgánicos.		PT		Turba, estiércol y otros suelos altamente orgánicos.	

Fuentes: Mecánica de suelos y cimentaciones. Carlos Crespo Villalaz. Carta de plasticidad (Norma ASTM, 2003).

Tabla 1. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.

4.2 ARENAS MAL GRADADAS (SP)¹

Son materiales gruesos (más del 50% en peso de una muestra representativa, no pasa por el tamiz No. 200) que se caracterizan por que más del 50% de su fracción gruesa no pasa por la malla No. 4. Además tienen un contenido de finos (inferior al 5%) y no cumplen con al menos una de las dos condiciones de gradación.

Para la clasificación de los suelos se utilizan dos sistemas los cuales son: el sistema unificado de clasificación y el sistema de clasificación AASTHO.

Condiciones de gradación.

$$C_u = D_{60} / D_{10} \qquad \text{Mayor que 6}$$

$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \cdot D_{60}) \qquad \text{Entre 1 y 3}$$

4.3 ENSAYO DE CORTE DIRECTO²

4.3.1 Principios generales

El ensayo de Corte Directo provoca la ocurrencia de una falla mediante un plano de localización sobre el cual actúan dos esfuerzos, uno normal (Ecuación 1) debido a la carga vertical P_v y otro cortante (Ecuación 2) debido a la carga horizontal P_h , que son calculados de la siguiente forma:

$$\tau = \frac{P_v}{A} \qquad \text{(Ecuación 1)}$$

$$\sigma_n = \frac{P_h}{A} \qquad \text{(Ecuación 2)}$$

¹ BERRY, Peter L. y REID, David. 1993. Mecánica de suelos. Santafé de Bogotá, Colombia. Editora: Martha Edma Suarez R. 42 p.

² BOWLES, Joseph E. 1980. Manual de laboratorio de suelos en Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia. Editorial: McGRAW-HILL LATINOAMERICANA, S.A. 175 – 178 p.

Donde A es el área nominal de la muestra.

Estos esfuerzos deberían satisfacer la siguiente ecuación de Coulomb:

$$T = c + \sigma_n \cdot \tan \varphi \quad (\text{Ecuación 3})$$

En caso de que el suelo sea no cohesivo, la Ecuación 3 se convierte en:

$$T = \sigma_n \cdot \tan \varphi \quad (\text{Ecuación 4})$$

Sin embargo los errores del ensayo y la fuerza de tensión superficial ejercida por los materiales húmedos no cohesivos, originan un valor de cohesión (aparente) que debe ser despreciado siempre y cuando no sea más de 10 a 15 kPa; de lo contrario debe investigarse la razón por la cual se obtuvo dicha cohesión.

Una de las máquinas utilizadas para el ensayo de Corte Directo, es la manual, su ilustración se muestra a continuación.



Ilustración 1. Máquina manual para Corte Directo.

El ensayo de corte directo en el principio de su utilización fue muy usado y popular, pero a medida que avanza el estado del arte, se han perdido estas características por las siguientes razones:

- El área de cada muestra cambia en el proceso del ensayo, no siendo esto tan significativo debido a que su falla se realiza a deformaciones muy bajas.
- Se supuso en este ensayo que la superficie de falla real es un plano y que el esfuerzo cortante de su superficie tiene una distribución uniforme; y esto es lo que se pretendió obtener con la caja de corte diseñada.
- La muestra usada en éste ensayo es muy pequeña, por tanto los errores en la preparación son relativamente importantes.
- Debido al tamaño de las muestras, no es posible investigar la presión de poros en el ensayo.
- No se pueden obtener los valores del Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson.
- Se utilizó luego el aparato de éste ensayo para realizar el de triaxial.

Sin embargo, estas razones han ido perfeccionándose y hoy en día se ha empezado a recuperar su popularidad inicial.

4.3.2 Clasificación

Los ensayos de corte directo pueden clasificarse en:

4.3.2.1 Ensayo no consolidado, no drenado o ensayo u. En este ensayo, el corte empieza a realizarse antes de consolidar la muestra bajo la carga normal P_v . Si la muestra de suelo es cohesiva y saturada, se evidenciará el exceso de presión de poros.

4.3.2.2 Ensayo consolidado drenado. En este ensayo se aplica la fuerza normal, observando en el deformímetro el momento en que pare el asentamiento antes de aplicar la fuerza cortante.

4.3.2.3 Ensayo consolidado no drenado. En este ensayo la fuerza normal es aplicada y la aplicación del corte es demorada hasta que el asentamiento este completamente desarrollado; la fuerza cortante es aplicada tan lento como sea posible para evitar presiones de poros en la muestra.

Para suelos no cohesivos, el resultado de estos tres ensayos es igual, pero para materiales cohesivos, los parámetros del suelo están demarcados de acuerdo con el método de ensayo utilizado y el grado de saturación.

4.4 ENSAYO DE COMPRESIÓN INCONFINADA³

4.4.1 Principios generales

La primera vez que se implementó el método de ensayar muestras del suelo cohesivo sacadas con tubos del campo en Compresión Simple, hubo una aceptación favorable, ya que era una buena forma de determinar la resistencia al corte de un suelo.

Cuando se conoció más el comportamiento del suelo, empezaron a salir a flote las razones por la cuales el ensayo de compresión confinada no era confiable, y entre ellas las siguientes:

- La restricción lateral de la masa del suelo sobre la muestra se pierde cuando ésta se saca del terreno. La humedad del suelo suministra una tensión superficial y por tanto la muestra resulta estar un poco confinada.
- No puede existir un control en las condiciones internas del suelo.
- Los esfuerzos internos son alterados por las placas de carga que originan una restricción lateral sobre los extremos de la muestra.

Los errores producidos por los dos primeros factores mostrados anteriormente, pueden eliminarse o al menos reducirse utilizando experimentos triaxiales y con respecto al tercer factor, no es considerado de mucha importancia.

³ BOWLES, Joseph E. 1980. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial: McGRAW-HILL LATINOAMERICANA, S.A. 133 – 136 p.

Una de las máquinas utilizadas para la realización del ensayo de Compresión Inconfinada es la siguiente:

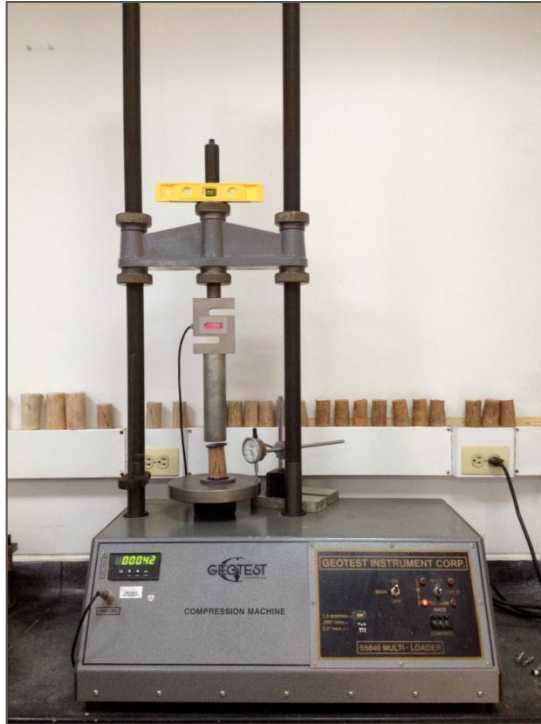


Ilustración 2. Máquina para Compresión Inconfinada.

4.4.2 Formas de realización del ensayo

El ensayo de Compresión Inconfinada es ampliamente utilizado debido a que a través de él, se pueden obtener los resultados aproximados y razonablemente confiables de la resistencia al corte de un suelo cohesivo. Este ensayo puede hacerse de dos formas:

4.4.2.1 Experimento de Compresión Inconfinada con control de deformación unitaria. Es universalmente utilizado y su funcionamiento está asociado con acoplar una relación de engranaje a un motor y vigilar la velocidad de la plataforma de carga. Según estudios realizados, se ha comprobado que el ensayo es sensible a la tasa de deformación unitaria. Debido a que las muestras están expuestas al aire seco del laboratorio, deberían fallarse antes de 10 minutos para no afectar los resultados de la resistencia a la compresión inconfinada.

4.4.2.2 Experimento de Compresión Inconfinada con control de esfuerzo. Necesita cambios cuando se aumenta la carga y da un resultado errado en deformaciones unitarias y/o la resistencia última; por tal razón, este experimento es raramente utilizado.

4.5 PARÁMETROS DE CORTE DIRECTO Y COMPRESIÓN INCONFINADA

El corte directo consiste en establecer la resistencia de una muestra de suelo habitualmente de tres o más especímenes, dichos especímenes serán expuestos a deformaciones cuando se le aplique una carga dada.

Para hallar la resistencia en el laboratorio se usa el aparato de corte directo que se muestra en la ilustración 3, con una caja cuadrada dividida horizontalmente en dos mitades dentro de ellas se coloca una muestra de suelo con piedras porosas en ambos extremos y se le aplica una carga vertical de confinamiento (P_v) y luego una carga horizontal (P_h) creciente que origina el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte de la muestra.

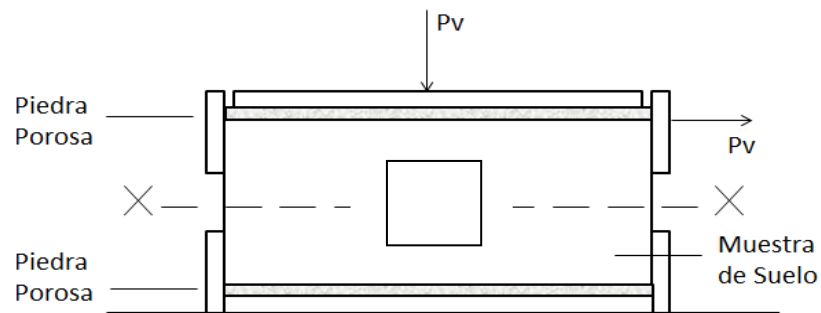


Ilustración 3. Aplicación de cargas en Corte Directo.

Para la determinación de la resistencia al corte directo se toma habitualmente tres o más especímenes, cada uno con una diferente carga normal para establecer su resistencia. Este se lleva preliminarmente a un proceso de consolidación suministrándole un drenaje cada vez que se lleva a cabo el ensayo, posteriormente se va deformando la muestra a velocidad que se requiera.⁴

⁴ Escuela de Ingeniería en Construcción. "Ensayo Corte Directo". {En línea}. {Consultado el 23 de abril de 2012}. Disponible en: http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/cortedirecto.pdf

Una vez se obtiene el esfuerzo cortante máximo para cada una de las tres muestras usadas, se dibuja la envolvente de falla, cuya pendiente corresponde al ángulo de fricción interna.

La compresión inconfiada o también llamada compresión simple consiste en aplicar una carga axial a la muestra de suelo escogida deformándola previamente por un tiempo determinado hasta que esta falle o previamente la carga que se está tomando comience a descender, Para que la humedad óptima no se altere el ensayo se debe hacer lo más pronto posible. Posteriormente se realiza la grafica carga (q_u) vs deformación (δ).⁵

La cohesión no drenada corresponde a la mitad de la resistencia a la compresión simple y el ángulo formado por la superficie principal de falla con la horizontal, normalmente es de $45 + f/2$, donde f corresponde al ángulo de fricción interna (teoría de falla de Mohr – Coulomb).

⁵ POLANCO DE HURTADO, Margarita. Mecánica de suelos. Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, Colombia. 235 – 236 p.

5. RESULTADOS OBTENIDOS

Después de ser realizados los ensayos, se procesó y tabuló la información. A continuación se muestran los resultados que se obtuvieron.

5.1 CLASIFICACIÓN

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de clasificación, no se realizaron ensayos de límites de plasticidad dado que el porcentaje de finos fue inferior al 5%.

MUESTRA 1		
% Gravas	5.23	%
% Arenas	90.23	%
% Finos	4.54	%
D ₆₀	0.68	mm
D ₃₀	0.38	mm
D ₁₀	0.18	mm
Cu	3.7778	
Cc	1.1797	
Sistema Unificado	Arena Mal Gradada (SP)	

Tabla 2. Resultados de Granulometría, muestra 1.

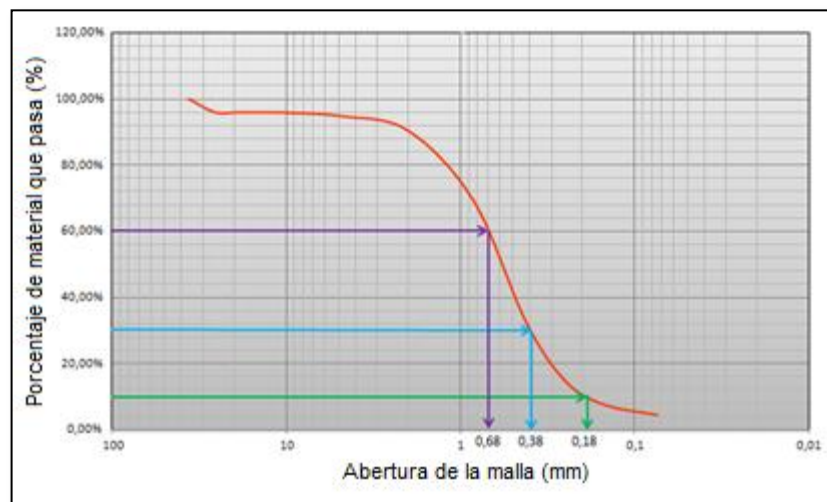


Ilustración 4. Granulometría, muestra 1.

En los resultados mostrados en la Tabla 2, se puede observar que el porcentaje de finos es de 4,54% y como es inferior al 5%, puede considerarse a partir del Sistema Unificado de Clasificación de Suelos que se trata de una arena.

La Ilustración 4, grafica en el eje de las X, los valores de la abertura en mm de las mallas y en el de las Y, el porcentaje de material que pasa por cada tamiz. Al conocer el comportamiento de la gráfica, se pueden obtener de ésta los valores del tamaño máximo de las partículas que constituyen la porción del 60%, el 30% y el 10% más fino del suelo, denominados respectivamente: D_{60} , D_{30} y D_{10} .

Con estos parámetros se calcularon el coeficiente de uniformidad (Cu) de 3,7778 y el coeficiente de curvatura (Cc) de 1,1797. Este resultado indica que la arena es mal gradada (SP) ya que no cumple con una de las condiciones de gradación donde Cu debe ser superior a 6 y Cc debe estar entre 1 y 3.

MUESTRA 2		
% Gravas	1.23	%
% Arenas	94.53	%
% Finos	4.24	%
D_{60}	0.7	mm
D_{30}	0,39	mm
D_{10}	0.2	mm
Cu	3.5000	
Cc	1.0864	
Sistema Unificado	Arena Mal Gradada (SP)	

Tabla 3. Resultados de Granulometría, muestra 2.

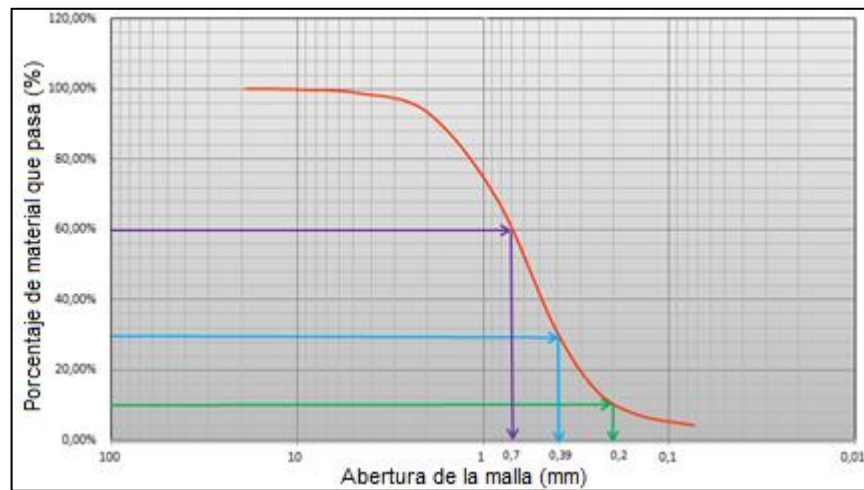


Ilustración 5. Granulometría, muestra 2.

En la Tabla 3 pueden observarse valores no tan lejanos de los obtenidos en la Tabla 2 como es de esperarse. Debido a su porcentaje de grava y finos, se considera una arena con pocos o sin finos. El coeficiente de uniformidad de 3,5 y el coeficiente de curvatura de 1,0864 muestran nuevamente que el material es mal gradado (SP).

MUESTRA 3		
% Gravas	1,20	%
% Arenas	94,25	%
% Finos	4,56	%
D ₆₀	0.65	mm
D ₃₀	0.38	mm
D ₁₀	0.19	mm
Cu	3.4211	
Cc	1.1692	
Sistema Unificado	Arena Mal Gradada (SP)	

Tabla 4. Resultados de Granulometría, muestra 3.

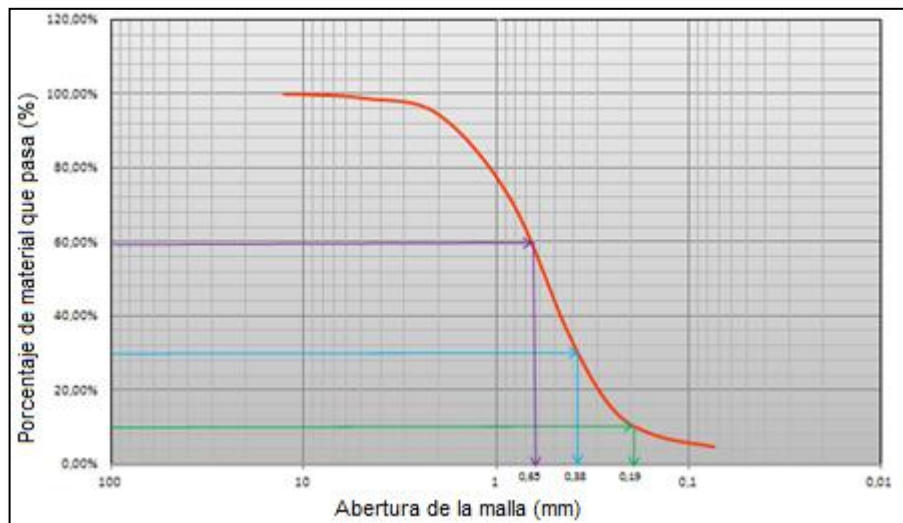


Ilustración 6. Granulometría, muestra 3.

Para la verificación de la clasificación del material, se realizó la granulometría a una tercera muestra, la cual arrojó resultados de porcentajes de finos del 4,56% y valores de coeficiente de uniformidad de 3,4211 y coeficiente de curvatura de 1,1692, que confirman que el suelo es una arena mal gradada (SP).

Promedio de los resultados obtenidos de las muestras 1, 2 y 3.

De acuerdo con los datos obtenidos en las tablas 2, 3 y 4, se puede tener certeza de que el material se trata de una arena mal gradada (SP). En la Tabla 5 se realizaron los promedios de los datos obtenidos de las muestras 1, 2 y 3 con el fin de confirmar el resultado de la clasificación del material. En la Ilustración 7, puede observarse que los resultados son muy similares para las 3 muestras.

	% Gravas	% Arenas	% Finos	D ₆₀	D ₃₀	D ₁₀	Cu	Cc
Muestra 1	5,23	90,23	4,54	0,68	0,38	0,18	3,7778	1,1797
Muestra 2	1,23	94,53	4,24	0,7	0,39	0,2	3,5000	1,0864
Muestra 3	1,2	94,25	4,56	0,65	0,38	0,19	3,4211	1,1692
Promedio	2,553	93,003	4,447	0,675	0,397	0,167	3,566	1,145

Tabla 5. Promedio de los resultados de Granulometría de las muestras.

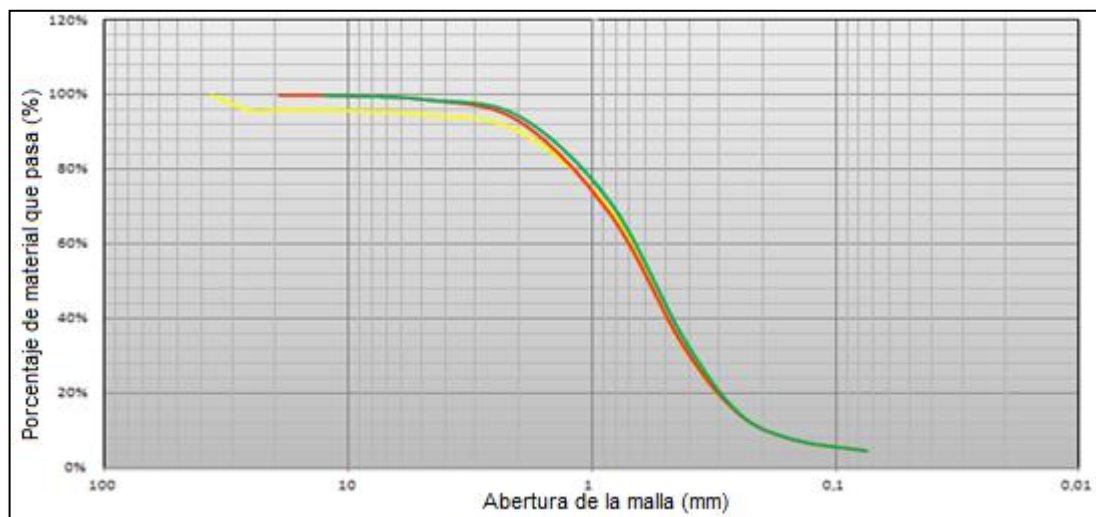


Ilustración 7. Curvas de granulometría de las tres muestras.

5.2 COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO

Una vez clasificado el suelo se procedió a determinar la humedad óptima y la humedad seca máxima por medio de los ensayo de Proctor Modificado, se usaron tres muestras obteniendo los siguientes resultados.

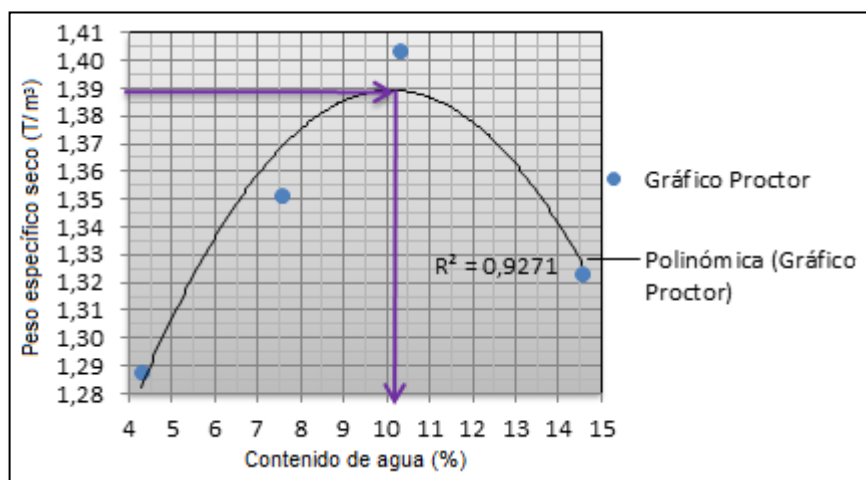


Ilustración 8. Compactación Proctor Modificado, muestra 1.

En la Ilustración 8, se grafican los datos de los resultados obtenidos en el ensayo de compactación Proctor Modificado de la muestra 1, donde se analiza en el eje X, el contenido de agua en porcentaje y en el eje Y, el peso específico seco en T/m^3). La muestra 1 arrojó resultados de humedad óptima de 10,2% y peso específico seco máximo 1,388 T/m^3 .

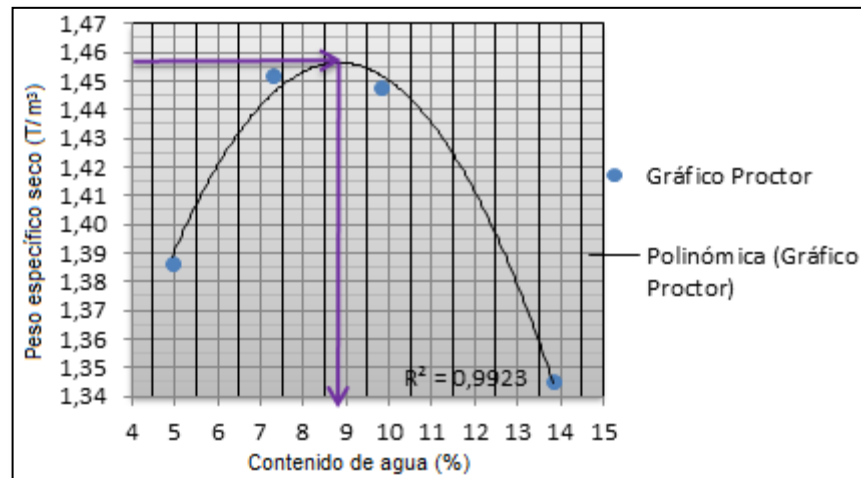


Ilustración 9. Compactación Proctor Modificado, muestra 2.

En la Ilustración 9, de la curva de compactación Proctor Modificado, se extraen los valores del punto máximo de la curva que se refiere a la humedad óptima de 8,8 %, y la localización de este punto con respecto al eje Y, que significa el peso específico seco máximo y es de 1,456 T/m^3 . Los datos utilizados para la realización de la gráfica, son los obtenidos mediante el ensayo y la tabulación de sus resultados.

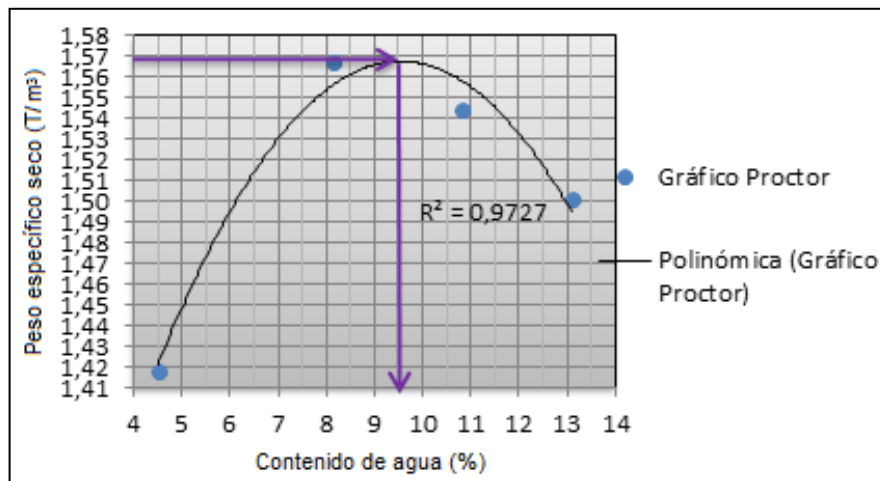


Ilustración 10. Compactación de Proctor Modificado, muestra 3.

La humedad óptima de esta muestra es de 9,5% y su peso específico es de 1,568 T/m³.

Promedio de Humedad Óptima de las muestras

Con base a los resultados obtenidos en las Ilustraciones 8, 9 y 10, se llevó a cabo un promedio para obtener la humedad óptima y poder realizar los ensayos de corte directo y compresión simple con este valor.

Muestra No.	Humedad Óptima	Peso Específico Seco Máximo (T/m ³)
1	10,20%	1,388
2	8,80%	1,456
3	9,50%	1,568
Promedio	9,50%	1,471
Desviación	0,7	0,7
Coef. de Variación	7,368%	0,476%

Tabla 6. Promedio de los resultados de Proctor Modificado.

De la Tabla 6, puede concluirse que la humedad óptima es de 9,5 %. El coeficiente de variación fue de 7,368, esto muestra que es posible utilizar el promedio hallado para la realización de los ensayos siguientes.

5.2 CORTE DIRECTO

Se realizaron 30 ensayos de corte directo, se utilizaron niveles de esfuerzo 0.5, 1, 2 Kg/cm². Los resultados fueron los siguientes:

Muestra No.	ϕ (°)	Densidad Seca (gr /cm ³)	Densidad Húmeda (gr /cm ³)	Humedad (%)
1	39,489	1,694	1,859	9,747
2	39,304	1,748	1,916	9,586
3	40,010	1,790	1,964	9,680
4	40,461	1,663	1,821	9,475
5	40,560	1,736	1,899	9,387
6	39,492	1,796	1,966	9,493
7	40,017	1,801	1,972	9,524
8	39,211	1,753	1,918	9,425
9	39,815	1,742	1,907	9,458
10	39,485	1,781	1,949	9,410
11	40,017	1,724	1,887	9,427
12	39,594	1,686	1,845	9,458
13	39,594	1,735	1,903	9,673
14	39,324	1,788	1,958	9,512
15	39,430	1,750	1,919	9,638
16	41,704	1,732	1,900	9,671
17	39,733	1,688	1,848	9,453
18	40,458	1,685	1,848	9,675
19	38,600	1,703	1,865	9,489
20	39,499	1,629	1,782	9,385
21	37,879	1,768	1,937	9,577
22	39,007	1,677	1,832	9,229
23	38,189	1,788	1,957	9,445
24	38,688	1,813	1,984	9,423
25	38,625	1,803	1,972	9,373
26	39,201	1,771	1,937	9,402
27	38,428	1,689	1,850	9,521
28	39,386	1,701	1,865	9,646
29	38,945	1,703	1,865	9,501
30	39,727	1,705	1,865	9,347
PROMEDIO	39,462	1,735	1,900	9,501
DESVIACION	0,773	0,048	0,053	0,120
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	1,959%	2,781%	2,786%	1,268%

Tabla 7. Resultados de los ensayos de Corte Directo.

En la Tabla 7, se observó que el promedio del Ángulo de Fricción para las 30 muestras fue de 39,462°. Este valor obtenido es propio de arenas con pocos finos o sin ellos. El coeficiente de variación con un valor de 1,959 % muestra que los datos ofrecidos por cada ensayo fueron bastante parecidos y por tanto es bueno el resultado en el ensayo de corte directo.

5.3 COMPRESIÓN INCONFINADA

Se realizaron 60 ensayos de compresión inconfiada obteniendo los siguientes resultados:

Muestra No.	q_u (kg/cm ²)	θ (°)	ϕ (°)	Densidad Seca (gr /cm ³)	Densidad Húmeda (gr /cm ³)	Humedad Antes (%)	Humedad Después (%)
1	0,477	65	40	1,562	1,714	9,694	9,434
2	0,473	67	44	1,554	1,705	9,694	9,434
3	0,331	65	40	1,548	1,698	9,658	9,509
4	0,329	66	42	1,541	1,693	9,885	9,630
5	0,463	74	58	1,731	1,899	9,711	9,483
6	0,327	65	40	1,529	1,675	9,615	9,574
7	0,331	74	58	1,548	1,699	9,799	9,333
8	0,242	72	54	1,561	1,713	9,745	9,350
9	0,384	62	34	1,527	1,675	9,677	9,314
10	0,328	65	40	1,497	1,643	9,756	9,225
11	0,385	71	52	1,477	1,619	9,615	9,598
12	0,517	75	60	1,525	1,673	9,695	9,402
13	0,233	65	40	1,458	1,600	9,735	9,486
14	0,377	60	30	1,857	2,031	9,388	9,388
15	0,371	59	28	1,851	2,032	9,791	9,428
16	0,462	63	36	1,393	1,529	9,756	9,504
17	0,553	64	38	1,476	1,620	9,756	9,551
18	0,466	70	50	1,456	1,594	9,450	9,450
19	0,375	62	34	1,484	1,627	9,633	9,339
20	0,332	60	30	1,597	1,755	9,846	9,603
21	0,287	60	30	1,560	1,710	9,600	9,489
22	0,280	65	40	1,511	1,660	9,836	9,449
23	0,291	62	34	1,591	1,747	9,804	9,561
24	0,283	60	30	1,564	1,716	9,653	9,366
25	0,240	65	40	1,561	1,716	9,890	9,394

26	0,238	75	60	1,551	1,702	9,771	9,482
27	0,282	65	40	1,510	1,659	9,901	9,480
28	0,292	64	38	1,560	1,714	9,871	9,487
29	0,279	65	40	1,529	1,681	9,934	9,211
30	0,283	65	40	1,463	1,607	9,882	9,402
31	0,284	63	36	1,520	1,669	9,788	9,485
32	0,283	62	34	1,499	1,646	9,748	9,296
33	0,279	65	40	1,482	1,628	9,884	9,444
34	0,288	60	30	1,527	1,676	9,783	9,330
35	0,281	68	46	1,553	1,705	9,792	9,419
36	0,278	60	30	1,452	1,589	9,467	9,281
37	0,290	70	50	1,529	1,677	9,669	9,324
38	0,284	65	40	1,543	1,693	9,712	9,502
39	0,281	67	44	1,496	1,645	9,915	9,677
40	0,278	70	50	1,442	1,581	9,668	9,497
41	0,278	62	34	1,506	1,656	9,963	9,663
42	0,283	65	40	1,488	1,635	9,851	9,524
43	0,282	62	34	1,527	1,677	9,863	9,395
44	0,281	65	40	1,517	1,664	9,706	9,368
45	0,280	65	40	1,502	1,650	9,854	9,572
46	0,278	60	30	1,479	1,622	9,646	9,510
47	0,276	68	46	1,517	1,667	9,884	9,497
48	0,282	62	34	1,458	1,603	9,973	9,375
49	0,328	60	30	1,538	1,690	9,865	9,444
50	0,470	62	34	1,622	1,780	9,712	9,465
51	0,506	74	58	1,459	1,598	9,524	9,302
52	0,289	65	40	1,479	1,621	9,579	9,420
53	0,289	67	44	1,558	1,708	9,630	9,493
54	0,376	63	36	1,469	1,611	9,643	9,497
55	0,278	72	54	1,442	1,581	9,668	9,333
56	0,431	65	40	1,528	1,676	9,677	9,496
57	0,372	71	52	1,457	1,598	9,698	9,476
58	0,371	70	50	1,480	1,623	9,689	9,474
59	0,284	65	40	1,484	1,628	9,744	9,499
60	0,471	64	38	1,525	1,672	9,642	9,366
PROMEDIO	0,334	65,450	40,900	1,527	1,676	9,738	9,446
DESVIACION	0,080	4,228	8,457	0,080	0,088	0,125	0,100
COEFICIENTE DE VARIACIÓN	23,981%	6,460%	20,676%	5,243%	5,230%	1,286%	1,060%

Tabla 8. Resultados de los ensayos de Compresión Inconfinada.

El valor promedio de la Resistencia a la Compresión Inconfinada fue de 0,334 kg/cm² y se obtuvo para éste un coeficiente de variación de 23,981 %, lo cual nos indica que los resultados fueron aceptables; este valor se podría deber a que por tratarse de una muestra arenosa sin cohesión, las muestras fallaban rápidamente bajo una carga axial pequeña que no en todas las oportunidades coincidía.

Θ corresponde al ángulo formado entre la superficie de falla y el plano sobre el cual actúa el esfuerzo principal mayor, que correspondió a la Resistencia a la Compresión Inconfinada. Este ángulo se midió con transportador en cada una de las muestras falladas.

El valor del Ángulo de Fricción Interna ϕ estimado en el ensayo de compresión inconfinada se obtuvo según la ley de falla de Mohr - Coulomb de la siguiente manera: $\Theta = 45 + \phi/2$.

Como en los ensayos se midió el ángulo Θ , el ángulo ϕ se obtuvo simplemente despejándolo de la ecuación mencionada.

6. ANALISIS DE RESULTADOS

- **Relación entre Φ y q_u .** Tal como se puede apreciar en los resultados obtenidos en los ensayos de corte directo y compresión simple para la arena estudiada, el ángulo de fricción promedio fue de 39.46° y la resistencia a la compresión inconfiada fue de 0.334 Kg/cm^2 , por lo tanto la relación entre estos dos parámetros es la que se va a obtener a continuación.

$$\Phi = K * q_u$$

$$K = \Phi / q_u$$

$$K_{\Phi/q_u} = 39.46 (^\circ) / 0.334 (\text{Kg/cm}^2)$$

$$\underline{K_{\Phi/q_u} = 118.15 \text{ }^\circ\text{cm}^2/\text{Kg}}$$

El resultado obtenido de esta constante K_{Φ/q_u} permite hallar el valor del ángulo de fricción interna de una arena mal gradada (SP) conociendo su Resistencia a la Compresión Inconfiada.

El tener este parámetro k es muy importante, ya que nos permitiría tener un valor aproximado del Ángulo de Fricción Interna solamente con realizar el ensayo de compresión inconfiada, ya que es muy difícil recuperar muestras inalteradas para dicho ensayo en materiales granulares sin cohesión.

- **Relación entre los valores de Φ obtenidos en los ensayos de corte directo y compresión inconfiada.** Una vez obtenidos, el ángulo de fricción interna en el ensayo de corte directo y por medio de la ley de falla de Mohr – Coulomb a partir del ángulo formado por la superficie de falla con el plano horizontal en el ensayo de compresión inconfiada; se relacionan de la siguiente forma:

$$\Phi_{CD} = 39,46 \text{ }^\circ \text{ del ensayo de corte directo}$$

$$\Phi_{CI} = 40,9 \text{ }^\circ \text{ del ensayo de compresión inconfiada}$$

$$\Phi_{CI} / \Phi_{CD} = 40,9 \text{ } ^\circ / 39.46^\circ$$

$$\Phi_{CI} / \Phi_{CD} = 1.04$$

Esto quiere decir que el Ángulo de Fricción Interna hallado por medio del ensayo de Compresión Inconfinada es 1.04 veces el hallado con el ensayo de Corte directo y en su defecto, se puede obtener una aproximación del comportamiento del Ángulo de Fricción Interna para el ensayo de Compresión Inconfinada, teniendo conocimiento del mismo ángulo obtenido en el ensayo de Corte Directo. Cabe resaltar que esta relación es válida únicamente para Arenas Mal Gradadas (SP).

- Una vez realizados los 30 ensayos de corte directo se puede observar que el ángulo de fricción promedio fue de 39.46° , el peso específico seco máximo fue de 1.73 g/cm^3 , la densidad húmeda promedio fue de 1.90 g/cm^3 y la humedad de compactación en promedio fue de 9.5% que corresponde a la óptima promedio. El valor obtenido de ϕ es propio de suelos granulares sin cohesión si mismo estos materiales tienen una humedad óptima por debajo del 10% .
- Al realizar los 30 ensayos de compresión inconfinada se observó que la resistencia a la compresión inconfinada fue de 0.334 Kg/cm^2 , el peso específico seco fue de 1.53 Kg/cm^3 , la densidad húmeda fue de 1.67 g/cm^3 , la humedad inicial fue de 9.74% y la humedad final fue de 9.44% . el valor de q_u obtenido es muy bajo, propio de arenas sin cohesión ya que como el ensayo no es confinado y no existe una liga entre partículas, la muestra falla rápidamente bajo una carga axial pequeña.
- Se observó en los ensayos de compresión inconfinada que la humedad final siempre era inferior a la humedad inicial, esto debido al drenaje dado durante el ensayo mismo gracias a la alta permeabilidad del material usado.

7. CONCLUSIONES

- Al principio del estudio, las probabilidades de que el suelo pudiera ser manejado satisfactoriamente para los ensayos a realizar, eran pocas, ya que la mayoría de personas a las cuales se consultó no creían posible la obtención de muestras inalteradas de arenas sin cohesión.
- Para la obtención de los especímenes en el ensayo de compresión simple tuvo que hacer varias pruebas con diferentes moldes (cuchara partida y tomamuestras de pared gruesa) de los cuales era difícil la extracción de la muestra completa. Finalmente se decidió realizar la toma de las muestras de dicho ensayo con el tubo de pared gruesa ya que con él, el número de muestras recuperadas satisfactoriamente era mayor.
- Debido a la alta permeabilidad de las arenas es recomendable realizar los ensayos de Corte Directo y Compresión Inconfinada inmediatamente se toman las muestras ya que si se deja pasar cierto tiempo la muestra empieza rápidamente a perder humedad.
- Después de buscar posibles fuentes de materiales se escogió la quebrada Palmichala en la zona al margen derecho de la vía hacia el Edificio I de la Universidad Pontificia Bolivariana, para tomar las muestras de arenas mal gradadas.
- Una vez seleccionado el material se realizaron los ensayos de clasificación y se obtuvo que este correspondía a una arena mal gradada (SP). Se trataron de realizar los ensayos de límite líquido y límite plástico, pero dado que las arenas mal gradadas no poseen cohesión, estos no se pudieron llevar a cabo ya que en el ensayo de límite líquido la ranura se cerraba para cualquier humedad con el primer golpe, además los rollos del límite plástico no se pudieron hacer debido a su poca plasticidad.
- Las propiedades físicas de la arena estudiada, obtenidas mediante ensayos de laboratorio son las siguientes: humedad óptima = 9,5%, peso específico máximo = 1.73 g/cm^3 , resistencia a la compresión inconfinada promedio = 0.334 Kg/cm^2 , ángulo de fricción interna del ensayo de corte directo = 39.46° . Los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos correspondientes

para materiales granulares, ya que estos poseen humedades óptimas inferiores al 10% y peso específico seco máximo de $1,76 \text{ g/cm}^3$. Este valor tan bajo de la resistencia a la compresión inconfiada, es típico de arenas sin cohesión, ya que en una prueba sin confinamiento no existe una matriz que ligue a las partículas entre sí y por esta razón al ser sometida la muestra a una carga axial en condiciones inconfiadas, las partículas se desligan fácilmente ante la menor carga. El ángulo de fricción para arenas densas de granos redondeados se encuentra en el rango de 35 a 40° , por tal motivo el obtenido es considerado dentro de este rango.

- Con los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio se pudo establecer que la relación entre ángulo de fricción interna (Φ) y la resistencia a la compresión inconfiada (q_u) es de $118,15 \text{ }^\circ\text{cm}^2/\text{Kg}$ para la arena mal gradada estudiada y compactada con la humedad óptima.
- Con los resultados obtenidos se puede apreciar que el ángulo de fricción interna obtenido en el ensayo de compresión inconfiada es de $1,04$ veces mayor que el obtenido en el ensayo de corte directo lo cual confirma que el ángulo de fricción interna es el que se obtuvo dado a la pequeña diferencia entre los valores de los dos ensayos.

8. RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES

En el transcurso de la realización de los ensayos en el laboratorio se tuvo algunos inconvenientes debido a que es difícil el manejo del suelo escogido para el estudio (arena). Por tal motivo, se recomienda la adquisición de los tomamuestras adecuados que permitan una extracción satisfactoria de las muestras.

Para una mayor eficiencia en los ensayos de corte directo y compresión simple se recomienda la realización de mantenimiento y calibración a las máquinas correspondientes.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BERRY, Peter L. y REID, David. 1993. Mecánica de suelos. Santafé de Bogotá, Colombia. Editora: Martha Edma Suarez R. 42 p.
- BOWLES, Joseph E. 1980. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial: MCGRAW-HILL LATINOAMERICANA, S.A. 175 – 178 p.
- BOWLES, Joseph E. 1980. Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil. Bogotá, Colombia. Editorial: MCGRAW-HILL LATINOAMERICANA, S.A. 133 – 136 p.
- Escuela de Ingeniería en Construcción. “Ensayo Corte Directo”. {En línea}. {Consultado el 23 de abril de 2012}. Disponible en: http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/cortedirecto.pdf
- POLANCO DE HURTADO, Margarita. Mecánica de suelos. Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad del Cauca, Colombia. 235 – 236 p.
- CRESPO VILLALAZ, Carlos. 2004. Mecánica de suelos y cimentación. México. Editorial: Limusa. 88 p.
- JUÁREZ BADILLO, Eulalio y RICO RODRÍGUEZ, Alfonso. 2004. Mecánica de suelos, teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos. Tomo II. México. Editorial: Limusa.
- QUESADA OREJARENA, Sergio Andrés y DURÁN RUEDA, Luis Carlos. 2010. Relación entre los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante obtenidos en los ensayos de Corte Directo y Compresión Simple para arenas limosas. Trabajo de grado.

- ALVARADO SALCEDO, Paul Andrés y MUÑOZ AYALA, Iván Darío. 2010. Correlación del ángulo de fricción interna y CBR tipo I para arenas limosas (SM). Trabajo de grado.
- VILLAMIZAR LEMOS, Alexis Fernando y DÍAZ GUTIÉRREZ, José Jaime. 2010. Relación entre los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante obtenidos en los ensayos de Corte Directo y Compresión Simple para arenas arcillosas. Trabajo de grado.
- OCHOA OSORIO, Carlos Andrés y BONILLA GALLO, Elkin Yebrail. 2010. Correlación del ángulo de fricción interna y CBR tipo I para arenas arcillosas (SC). Trabajo de grado.