

**ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA EN MUESTRAS PRE-
CORTADAS, MEDIANTE EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN SUELO
ARENO LIMOSO.**

JUAN DANIEL UMAÑA DOMINGUEZ

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2018**

ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA EN MUESTRAS PRE-CORTADAS, MEDIANTE EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN SUELO ARENO LIMOSO.

JUAN DANIEL UMAÑA DOMINGUEZ

**Trabajo de grado modalidad Investigativa para optar al título de:
Ingeniero Civil**

**Directora
HEBENLY CELIS LEGUIZAMO
ING CIVIL.,MSC.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2018**

DEDICATORIA

*Dedicado a Dios que me dio las fuerzas para continuar la carrera en momentos
difíciles, que no ha dejado de sostenerme y ayudarme todo este tiempo.*

*A mis padres por el gran apoyo que me brindaron, animándome a seguir todas las veces
que necesité.*

A mis abuelos que sin dudar me ayudaron para poder seguir estudiando.

A mi familia que de una u otra forma no dejaban de apoyarme.

*A mis amigos que me acompañaron en toda la carrera por el ánimo que me daban y su
colaboración.*

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS	19
1.1. OBJETIVO GENERAL	19
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. MARCO DE REFERENCIA.....	20
2.1 ENSAYO DE CORTE DIRECTO.....	20
2.2 RESISTENCIA PICO	20
2.3 ESTADO CRÍTICO.....	21
2.4 RESISTENCIA RESIDUAL	21
3. METODOLOGÍA	23
3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN.....	23
3.2 UBICACIÓN GEOGRAFICA DE LA MUESTRA TOMADA	23
3.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA	24
3.4 ENSAYOS DE CORTE DIRECTO	25
3.4.1 Ensayo de corte directo con muestras sin corte previo.....	25
3.4.2 Ensayo de corte directo con muestras pre-cortadas.....	29
4. RESULTADOS.....	31
4.1 DIMENSIONES DEL ANILLO.	31
4.2 RESULTADOS DE MUESTRAS SIN CORTE PREVIO.....	31
4.2.1 Corte directo con carga axial de 1 kg (3,47 KPa).	31

4.2.2	Corte directo con carga axial de 4 kg (13,88 KPa).	33
4.2.3	Corte directo con carga axial de 8 kg (27,76 KPa).	35
4.2.4	Corte directo con carga axial de 16 kg (55,51 KPa).	37
4.2.5	Corte directo con carga axial de 32 kg (111,03 KPa).	39
4.2.6	Envolvente de falla.	41
4.3	RESULTADOS DE MUESTRAS PRE-CORTADAS.	42
4.3.1	Corte directo con carga axial de 4 kg (13,88 KPa).	42
4.3.2	Corte directo con carga axial de 8 kg (27,76 KPa).	44
4.3.3	Corte directo con carga axial de 16 kg (55,51 KPa).	46
4.3.4	Corte directo con carga axial de 32 kg (111,03 KPa).	48
4.3.5	Envolvente de falla.	50
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.	51
5.1	INFLUENCIA DEL CORTE PREVIO EN EL ESFUERZO CORTANTE.	51
5.2	INFLUENCIA DEL CORTE PREVIO EN LA ENVOLVENTE DE FALLA.	54
5.3	INFLUENCIA DEL CORTE PREVIO EN EL ÁNGULO DE FRICCIÓN.	55
5.4	INFLUENCIA DEL CORTE PREVIO EN LA COHESIÓN DE LA MUESTRA.	55
6.	CONCLUSIONES	57
	BIBLIOGRAFÍA	59
	ANEXOS	61

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Resultado de la caracterización del suelo.....	25
Tabla 2 Dimensiones del anillo usado para preparar las muestras.....	31
Tabla 3 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 3,47 KPa ...	31
Tabla 4 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 3,47 KPa	32
Tabla 5 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 13,88 KPa .	33
Tabla 6 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 13,88 KPa	33
Tabla 7 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 27,76 KPa .	35
Tabla 8 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 27,76 KPa	35
Tabla 9 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 55,51 KPa .	37
Tabla 10 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 55,51 KPa	37
Tabla 11 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 111,03 KPa	39
Tabla 12 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 111,03 KPa	39
Tabla 13 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 13,88 KPa	42
Tabla 14 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 13,88 KPa	42
Tabla 15 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 27,76 KPa	44
Tabla 16 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 27,76 KPa	44
Tabla 17 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 55,51 KPa	46
Tabla 18 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 55,51 KPa	46
Tabla 19 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 111,03 KPa	48

Tabla 20 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 111,03 KPa	48
Tabla 21 Ángulos de fricción y cohesión.....	56
Tabla 22 Análisis Granulométrico de la Muestra.....	61
Tabla 23 Límite Líquido	64
Tabla 24 Datos muestras para el límite plástico	66

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 resistencia pico y residual.....	22
Figura 2 Ubicación geográfica de la muestra.....	24
Figura 3 Muestra tamizada con humedad cercana al límite plástico.....	26
Figura 4 Muestra de suelo en el molde.....	26
Figura 5 Muestra instalada e inundada en la maquina	27
Figura 6 Ajuste de tasa de desplazamiento en el equipo.....	28
Figura 7 Muestra al final del ensayo	28
Figura 8 Muestra de suelo pre-cortada con tira de nylon.....	30
Figura 9 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 3,47 KPa.....	32
Figura 10 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 3,47 KPa	33
Figura 11 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 13,88 KPa.....	34
Figura 12 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 13,88 KPa	34
Figura 13 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 27,76 KPa.....	36
Figura 14 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 27,76 KPa	36
Figura 15 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 55,51 KPa.....	38
Figura 16 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 55,51 KPa	38

Figura 17 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 111,03 KPa.....	40
Figura 18 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 111,03 KPa	40
Figura 19 Consolidación de las muestras	41
Figura 20 Envolvente de falla.....	41
Figura 21 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 13,88 KPa.....	43
Figura 22 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 13,88 KPa	43
Figura 23 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 27,76 KPa.....	45
Figura 24 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 27,76 KPa	45
Figura 25 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 55,51 KPa.....	47
Figura 26 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 55,51 KPa	47
Figura 27 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 111,03 KPa.....	49
Figura 28 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 111,03 KPa	49
Figura 29 Consolidación de las muestras pre-cortadas	50
Figura 30 Envolvente de falla.....	50
Figura 31 Evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal para la muestra sin corte y pre-cortada con esfuerzo normal de 13,88 KPa	52
Figura 32 Evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal para la muestra sin corte y pre-cortada con esfuerzo normal de 27,76 KPa	52

Figura 33 Evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal para la muestra sin corte y pre-cortada con esfuerzo normal de 55,51 KPa	53
Figura 34 Evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal para la muestra sin corte y pre-cortada con esfuerzo normal de 111,03 KPa	53
Figura 35 Evolución de la envolvente de resistencia para las muestras sin corte y con corte previo.	54
Figura 36 Curva Granulométrica.....	63
Figura 37 Humedad Vs Número de Golpes	65

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A GRANULOMETRIA.....	61
Anexo B LÍMITES DE ATTERBERG	64
Anexo C CÁLCULOS DE LOS ÁNGULOS DE FRICCIÓN Y COHESIÓN	67

RESUMEN

TÍTULO: ESTIMACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA EN MUESTRAS PRE-CORTADAS, MEDIANTE EL ENSAYO DE CORTE DIRECTO EN SUELO ARENO LIMOSO.*

AUTOR: JUAN DANIEL UMAÑA DOMINGUEZ**

PALABRAS CLAVES: Resistencia, suelo, areno-limoso, corte directo, pre-cortada.

DESCRIPCIÓN:

Teniendo en cuenta la falta de información experimental de resistencia pos-falla que se tiene en suelos tropicales y en particular en Colombia, se requiere de mayor investigación de tipo experimental en esta dirección para evaluar la evolución de los parámetros de resistencia cuando el suelo se somete a niveles de desplazamiento intermedio post-falla, es decir una vez se supera la resistencia pico o máxima. Teniendo en cuenta este escenario, en este proyecto de grado, se realiza una evaluación preliminar para muestras de un suelo areno – limoso de la ciudad de Bucaramanga del departamento de Santander. Los ensayos se realizaron en muestras artificiales con un contenido de humedad fijo y volumen inicial constante, con el ánimo de contar con un conjunto de muestras homogéneas. Por otra parte, es necesario resaltar que el número de ensayos es limitado debido a las capacidades del laboratorio. Por lo anterior, los resultados son indicativos y no se pueden enmarcar dentro de un análisis estadístico. Los resultados obtenidos en el laboratorio, sugieren que la cohesión prácticamente se hace nula para muestras que sufren niveles de desplazamiento importante post pico y el ángulo de fricción en estado crítico presenta una ligera variación que en términos prácticos representa que la resistencia friccional queda constante. Esto concuerda con pruebas tanto de triaxial en el estado crítico como de corte directo en muestras pre-cortadas o con múltiples desplazamientos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas, Escuela de ingeniería Civil, Directora Hebenly Celis Leguizamo.Ing.civil. Msc.

ABSTRACT

TITLE: ESTIMATION OF THE RESISTANCE PARAMETERS IN PRE-CUT SAMPLES, BY MEANS OF THE DIRECT SHEAR TEST IN SILTY SAND SOIL

AUTHOR: JUAN DANIEL UMAÑA DOMINGUEZ**

KEYWORDS: Resistance, soil, sandy silt, direct shear, precut.

DESCRIPTION:

Taking into account the lack of experimental information on post-failure resistance in tropical soils and in particular in Colombia, more experimental research is required in this direction to evaluate the evolution of resistance parameters when the soil is subjected at post/failure intermediate displacement levels, that is, once the peak or maximum resistance is exceeded. Taking into account this scenario, in this project of degree, a preliminary evaluation is made for samples of a sandy - silty soil of the city of Bucaramanga of the department of Santander. The tests were performed on artificial samples with a fixed moisture content and constant initial volume, with the aim of having a set of homogeneous samples. On the other hand, it is necessary to emphasize that the number of trials is limited due to the laboratory's capabilities. Therefore, the results are indicative and cannot be framed within a statistical analysis. The results obtained in the laboratory suggest that the cohesion practically becomes zero for samples that suffer significant displacement levels after peak and the angle of friction in critical state presents a slight variation that in practical terms represents that the frictional resistance remains constant. This agrees with tests of both triaxial in the critical state and direct shear in samples pre-cut or with multiple displacements.

* Graduate work

** Faculty of Physical Mechanical Engineering, School of Civil Engineering, Director Hebenly Celis Leguizamo. Ing.civil. Msc.

INTRODUCCIÓN

La gran mayoría de la infraestructura geotécnica en el mundo está conformada por suelos compactados o construida sobre depósitos de suelos que permanecen en condiciones parcialmente saturadas a través de todo el año en los países tropicales o que no se encuentran afectados por cambios estacionales importantes. Este tipo de construcciones civiles puede estar sujeto a un amplio rango de deformaciones. El cálculo de asentamientos en fundaciones superficiales, por ejemplo, requiere de una evaluación correcta de la rigidez del suelo bajo deformaciones relativamente pequeñas. Por otro lado, el análisis de estabilidad de taludes de tierra y terraplenes, y la capacidad de carga de fundaciones, requieren de un estimado razonable de la resistencia al corte de los suelos, incluyendo su resistencia residual.¹

Una aplicación común de las pruebas de corte directo es verificar que materiales de relleno granular para paredes de tierra estabilizada mecánicamente (TEM) y las pendientes de suelo reforzado (SR) tienen una resistencia adecuada al corte. La controversia con respecto a la descalificación de fuentes de ángulos de fricción medidos en corte directo ha dado lugar al sesgo y la reproducibilidad del método de prueba tal como es en la práctica, pero cuando los ensayos se hacen en un mismo laboratorio y por el mismo operario se obtienen resultados altamente repetibles.²

¹ HOYOS L.R. y VELOSA C.L. Resistencia residual de suelos no saturados utilizando un aparato de corte de anillo a succión controlada. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e infraestructura Civil 2012, vol.12.

² BAREITHER C.A, BENSON C.H y EDIL T.B. Reproducibility of Direct Shear Test Conducted on Granular Backfill Materials. Geotechnical Testing Journal 31, No.1.2017

Se pueden reconocer tres estados de resistencia en suelos: el primero de ellos es la resistencia máxima o pico, donde al menos en un plano ocurre la falla en el suelo, luego un segundo estado si los desplazamientos de corte continúan, donde la cohesión se degrada y se alcanza un estado donde no hay cambios de volumen en el suelo y la resistencia es friccional, finalmente si el nivel de desplazamientos es aún mayor, es decir grandes desplazamientos, la fricción se degrada hasta que las partículas presentan alineamiento y se obtiene el valor último de resistencia del suelo que se denomina estado residual o resistencia residual, que por ejemplo controla la reactivación de superficies de falla en antiguos deslizamientos. Es importante anotar, que si bien es cierto que estos estados de resistencia están ampliamente probados en laboratorio y publicados y que en la práctica ingenieril, en muchos casos se intentan establecer, este no es el caso en Colombia, donde los ensayos de laboratorio se enfocan en la determinación de la envolvente de resistencia pico.

Para conocer o determinar esta resistencia del suelo, en el laboratorio uno de los equipos que se utiliza es el aparato de corte directo. La muestra se somete a una carga normal de confinamiento y a una carga lateral que se va incrementando de forma creciente hasta llevar la muestra a la falla. Mientras se mide el esfuerzo aplicado y el desplazamiento producido entre los dos bloques. Luego con los datos obtenidos se puede obtener la resistencia al corte para la carga normal aplicada, utilizando el criterio de Mohr-Coulomb.¹

En este estudio, los esfuerzos se concentran en la determinación de la resistencia de muestras artificiales (denominadas también remoldeadas), sometidas a esfuerzos de corte, en condición post-falla. Por lo tanto, se estudia el

¹ UGALDE. José Luis, Implementación de la técnica de etapas múltiples en el ensayo de corte directo. Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Diciembre, 2006.

comportamiento en un estado intermedio entre la resistencia pico y la resistencia residual.

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar el efecto de un plano de falla pre-establecido en los parámetros de resistencia de un suelo compactado.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar los parámetros de resistencia (cohesión, ángulo de fricción) de las muestras de suelo pre cortadas y sin corte previo, por medio del ensayo de corte directo.
- Analizar la información recopilada de los ensayos realizados en las muestras de suelo.
- Comparar los datos obtenidos en los ensayos de las muestras con corte y sin corte previo.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 ENSAYO DE CORTE DIRECTO

La finalidad de los ensayos de corte, es determinar la resistencia de una muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones que simulen las que existen o existirán en terreno producto de la aplicación de una carga. Para conocer una de estas resistencias en laboratorio se usa el aparato de corte directo, siendo el más típico una caja de sección cuadrada o circular dividida horizontalmente en dos mitades. Dentro de ella se coloca la muestra de suelo con piedras porosas en ambos extremos, se 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.¹

2.2 RESISTENCIA PICO

Es la máxima resistencia al corte que posee el material, el cual no ha sido fallado previamente y corresponde al punto más alto en la curva esfuerzo - deformación. La modelación de la resistencia pico en el análisis de la estabilidad, asume que la resistencia pico se obtiene simultáneamente a lo largo de toda la superficie de falla; sin embargo, algunos puntos en la superficie de falla han alcanzado deformaciones mayores que otros (en un fenómeno de falla progresiva) y asumir que la resistencia pico actúa simultáneamente en toda la superficie de falla puede producir errores en el análisis.²

¹ PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO, Ensayo corte Directo. Disponible en: http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/cortedirecto.p df. s.f

² SUAREZ, Jaime, Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, Esfuerzo y resistencia al cortante, Bucaramanga, U. Industrial de Santander, 1998, p 82

2.3 ESTADO CRÍTICO

Se define estado crítico como aquella combinación de tensiones para la cual la deformación de corte plástica progresa de manera indefinida sin cambios en la tensión efectiva media, la tensión de corte, o el volumen:

$$\frac{\partial p'}{\partial \varepsilon_q} = 0; \quad \frac{\partial q}{\partial \varepsilon_q} = 0; \quad \frac{\partial v}{\partial \varepsilon_q} = 0$$

Esto sucede cuando:

$$\frac{q_{cs}}{p'_{cs}} = \eta_{cs} = M$$

Siempre y cuando se estén produciendo deformaciones plásticas.

Para suelos normalmente consolidados o ligeramente sobreconsolidados:

- La primera fluencia se produce para $\eta < M$
- Hardening: las superficies de fluencia se expanden

Para suelos muy sobreconsolidados

- La primera fluencia se produce para $\eta > M$
- Softening: las superficies de fluencia se contraen.¹

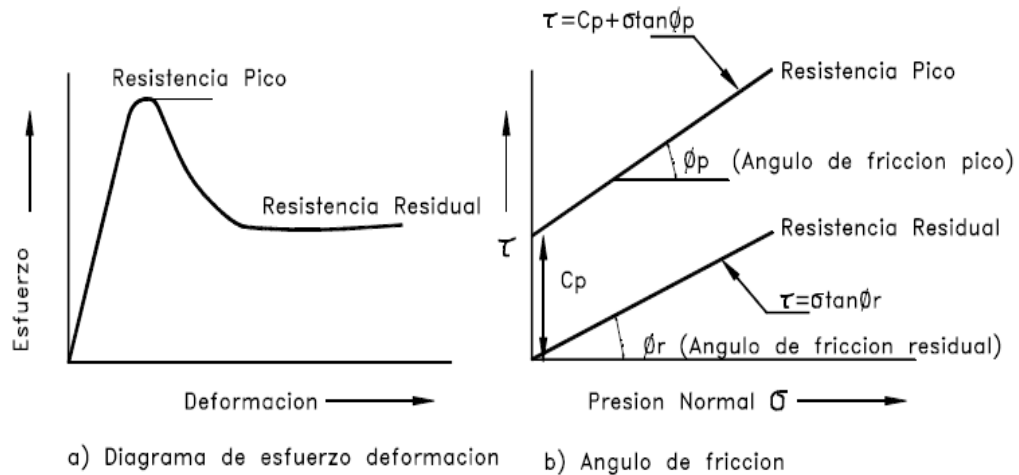
2.4 RESISTENCIA RESIDUAL

Es la resistencia al corte que posee el material después de haber ocurrido la falla. (Figura 1). Skempton observó que en arcillas sobre consolidadas, la resistencia calculada en el análisis de deslizamientos después de ocurridos, correspondía al valor de la resistencia residual y recomendó utilizar para el cálculo de factores de seguridad, los valores de los parámetros obtenidos para la resistencia residual ϕ_r .

¹ MERCHÁN. Vladimir, *Mecánica de Suelos del estado crítico* [Power Point Slide], 2017, Disponible en: <https://drive.google.com/open?id=14uy5GwjJJSXMUIP135cQ-Wc2qgXg9J0t>.

y C_r . La resistencia residual en los suelos cohesivos se debe tener en cuenta cuando existe una superficie previa de corte donde han ocurrido desplazamientos en el pasado y en suelos licuables, expuestos a sismos de gran magnitud.¹

Figura 1 resistencia pico y residual



Fuente: Jaime Suarez. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, Esfuerzo y Resistencia al cortante, U. Industrial de Santander, Bucaramanga, 1998, p, 83.

¹ SUAREZ, Jaime, Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, Esfuerzo y resistencia al cortante, Bucaramanga, U. Industrial de Santander, 1998, p 83.

3. METODOLOGÍA

3.1 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

Para comenzar, se requirió de previo estudio de información ya recopilada por estudios hechos anteriormente sobre el tipo de suelo en la que se basa esta investigación (areno-limoso), sus características y propiedades en general, también se revisó la norma Invias 2013. Para la realización de los ensayos que se requirieron principalmente como el de granulometría¹, límites de Atterberg^{2 3}, y corte directo (INV- E-154, 2013)⁴.

3.2 UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE LA MUESTRA TOMADA

La muestra con la que se realizaron los ensayos fue tomada en la Cra. 33 carretera antigua, barrio San Martín.

¹ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Normas de ensayos de materiales para carreteras, Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos, Colombia, 19 de Julio 2013, Sección 100-Suelos, INV- E-123.

² INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Determinación del límite líquido de los suelos, Op.cit., INV- E-125.

³ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos, Op.cit. INV- E-126.

⁴ INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD), Op.cit. INV- E-154.

Figura 2 Ubicación geográfica de la muestra



Fuente: Registro *Google Earth*

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MUESTRA

La muestra fue llevada a laboratorio y se realizaron los siguientes ensayos de acuerdo con la norma de Invias 2013:

- Granulometría [Anexo A]
- Límites de Atterberg [Anexo B]

Los resultados obtenidos se describen en la **tabla 1**

Tabla 1 Resultado de la caracterización del suelo

Límites de Atterberg			Granulometría			Clasificación
LL	LP	IP	% Gravas	% Arenas	% Finos	SM
35	28	7	11,83	40,67	47,48	

Donde

LL: Limite liquido

LP: Limite plástico

IP: Índice de plasticidad

SM: Areno-Limoso

3.4 ENSAYOS DE CORTE DIRECTO

Para la realización de los ensayos de corte directo, se procedió de la forma indicada en la norma de Invias de forma consolidado drenado.

3.4.1 Ensayo de corte directo con muestras sin corte previo. En la realización del ensayo, previamente se prepara la muestra recolectando 300 gr tamizada por el tamiz N° 40, llevándola a la humedad óptima registrada anteriormente en el límite plástico (Figura 3). Se toma una porción de esta muestra para comprobar la humedad al inicio del ensayo.

Figura 3 Muestra tamizada con humedad cercana al límite plástico



En este estudio, se trabajaron con muestras estructuradas artificialmente, porosas y normalmente consolidadas con humedad de preparación cercana al límite plástico. Para ello se estableció, un protocolo básico que consiste en ir colocando capas de muestra dentro del molde sin aplicar esfuerzos de compactación. Con esto se garantiza, una muestra porosa, normalmente consolidada, “blanda” sin historia de esfuerzos y cercana a la saturación (Figura 4). Todas las muestras siguieron el mismo protocolo de preparación comprobando que el peso de las muestras sea muy similar.

Figura 4 Muestra de suelo en el molde



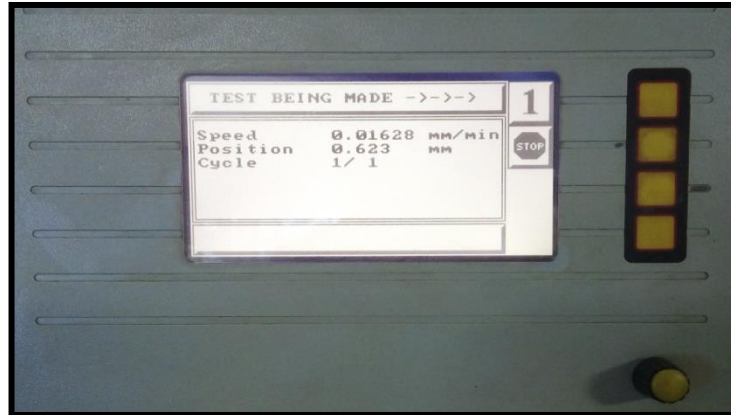
Luego la muestra en el anillo es llevada sobre la caja de corte donde se desliza la muestra hacia la caja de corte, después se coloca la piedra porosa superior. Luego la caja de corte se lleva a la máquina de corte donde esta queda fija ajustando los tornillos, se instala el deformímetro para el registro del desplazamiento vertical, se inunda la muestra con agua durante 3 horas y se le aplica la carga normal (ver figura 5).

Figura 5 Muestra instalada e inundada en la maquina



La primera carga normal aplicada fue de 1Kg, con la cual se tomaron en seguida lecturas de desplazamiento vertical antes de realizar el corte para permitir la consolidación con la carga normal aplicada. Se procede a definir la tasa de desplazamiento de 1mm/hora para el ensayo, que en el equipo era registrado como 0,0166mm/min (ver figura 6), luego se ajusta el medidor de fuerza horizontal en cero.

Figura 6 Ajuste de tasa de desplazamiento en el equipo



Se procede al ensayo de corte y al mismo tiempo se registran lecturas de la fuerza de corte que va resistiendo la muestra contra el valor del desplazamiento respectivo, simultáneamente se registran lecturas del desplazamiento vertical mientras que avanza el ensayo de corte hasta cuando se llegue a una resistencia residual. Después de terminar el ensayo se desmonta la máquina de corte donde se extrae la muestra ensayada con la cual se ubica en el horno durante 24 horas para luego obtener el contenido de humedad.

Figura 7 Muestra al final del ensayo



Ya finalizado el ensayo con carga normal de 1 kg se procede a ensayar otra muestra con carga axial de 4 Kg tomando de nuevo lecturas de desplazamiento vertical antes de realizar el corte en los mismo tiempos como en el corte anterior, registrando la fuerza de corte que resiste la muestra con su respectivo desplazamiento y el desplazamiento vertical en el transcurso del corte hasta 6 mm de desplazamiento horizontal. De la misma forma después del terminar el corte se realiza el mismo procedimiento para obtener el contenido de humedad. Este mismo procedimiento se realizó con cargas de 8kg, 16kg y 32kg.

Finalmente con los datos registrados en los ensayos se obtiene información como la humedad, peso unitario total, la relación de vacíos, saturación y las envolventes de falla con la cual se obtienen los parámetros de resistencia. Los cálculos de la saturación se realizaron con una gravedad específica (Gs) de $2,65 \text{ gr/cm}^3$.

3.4.2 Ensayo de corte directo con muestras pre-cortadas. Para las muestras pre-cortadas se realizó el mismo procedimiento de preparación de las muestras hasta dejar consolidar la muestra inundada durante 3 horas. Luego a estas muestras se les realiza el corte de forma manual utilizando una tira de nylon (ver figura 8), después ubicando la muestra de nuevo en la máquina de corte con la carga respectiva e iniciar el ensayo de corte, tomando registro de desplazamiento vertical y la fuerza que resiste la muestra con respecto al desplazamiento horizontal. Este método se utilizó solo para los ensayos con cargas normales de 4kg, 8kg y 16 kg. Para la carga normal de 32 kg el corte previo se realizó con la misma máquina de corte, ya que para los resultados del anterior corte (carga normal de 16 Kg), presentaron ciertas dudas en los resultados presentados, por esta razón se llevó a cabo de la manera mencionada anteriormente. Luego de terminar los ensayos se realiza el proceso para obtener la humedad de la muestra. Con el anillo utilizado para los moldes, se determinó el diámetro, la altura y el área de la muestra.

Figura 8 Muestra de suelo pre-cortada con tira de nylon



4. RESULTADOS

4.1 DIMENSIONES DEL ANILLO.

Tabla 2 Dimensiones del anillo usado para preparar las muestras

ANILLO		
Diámetro	6	cm
Altura	2,3	cm
Área	28,27	cm ²
Volumen	65,03	cm ³

4.2 RESULTADOS DE MUESTRAS SIN CORTE PREVIO.

En las siguientes tablas y graficas estarán los resultados obtenidos en laboratorio para cada muestra con su respectiva carga axial. Para la fase de consolidación de cada muestra estarán representadas en la Figura 19 al final del ensayo.

4.2.1 Corte directo con carga axial de 1 kg (3,47 KPa).

- Datos de la muestra al inicio del ensayo

Tabla 3 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 3,47 KPa

MUESTRA 1		
Humedad	29,37	%
Peso unitario total	1908,32	Kg/m ³
Saturación	97,7	%
Relación de vacíos	0,8	-

- Datos de la muestra al final del ensayo

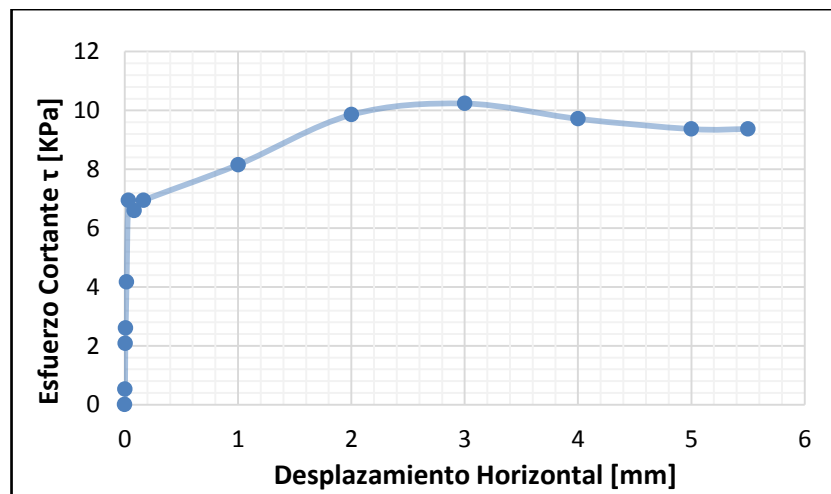
Tabla 4 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 3,47 KPa

MUESTRA 1		
Humedad	30,56	%
Saturación	99,99	%
Relación de vacíos	0,79	-
Peso unitario total	1924,12	Kg/m ³

- Fase de corte

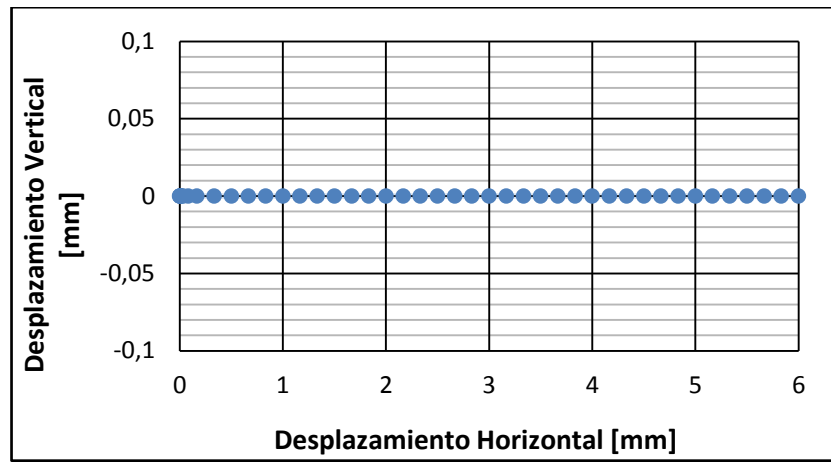
Con los datos registrados en el laboratorio, se procede a graficar la relación del esfuerzo cortante y el desplazamiento vertical con respecto al desplazamiento horizontal.

Figura 9 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 3,47 KPa



El esfuerzo cortante máximo es de 10,24 [KPa].

Figura 10 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 3,47 KPa



4.2.2 Corte directo con carga axial de 4 kg (13,88 KPa).

- Datos de la muestra al inicio del ensayo

Tabla 5 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 13,88 KPa

MUESTRA 2		
Humedad	28,21	%
Peso unitario total	1832,97	Kg/m ³
Saturación	87,6	%
Relación de vacíos	0,85	-

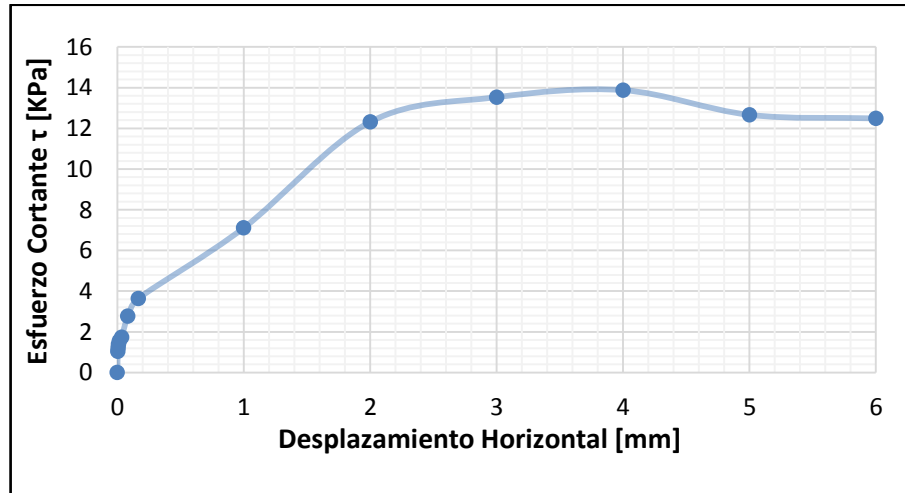
- Datos de la muestra al final del ensayo

Tabla 6 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 13,88 KPa

MUESTRA 2		
Humedad	30,40	%
Peso unitario total	1873,63	Kg/m ³
Saturación	95,4	%
Relación de vacíos	0,84	-

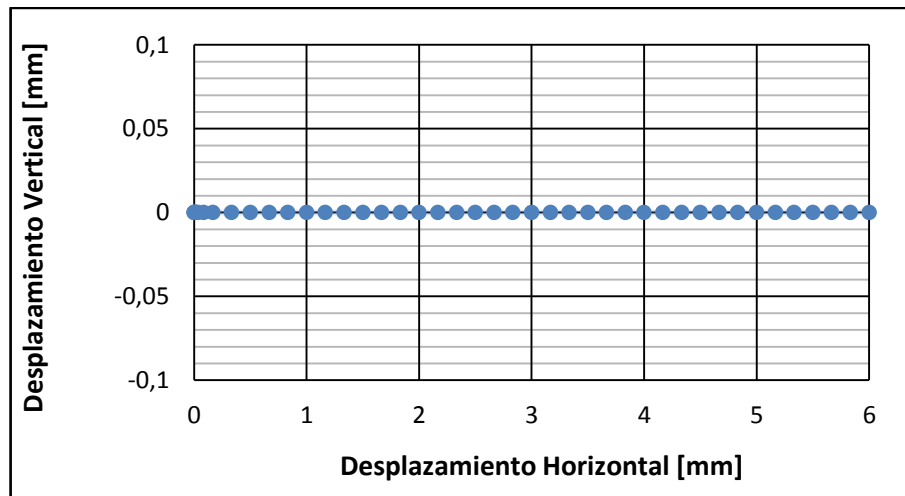
- Fase de corte

Figura 11 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 13,88 KPa



El esfuerzo cortante máximo fue de 13,88 KPa

Figura 12 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 13,88 KPa



4.2.3 Corte directo con carga axial de 8 kg (27,76 KPa).

- Datos de la muestra al inicio del ensayo

Tabla 7 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 27,76 KPa

MUESTRA 3		
Humedad	26,74	%
Peso unitario total	1820,67	Kg/m3
Saturación	83,9	%
Relación de vacíos	0,84	-

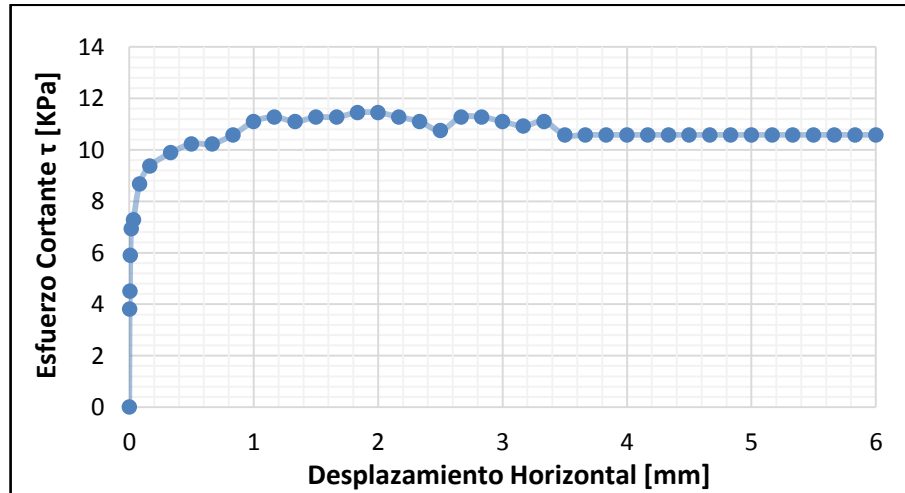
- Datos de la muestra al final del ensayo

Tabla 8 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 27,76 KPa

MUESTRA 3		
Humedad	28.34	%
Saturación	90,6	%
Peso unitario total	1859,9	Kg/m3
Relación de vacíos	0,83	-

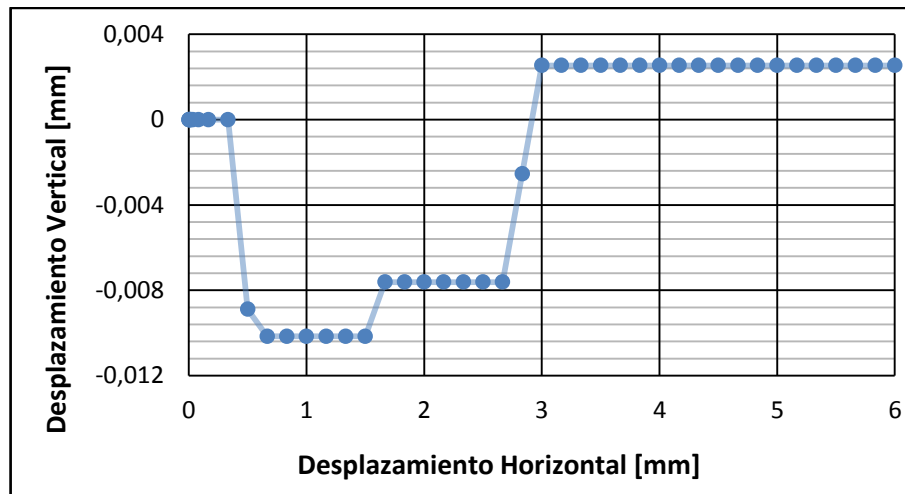
- Fase de corte

Figura 13 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 27,76 KPa



El esfuerzo cortante máximo fue de 11,45[KPa]

Figura 14 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 27,76 KPa



4.2.4 Corte directo con carga axial de 16 kg (55,51 KPa).

- Datos de la muestra al inicio del ensayo

Tabla 9 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 55,51 KPa

MUESTRA 4		
Humedad	29,53	%
Peso unitario total	1828,4	Kg/m ³
Saturación	89,2	%
Relación de vacíos	0,88	-

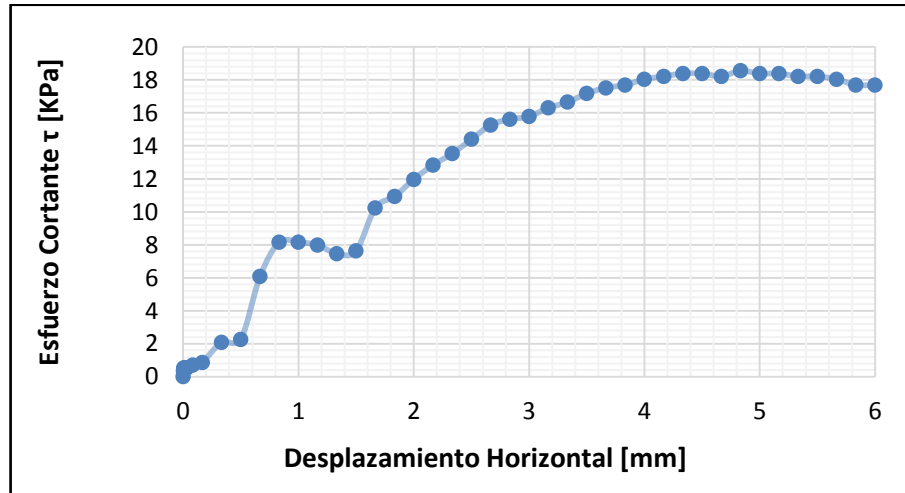
- Datos de la muestra al final del ensayo

Tabla 10 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 55,51 KPa

MUESTRA 4		
Humedad	30,78	%
Saturación	90,8	%
Peso unitario total	1826,1	Kg/m ³
Relación de vacíos	0,9	-

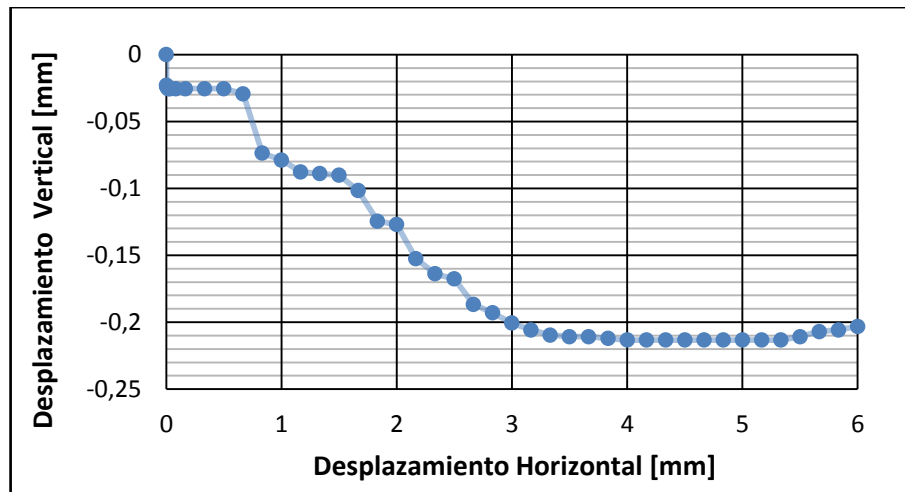
- Fase de corte

Figura 15 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 55,51 KPa



El esfuerzo cortante máximo fue de 18,56[KPa]

Figura 16 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 55,51 KPa



4.2.5 Corte directo con carga axial de 32 kg (111,03 KPa).

- Datos de la muestra al inicio del ensayo

Tabla 11 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 111,03 KPa

MUESTRA 5		
Humedad	28,87	%
Peso unitario total	1865,27	Kg/m ³
Saturación	92,1	%
Relación de vacíos	0,83	-

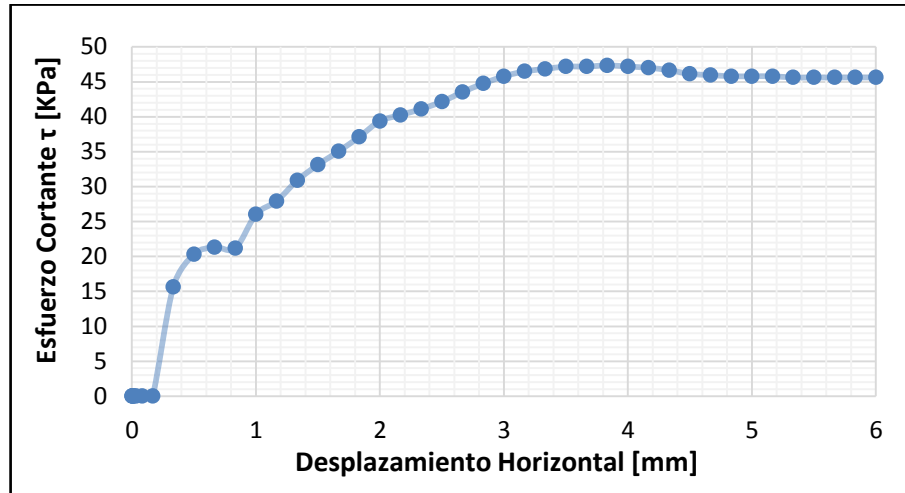
- Datos de la muestra al final del ensayo

Tabla 12 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 111,03 KPa

MUESTRA 5		
humedad	29,59	%
Saturación	94	%
Peso unitario total	1871,87	Kg/m ³
Relación de vacíos	0,83	-

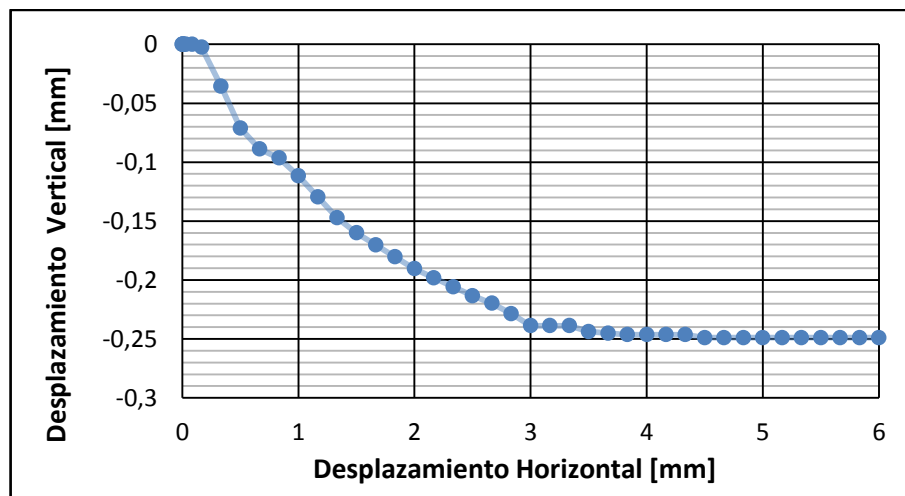
- Fase de corte

Figura 17 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 111,03 KPa



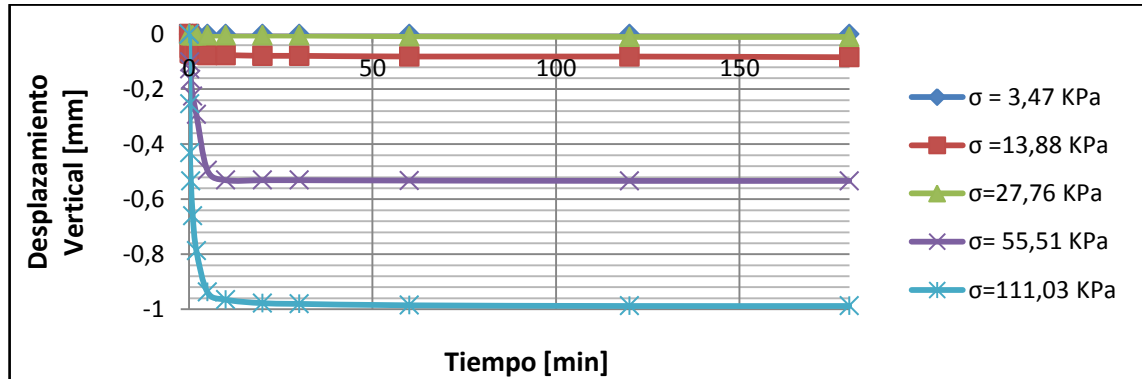
El esfuerzo cortante máximo fue de 47,36[KPa]

Figura 18 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 111,03 KPa



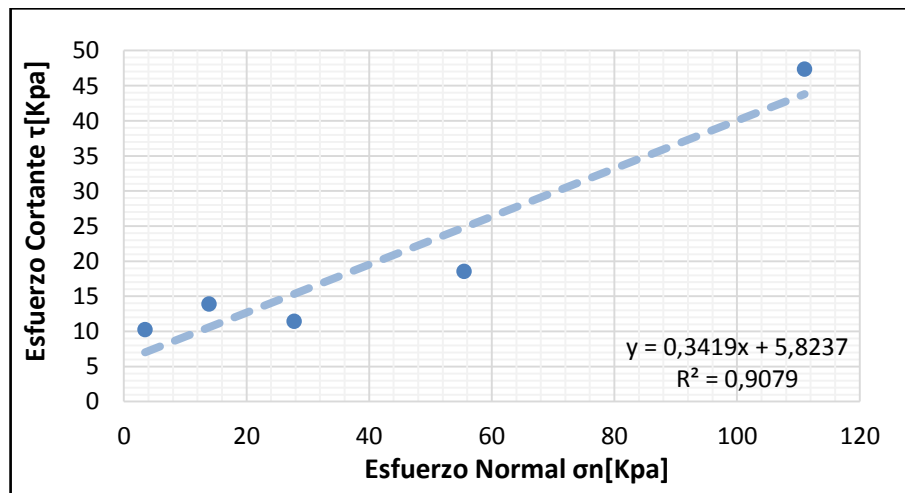
- Consolidación

Figura 19 Consolidación de las muestras



4.2.6 Envoltente de falla. Se puede observar ahora en la Figura 15 la envoltente de falla experimental con los valores de esfuerzo cortante máximo (10.24, 13.88, 11.45, 18.56, 47.36 KPa) para cada esfuerzo de confinamiento de (3.47, 13.88, 27.76, 55.51, 111.03 KPa).

Figura 20 Envoltente de falla



4.3 RESULTADOS DE MUESTRAS PRE-CORTADAS.

En las siguientes tablas y graficas estarán los resultados obtenidos en laboratorio para cada muestra con su respectiva carga axial. Para las muestras pre-cortadas, no se toma el esfuerzo cortante máximo, sino un promedio de los últimos datos. Para la fase de consolidación de cada muestra estarán representadas en la Figura 29 al final del ensayo.

4.3.1 Corte directo con carga axial de 4 kg (13,88 KPa).

- Datos de la muestra al inicio del ensayo

Tabla 13 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 13,88 KPa

MUESTRA 1		
Humedad	28,41	%
Peso unitario total	1697,65	Kg/m3
Saturación	75,1	%
Relación de vacíos	1,01	-

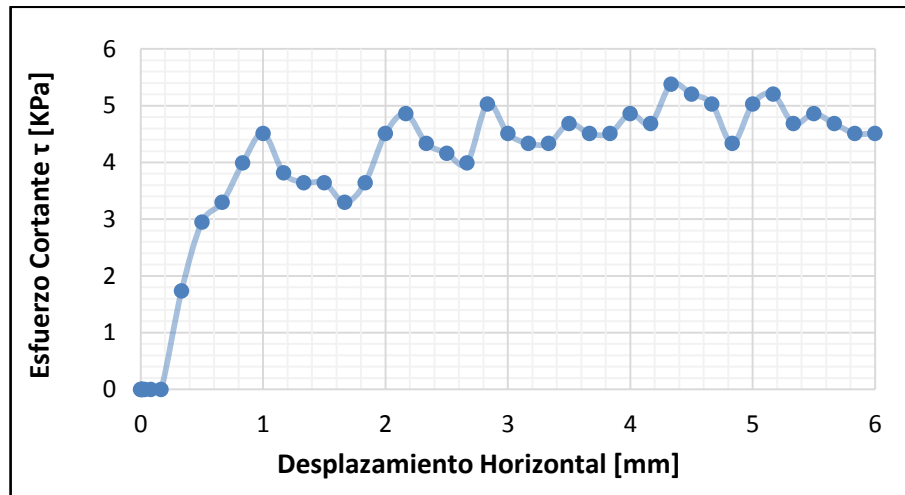
- Datos de la muestra al final del ensayo

Tabla 14 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 13,88 KPa

MUESTRA 1		
Humedad	31,34	%
Saturación	78,3	%
Peso unitario total	1689,36	Kg/m3
Relación de vacíos	1,06	-

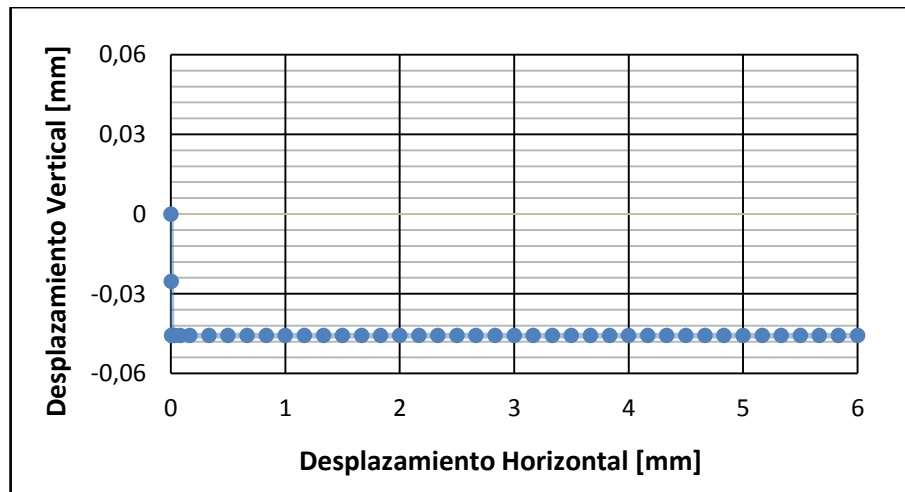
- Fase de corte

Figura 21 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 13,88 KPa



Esfuerzo cortante promedio máximo final 4,58[KPa].

Figura 22 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 13,88 KPa



4.3.2 Corte directo con carga axial de 8 kg (27,76 KPa).

- Datos de la muestra al inicio del ensayo

Tabla 15 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 27,76 KPa

MUESTRA 2		
Humedad	26,74	%
Peso unitario total	1905,25	Kg/m ³
Saturación	92,9	%
Relación de vacíos	0,76	-

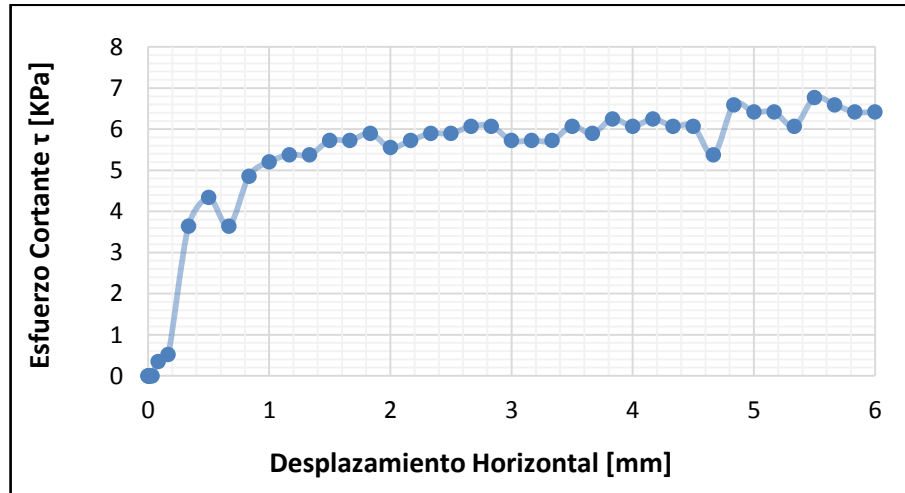
- Datos de la muestra al final del ensayo

Tabla 16 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 27,76 KPa

MUESTRA 2		
Humedad	30,88	%
Saturación	98,1	%
Peso unitario total	1890,5	Kg/m ³
Relación de vacíos	0,83	-

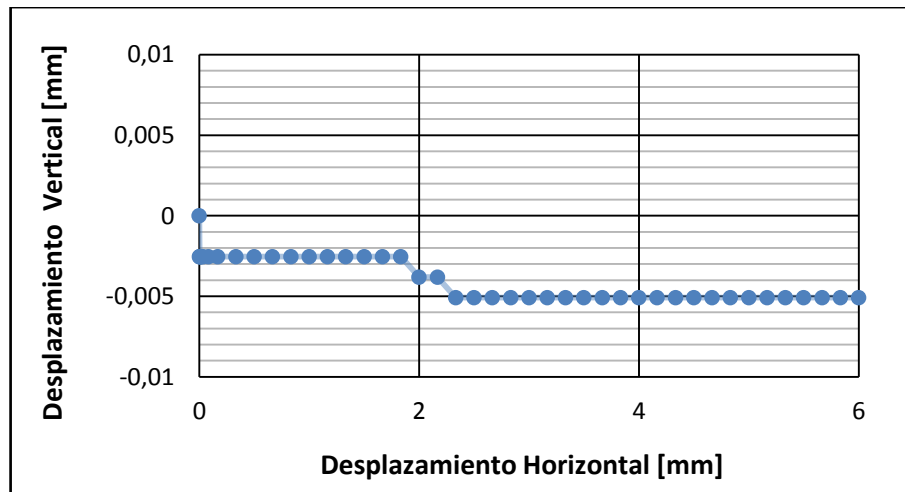
- Fase de corte

Figura 23 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 27,76 KPa



Esfuerzo cortante promedio máximo final 6,06[KPa].

Figura 24 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 27,76 KPa



4.3.3 Corte directo con carga axial de 16 kg (55,51 KPa).

- Datos de la muestra al inicio del ensayo

Tabla 17 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 55,51 KPa

MUESTRA 3		
Humedad	28,70	%
Peso unitario total	1929,85	Kg/m ³
Saturación	99,1	%
Relación de vacíos	0,77	-

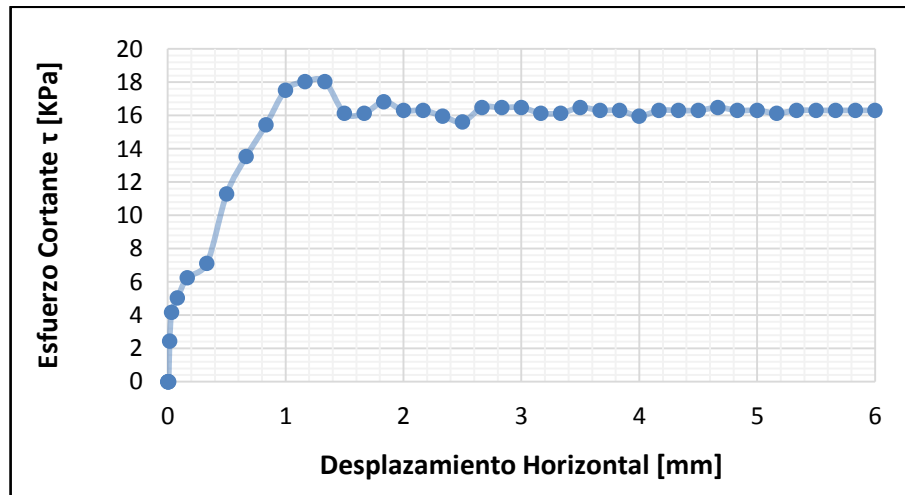
- Datos de la muestra al final del ensayo

Tabla 18 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 55,51 KPa

MUESTRA 3		
Humedad	28,38	%
Saturación	96,3	%
Peso unitario total	1910,68	Kg/m ³
Relación de vacíos	0,78	-

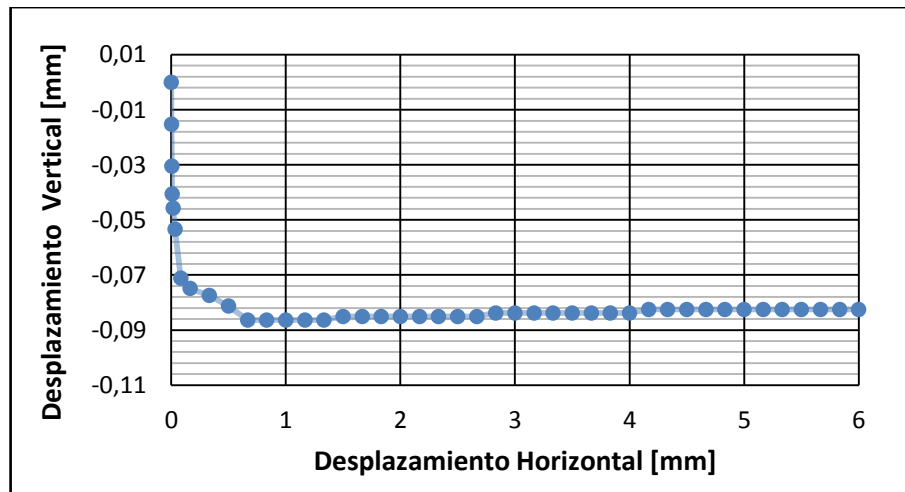
- Fase de corte

Figura 25 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 55,51 KPa



Esfuerzo cortante promedio máximo final 16,28[KPa].

Figura 26 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 55,51 KPa



4.3.4 Corte directo con carga axial de 32 kg (111,03 KPa).

- Datos de la muestra al inicio del ensayo

Tabla 19 Datos de preparación de la muestra con esfuerzo normal de 111,03 KPa

MUESTRA 4		
Humedad	28,21	%
Peso unitario total	1857,58	Kg/m ³
Saturación	90,2	%
Relación de vacíos	0,83	-

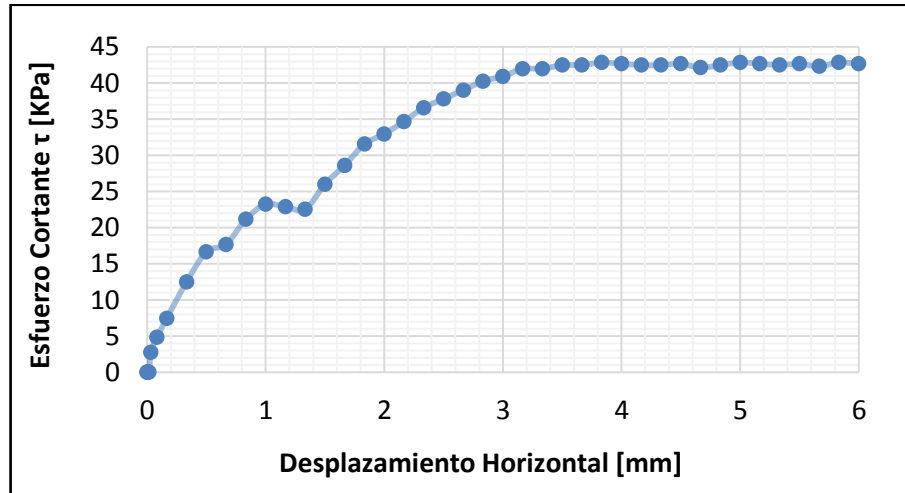
- Datos de la muestra al final del ensayo

Tabla 20 Muestra al final del ensayo con esfuerzo normal de 111,03 KPa

MUESTRA 4		
Humedad	26,57	%
Saturación	85	%
Peso unitario total	1834,6	Kg/m ³
Relación de vacíos	0,83	-

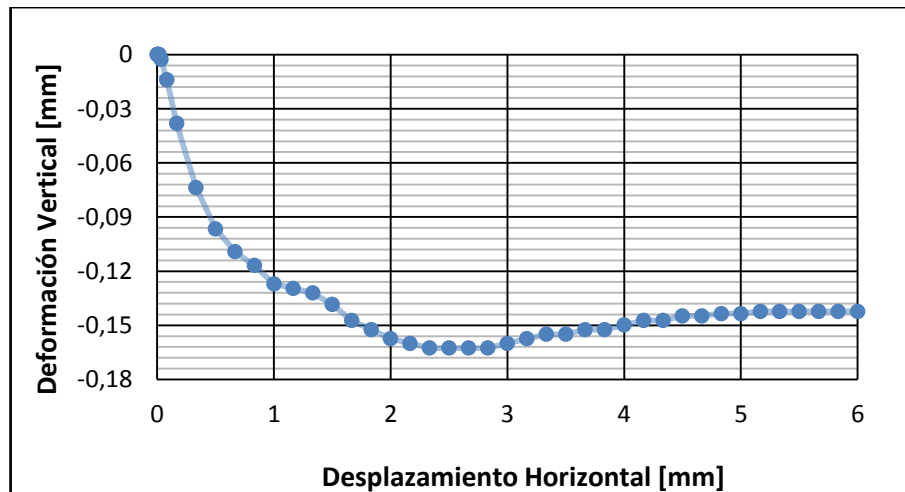
- Fase de corte

Figura 27 Relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 111,03 KPa



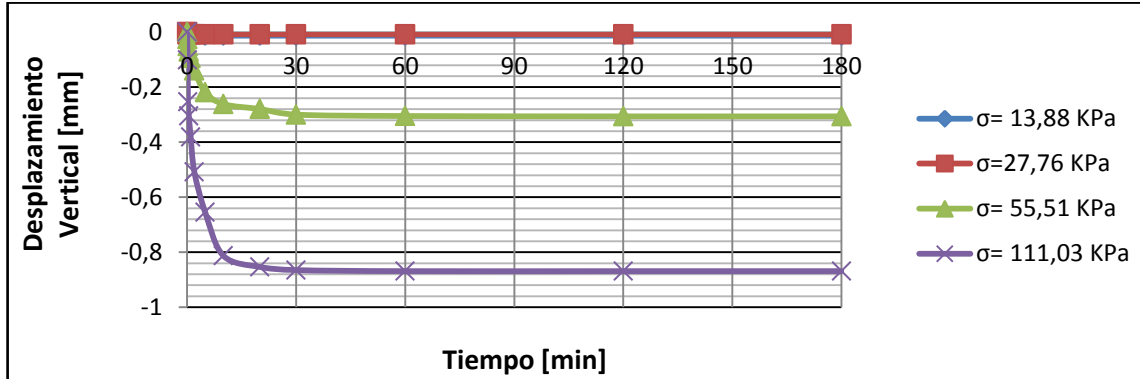
Esfuerzo cortante promedio máximo final 42,55[KPa].

Figura 28 Desplazamiento vertical durante la fase de corte a un esfuerzo normal de 111,03 KPa



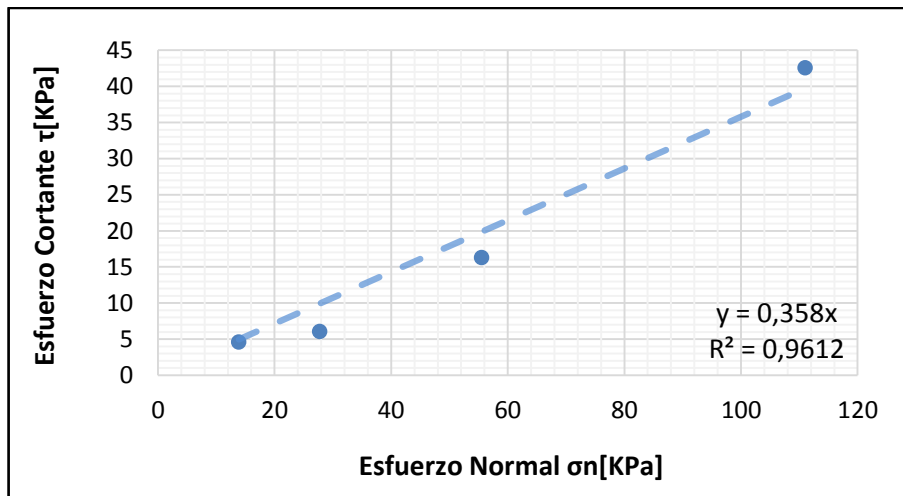
- Consolidación

Figura 29 Consolidación de las muestras pre-cortadas



4.3.5 Envoltorio de falla.

Figura 30 Envoltorio de falla



5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de obtener los resultados de los ensayos de corte directo para las muestras sin corte y corte previo, se procede a realizar un análisis de la variación de los parámetros de resistencia para estos dos casos mencionados.

5.1 INFLUENCIA DEL CORTE PREVIO EN EL ESFUERZO CORTANTE.

En las Figuras 31, 32, 33 y 34, se puede comparar los esfuerzos cortantes entre las muestras sin corte previo y las pre-cortadas obtenidos para los esfuerzos normales de 13,88 KPa 27,76 KPa, 55,51 KPa y 111,03 KPa respectivamente. Se puede observar la diferencia de resistencia al corte que tienen las muestras, ya que las muestras pre-cortadas pierden la cohesión en el eje donde se realizó el corte, siendo este uno de los factores que influyen en la evolución o proceso de falla de un suelo.¹

¹ SUAREZ, Jaime, Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, Caracterización de los movimientos, Bucaramanga, U. Industrial de Santander, 1998, p 30.

Figura 31 Evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal para la muestra sin corte y pre-cortada con esfuerzo normal de 13,88 KPa

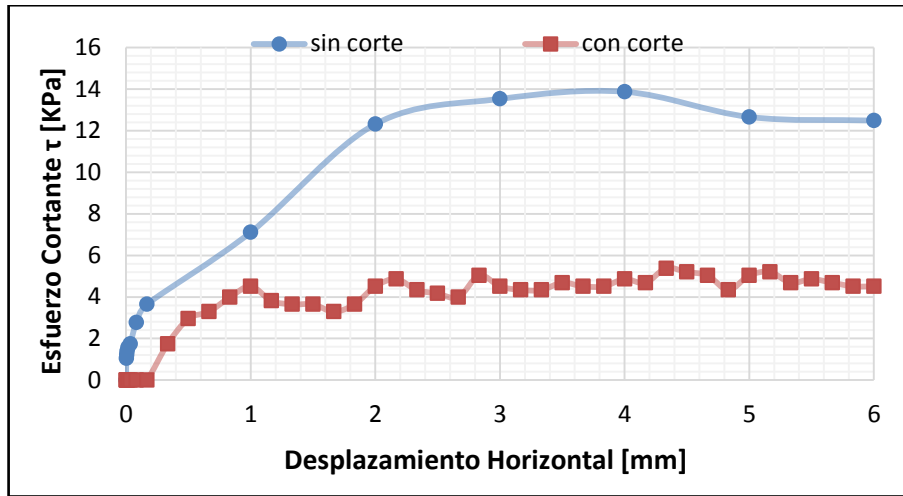


Figura 32 Evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal para la muestra sin corte y pre-cortada con esfuerzo normal de 27,76 KPa

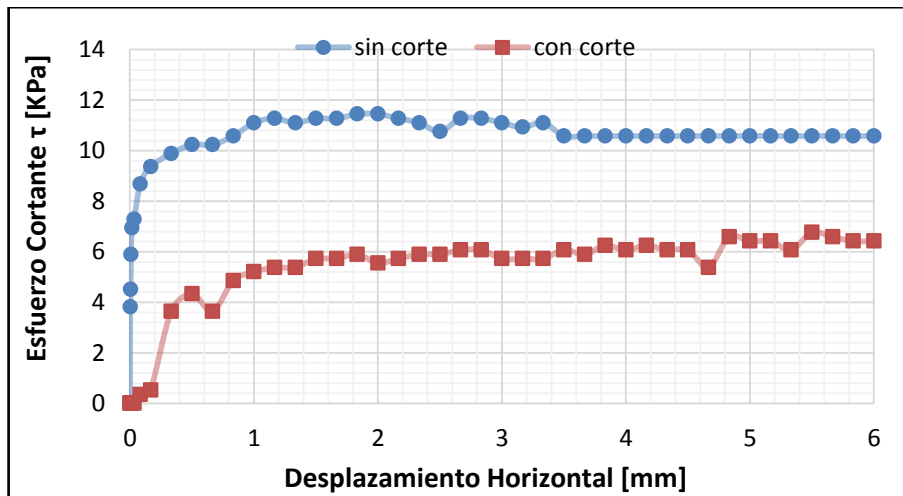


Figura 33 Evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal para la muestra sin corte y pre-cortada con esfuerzo normal de 55,51 KPa

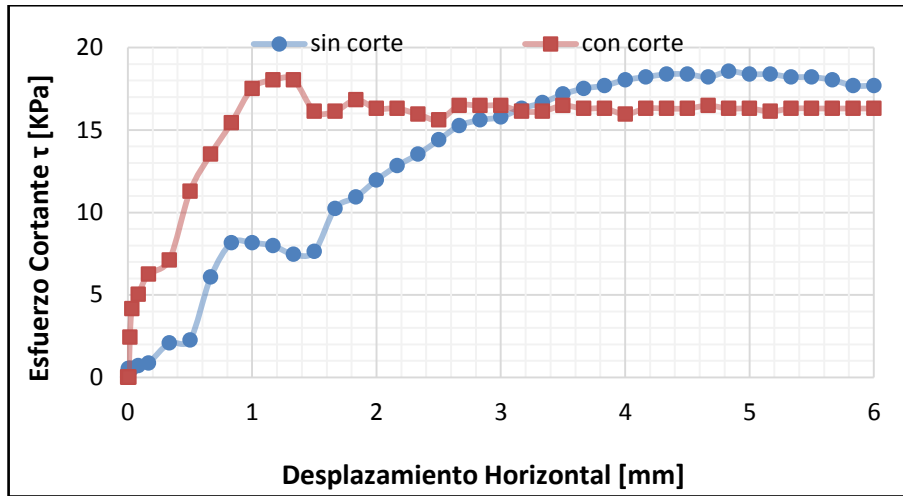
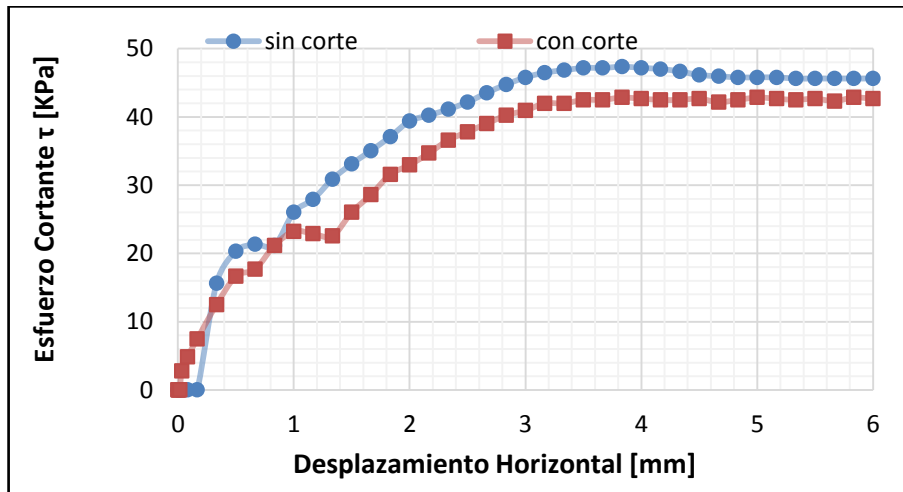


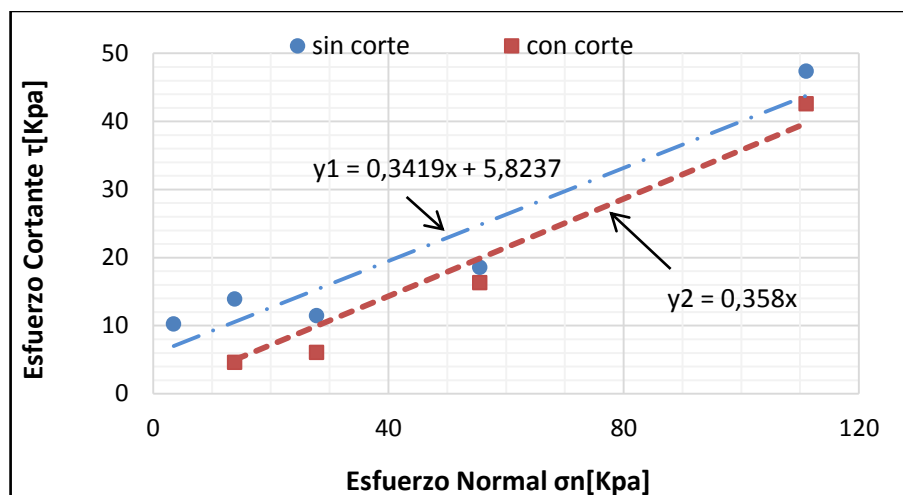
Figura 34 Evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal para la muestra sin corte y pre-cortada con esfuerzo normal de 111,03 KPa



5.2 INFLUENCIA DEL CORTE PREVIO EN LA ENVOLVENTE DE FALLA.

Como se puede observar en la Figura 35, la envolvente de falla para las muestras pre-cortadas es menor con respecto a la envolvente que se obtuvo por los resultados de las muestras sin corte previo por lo mencionado anteriormente, la cohesión se hace nula para las muestras pre-cortadas dejando la resistencia tangencial entre partículas que es determinada principalmente por la magnitud de la carga normal aplicada, de forma que el comportamiento general es de naturaleza friccional. (T. Lambe, 1991,76)¹

Figura 35 Evolución de la envolvente de resistencia para las muestras sin corte y con corte previo.



Donde

Y1: Ecuación de la envolvente de resistencia para las muestras sin corte previo.

Y2: Ecuación de la envolvente de resistencia para las muestras pre-cortadas.

¹ LAMBE .T & WHITMAN. R. Mecánica de suelos, segunda edición, Limusa, 1991, cap.6-Resistencia al deslizamiento tangencial entre partículas del suelo, p.76.

5.3 INFLUENCIA DEL CORTE PREVIO EN EL ÁNGULO DE FRICCIÓN.

Según los resultados del ángulo de fricción de los ensayos realizados (ver tabla 21), se puede notar que el efecto del corte previo no tuvo mucha influencia en el ángulo de fricción, ya que esta fricción se debe a la resistencia tangencial entre las partículas que aumenta por la carga axial.

5.4 INFLUENCIA DEL CORTE PREVIO EN LA COHESIÓN DE LA MUESTRA.

En la tabla 21 describe el cambio de la cohesión que se obtuvo al realizar los ensayos con muestras pre-cortadas, haciendo este valor como nulo, ya que en el eje del corte no ocurrió alguna adherencia de las partículas por causa de la carga aplicada y tampoco existió una cohesión aparente ya que las muestras en estado de saturación desaparece esta cohesión.¹

En la siguiente Tabla, se presenta los resultados de esfuerzos cortantes para cada uno de los esfuerzos normales y el ángulo de fricción y la cohesión para cada envolvente de falla.

¹ SUAREZ, Jaime. Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, Esfuerzo y resistencia al cortante, Bucaramanga, U. Industrial de Santander, 1998, p 82.

Tabla 21 Ángulos de fricción y cohesión

Ensayo con	Esfuerzo normal [KPa]	Esfuerzo cortante [KPa]	Ángulo de fricción ϕ (°)	Cohesión [KPa]
Muestras sin corte previo	3,47	10,24	18	5
	13,88	13,88		
	27,76	11,45		
	55,51	18,56		
	111,03	47,36		
Muestras pre-cortadas	13,88	4,58	19	0
	27,76	6,07		
	55,51	16,28		
	111,03	42,55		

Los cálculos de la cohesión y el ángulo de fricción se presentan en el anexo C.

6. CONCLUSIONES

- Se realizó una cantidad limitada de ensayos debido a las limitaciones propias del uso de la máquina para diferentes grupos de trabajo.
- Teniendo en cuenta lo anterior, estos resultados son preliminares y solo son indicativos para las condiciones de las muestras ensayadas.
- no se pueden tratar estos datos de forma estadística hasta no contar con un muestreo importante.
- Se realizaron los ensayos de corte directo con las muestras sin corte previo y pre cortadas que permitieron obtener la información de los cambios que ocurre en los parámetros de resistencia (cohesión, fricción).
- Las muestras en el proceso del corte, su reacción en el desplazamiento vertical fue en gran parte de compresión y muy poca dilatación.
- Los resultados de saturación de las muestras estuvieron acorde a lo que se esperaba llegando a un promedio de un 91%.
- Según los resultados obtenidos en los ensayos, se puede evidenciar la pérdida de la cohesión para las muestras pre cortadas, evitándose al mismo tiempo la cohesión aparente llevándose las muestras a un estado cercano de la saturación donde esta cohesión desaparece.
- Los ángulos de fricción obtenidos por las envolventes de falla para las muestras sin corte previo y pre cortada, son similares, por lo que se puede

concluir que este parámetro fue muy poco influenciado por el corte previo realizado en las muestras.

BIBLIOGRAFÍA

- BAREITHER C.A., BENSON C.H. & EDIL T.B. Reproducibility of Direct Shear Test Conducted on Granular Backfill Materials. *Geotechnical Testing Journal* 31, No.1.2017
- HOYOS L.R. & VELOSA C.L. Resistencia residual de suelos no saturados utilizando un aparato de corte de anillo a succión controlada. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e infraestructura Civil* 2012, vol.12.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, Normas de ensayos de materiales para carreteras, Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos, Colombia, 19 de Julio 2013, Sección 100-Suelos, INV- E-123.
- _____, _____. Determinación del límite líquido de los suelos, Colombia, 19 de Julio 2013, Sección 100-Suelos, INV- E-125.
- _____, _____. Ensayo de corte directo en condición consolidada drenada (CD), Colombia, 19 de Julio 2013, Sección 100-Suelos, INV- E-154.
- _____, _____. Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos, Colombia, 19 de Julio 2013, Sección 100-Suelos, INV- E-126.
- MERCHÁN. Vladimir, *Mecánica de Suelos del estado crítico* [Power Point Slide], 2017, Disponible en: <https://drive.google.com/open?id=14uy5GwjJSXMUIP135cQ-Wc2qgXg9J0t>.

- PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO, Ensayo corte Directo. Disponible en: http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/cortedirecto.pdf. s.f
- SUAREZ, Jaime, Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales, Esfuerzo y resistencia al cortante, Bucaramanga, U. Industrial de Santander, 1998, p 83.
- _____, _____ Caracterización de los movimientos, Bucaramanga, U. Industrial de Santander, 1998, p 30.
- _____, _____ Esfuerzo y resistencia al cortante, Bucaramanga, U. Industrial de Santander, 1998, p 82
- _____, _____ Esfuerzo y resistencia al cortante, Bucaramanga, U. Industrial de Santander, 1998, p 82.
- LAMBE .T & WHITMAN. R. Mecánica de suelos, segunda edición, Limusa, 1991, cap.6-Resistencia al deslizamiento tangencial entre partículas del suelo, p.76.
- UGALDE. José Luis, Implementación de la técnica de etapas múltiples en el ensayo de corte directo. Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Diciembre, 2006.

ANEXOS

Anexo A GRANULOMETRIA

Este ensayo fue realizado teniendo en cuenta la Norma INV E -123-13.

Peso tara	9,5 gr
Peso inicial de la muestra	1000 gr
Peso después de lavado	528,7 gr

En la Tabla 22 se registra el peso que se retuvo en cada malla, el porcentaje retenido parcial y el porcentaje que pasa por cada malla.

Tabla 22 Análisis Granulométrico de la Muestra

Malla Nº	abertura	Peso suelo retenido	% retenido parcial	% que pasa la malla
*****	mm	gr	%	%
2"	50,8	0	0,00	100,00
1 1/2"	38,1	0	0,00	100,00
1"	25,4	0	0,00	100,00
3/4"	19,05	11,7	1,17	98,83
1/2"	12,7	23,1	2,31	96,52
3/8"	9,52	23,1	2,31	94,21
No4	4,75	60,4	6,04	88,17
No 10	2	93,7	9,37	78,80
No 20	0,84	92,6	9,26	69,54
No 40	0,42	82	8,20	61,34
No 60	0,25	47,1	4,71	56,63
No 100	0,149	37,4	3,74	52,89
No 200	0,074	53,9	5,39	47,50
pasa 200	****	474,8	47,48	
suma			100,0	
total		999,8		

Para obtener el porcentaje retenido parcial en cada una de las mallas, se procede a utilizar la siguiente ecuación (1).

$$\% \text{ Retenido Parcial } i = \frac{\text{Peso suelo retenido}}{\text{Peso inicial de la muestra}} * 100 \quad (1)$$

- Calculo tipo

$$\% \text{ Retenido Parcial}_{3/4}'' = \frac{11,7}{1000} * 100$$

$$\% \text{ Retenido Parcial}_{3/4}'' = 1,17 \%$$

Para el cálculo del porcentaje que pasa en cada una de las mallas, se utiliza la siguiente ecuación (2)

$$\% \text{ **Que pasa** } = \% \text{Que pasa la malla anterior} - \% \text{Retenido en la malla actual} \quad (2)$$

- Calculo tipo

$$\% \text{ **Que pasa**}_{3/4}'' = 100\% - 1,17\%$$

$$\% \text{ **Que pasa**}_{3/4}'' = 98,83\%$$

Para el cálculo del primer porcentaje que pasa, como no se porcentaje que pasa malla anterior, se usa el valor del 100%.

Luego podemos conocer el porcentaje de gravas, arenas y finos se encuentra en la muestra de suelo

Gravas	11,83
Arenas	40,67
Finos	47,48

- Porcentaje de gravas

Para obtener el porcentaje de gravas, se hace la sumatoria de porcentajes retenidos parcial hasta la malla No.4

$$\% \text{Gravas} = \sum_{i=2}^{\text{No.4}} \% \text{retenido parcial}_i \quad (3)$$

$$\% \text{Gravas} = 11.83\%$$

- Porcentaje de Arenas

$$\%Arenas = 100\% - \%que\ pasa\ malla\ No.200 - \%Gravas \quad (4)$$

$$\%Arenas = 100\% - 47,5\% - 11,83\%$$

$$\%Arenas = 40,67\%$$

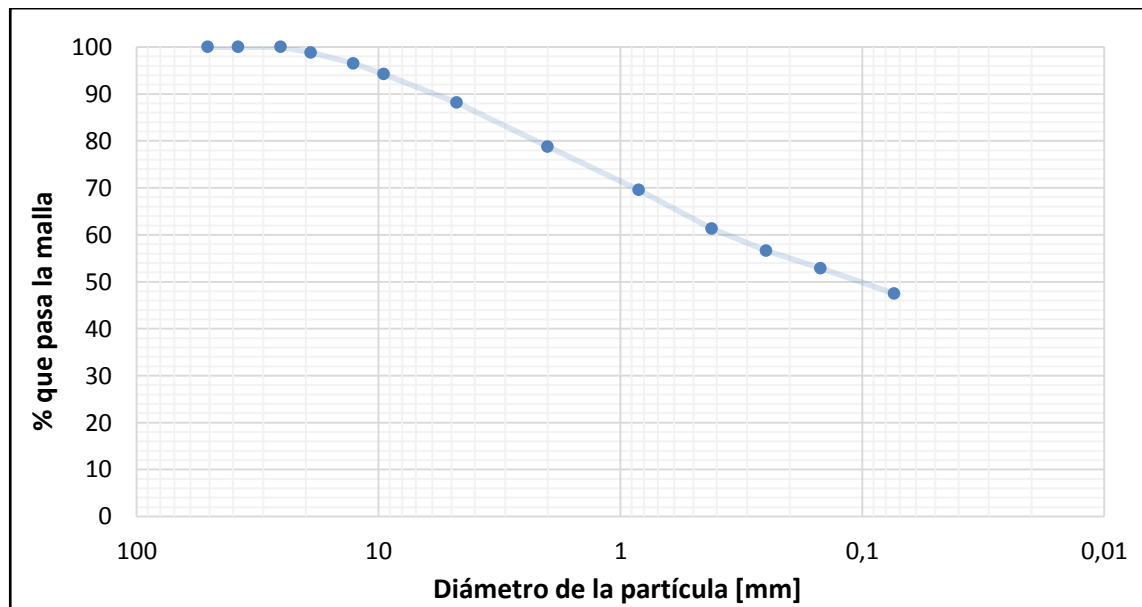
- Porcentaje de finos

$$\%Finos = \%retenido\ parcial_{pasa\ 200} \quad (5)$$

$$\%Finos = 47,48\%$$

Teniendo todos los datos registrados, se procede a la realización de la gráfica teniendo en cuenta el porcentaje que pasa por cada malla y el diámetro de la partícula. El eje horizontal en donde se describe el diámetro de la partícula se utiliza en escala logarítmica.

Figura 36 Curva Granulométrica



Anexo B LÍMITES DE ATTERBERG

- Límite Líquido

Para la realización de ensayo del límite líquido de la muestra, se tuvo en cuenta la norma INV E 125-13.

Tabla 23 Límite Líquido

Tara	# golpes	Peso tara	peso tara + suelo húmedo	Peso tara + suelo seco	Peso del agua	Peso del suelo seco	contenido de agua
		gr	gr	gr	gr	gr	%
1	41	5,5	33,5	26,5	7	21	33,3333
2	35	15,8	40,2	34	6,2	18,2	34,0659
3	26	8,3	32,3	26,1	6,2	17,8	34,8315
4	17	4,3	30,3	23,5	6,8	19,2	35,4167

- Calculo tipo del peso del suelo seco

$$\text{peso del suelo seco} = (\text{peso tara} + \text{suelo humedo}) - (\text{peso de la tara}_1) \quad (6)$$

$$\text{peso del suelo seco} = 33,5 \text{ gr} - 5,5 \text{ gr}$$

$$\text{peso del suelo seco} = 21 \text{ gr}$$

- Calculo tipo del peso del agua

$$\text{Peso del agua} = (\text{peso tara} + \text{suelo humedo}) - (\text{peso tara} + \text{suelo seco}) \quad (7)$$

$$\text{Peso del agua} = 33,5 \text{ gr} - 26,5 \text{ gr}$$

$$\text{Peso del agua} = 7 \text{ gr}$$

- Calculo tipo del contenido de humedad

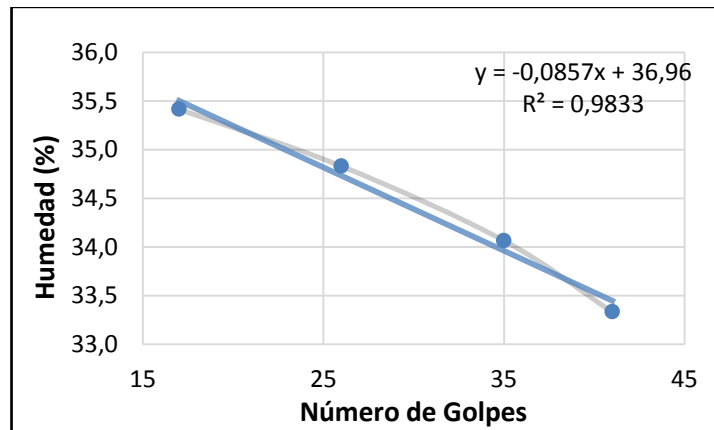
$$\text{humedad} = \left(\frac{\text{peso del agua}}{\text{peso suelo seco}} \right) * 100\% \quad (8)$$

$$\text{humedad} = \left(\frac{7 \text{ gr}}{21 \text{ gr}} \right) * 100\%$$

humedad = 33.33%

Se calcula cada una de las humedades con el mismo procedimiento, luego se realiza una gráfica (Figura 37) donde se represente la humedad con los números de golpes.

Figura 37 Humedad Vs Número de Golpes



Con los datos obtenidos se puede obtener una línea de tendencia lineal, y utilizando la ecuación (9) de esa línea, se reemplaza la x por 25 golpes como lo indica la norma mencionada al inicio.

$$Y = -0,0857x + 36,96 \tag{9}$$

Donde

Y: humedad

X: Numero de golpes

$$Y = -0,0857 * 25 + 36,96$$

$$Y = 34,82\%$$

Límite Líquido = 35%

- Límite Plástico

Para la realización de ensayo del límite plástico de la muestra, se tuvo en cuenta la norma INV E 126-13

Tabla 24 Datos muestras para el límite plástico

Tara	Peso tara	Peso tara + suelo húmedo	Peso tara + suelo seco	Peso del agua	Peso del suelo seco	Contenido de agua
5	5,4	24,7	20,4	4,3	15	28,6667
6	8,5	24,6	21,2	3,4	12,7	26,7717

Para el cálculo del peso del suelo seco, peso del agua y la humedad, se utilizaron las ecuaciones (6), (7) y (8) respectivamente.

Para el determinar el valor del límite plástico, se realiza un promedio entre los dos registros anteriores de humedad.

$$\text{Límite Plástico} = \frac{\text{Humedad 5} + \text{humedad 6}}{2} \quad (10)$$

$$\text{Límite Plástico} = \frac{28,66 + 26,77}{2}$$

$$\text{Límite Plástico} = 28\%$$

- Índice de plasticidad

Para el cálculo del índice de plasticidad se obtiene por medio de la siguiente ecuación (6)

$$\text{Índice de plasticidad} = \text{Límite Líquido} - \text{Límite Plástico} \quad (6)$$

$$\text{Índice de plasticidad} = 35\% - 28\%$$

$$\text{Índice de plasticidad} = 7\%$$

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el ANEXO A (Granulometría) y los resultados presentes en este anexo, se procede a mirar el SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) con lo que se clasifica la muestra de suelo como **SM** (Areno-Limosa).

Anexo C CÁLCULOS DE LOS ÁNGULOS DE FRICCIÓN Y COHESIÓN

- Cálculos para muestras sin corte previo

De la Figura 35 se obtiene la ecuación (11) de la línea de la envolvente de falla con la cual obtenemos la cohesión y el ángulo de fricción.

$$Y = 0,3419X + 5,8237 \quad (11)$$

Donde

Y: Esfuerzo cortante (τ)

X: Esfuerzo normal (σ)

Para el valor de la cohesión se obtiene cuando el valor del esfuerzo normal es "0" utilizando en la ecuación (11), por lo tanto, la cohesión es:

$$C' = 0,3419(0) + 5,8237$$

$$C' = 5,8237 \text{ [KPa]}$$

El valor de la cohesión es de 5 [KPa]

Para el valor del ángulo de fricción se utiliza el valor de la pendiente de la recta y aplicando la tangente inversa se obtiene su valor.

$$\phi = \tan^{-1}(m) \quad (12)$$

Donde

Φ : Angulo de Fricción

m: Pendiente de la recta

Reemplazando el valor de la pendiente en la ecuación (12)

$$\phi = \tan^{-1}(0,3419)$$

$$\phi = 18^\circ$$

- Calculo para muestras pre-cortadas

Como se puede ver en la Tabla 21, la muestra pre-cortada no tiene cohesión y su ángulo de fricción se obtiene de la misma forma como se calcula para la envolvente anterior sin corte previo utilizando la ecuación 12 y reemplazando el valor de la pendiente

$$\phi = \tan^{-1}(0,358)$$

Por lo tanto el valor de la fricción en la envolvente de resistencia para las muestras pre-cortadas es de:

$$\phi = 19,7^\circ$$