

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE
CORTE EN LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE UN SUELO**

NIXON YAIR SEPÚLVEDA VERJEL

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

2012

**ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE
CORTE EN LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE UN SUELO**

NIXON YAIR SEPÚLVEDA VERJEL

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

**Director:
VLADIMIR ERNESTO MERCHAN JAIMES
I.C., M.I.-G, D.I.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA
2012**

DEDICATORIA

*Dedicado a Dios que me permitió refugiarme en él en momentos de desesperación
y tristeza, que me ha acompañado y ayudado en este camino.
A mi madre y a mi Tía que con su apoyo han hecho este sueño realidad.
A mi novia por tanta compañía y colaboración*

*Y especialmente, dedico este trabajo a mi familia por la ayuda constante,
compañía y cada momento de felicidad*

Nixon Yair Sepúlveda Verjel

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander, por permitirme crecer académica y personalmente.

A la escuela de Ingeniería Civil de la Universidad Industrial de Santander y su personal docente, por contribuir con mi formación profesional.

Quiero agradecer enormemente a mi director de trabajo de grado el Ing, M. Sc Vladimir Merchán Jaimes por su paciencia, sus enseñanzas, sus conocimientos, y quien gracias a su tiempo, disposición, fue el guía necesario para la terminación de la tesis.

Al laboratorista German Hernández por su colaboración, orientación y ayuda que fue indispensable para el desarrollo de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
1. OBJETIVOS	17
2. UBICACIÓN DE LA MUESTRA	18
3. CARACTERIZACION DEL SUELO	19
4. CORTE DIRECTO	22
4.1 ENSAYO DE CORTE DIRECTO	22
4.1.1 PROCEDIMIENTO	22
4.1.2 DETERMINACION DE LAS ENVOLVENTES DE RESISTENCIA	29
4.1.3 EJEMPLO: ENSAYO DE CORTE CON TASA DE DESPLAZAMIENTO DE 1 (mm/min)	29
5. ESTUDIO EXPERIMENTAL	44
5.1 ESTUDIO PARA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE DE 0,01 (mm/min)	45
5.2 ESTUDIO PARA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE DE 0,05 (mm/min)	50
5.3 ESTUDIO PARA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE DE 0,1(mm/min)	55
5.4 ESTUDIO PARA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE DE 1 (mm/min)	60
6. INTERPRETACION DE RESULTADOS	66
6.1 INFLUENCIA DE LA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE EN EL ESFUERZO CORTANTE.	66
6.2 EVOLUCIÓN DE LA ENVOLVENTE DE RESISTENCIA PARA LAS DIFERENTES TASAS DE DESPLAZAMIENTO.	69
6.3 INFLUENCIA DE LA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE EN EL ÁNGULO DE FRICCIÓN.	70
6.4 INFLUENCIA DE LA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE EN LA COHESIÓN.	75

6.5 RELACIÓN DE LA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE EN EL DRENADO	77
7. CONCLUSIONES	84
REFERENCIAS	86

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ubicación geográfica de la muestra	18
Figura 2. Curva granulométrica de la muestra	21
Figura 3. Muestra inicial	23
Figura 4. Tallado y extracción del espécimen de tamaño similar al del anillo de corte	24
Figura 5. Colocación de la muestra en el anillo de corte	25
Figura 6. Montado de la caja de corte y micrómetro vertical	26
Figura 7. Extracción de muestra al final de ensayo	27
Figura 8. Extracción espécimen	30
Figura 9. Datos de la etapa de consolidación antes del corte a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	32
Figura 10. Datos de la etapa de expansión-compresión durante el corte a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	33
Figura 11. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	34
Figura 12. Datos de la etapa de consolidación antes del corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	36
Figura 13. Datos de la etapa expansión-compresión durante el corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	37
Figura 14. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	38
Figura 15. Datos de la etapa de consolidación antes del corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	40
Figura 16. Datos de la etapa expansión-compresión durante el corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	41
Figura 17. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un	

esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	42
Figura 18. Envolvente de resistencia experimental para $V_C = 1$ mm/min	43
Figura 19. Fenómeno cabalgamiento de partícula	44
Figura 20. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_C = 0,01$ mm/min	47
Figura 21. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_C = 0,01$ mm/min	47
Figura 22. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 0,01$ mm/min	48
Figura 23. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 0,01$ mm/min	48
Figura 24. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_C = 0,01$ mm/min	49
Figura 25. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_C = 0,01$ mm/min	49
Figura 26. Envolvente de resistencia experimental para $V_C = 0,01$ mm/min	50
Figura 27. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_C = 0,05$ mm/min	52
Figura 28. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_C = 0,05$ mm/min	52
Figura 29. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 0,05$ mm/min	53
Figura 30. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 0,05$ mm/min	53
Figura 31. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_C = 0,05$ mm/min	54
Figura 32. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_C = 0,05$ mm/min	54
Figura 33. Envolvente de resistencia experimental para $V_C = 0,05$ mm/min	55

Figura 34. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_C = 0,1$ mm/min	57
Figura 35. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_C = 0,1$ mm/min	57
Figura 36. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 0,1$ mm/min	58
Figura 37. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 0,1$ mm/min	58
Figura 38. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_C = 0,1$ mm/min	59
Figura 39. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_C = 0,1$ mm/min	59
Figura 40. Envolvente de resistencia experimental para $V_C = 0,1$ mm/min	60
Figura 41. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	62
Figura 42. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	62
Figura 43. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	63
Figura 44. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	63
Figura 45. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	64
Figura 46. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_C = 1$ mm/min	64
Figura 47. Envolvente de resistencia experimental para $V_C = 1$ mm/min	65
Figura 48. Evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal para la influencia de la tasa de desplazamiento y para esfuerzo normal de 3,48 kpa	67
Figura 49. Evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal para la influencia de la tasa de desplazamiento y para esfuerzo normal de 48,74 kpa	68

Figura 50. Evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal para la influencia de la tasa de desplazamiento y para esfuerzo normal de 97,48 kpa	68
Figura 51. Evolución de la envolvente de resistencia para diferentes tasas de desplazamiento	70
Figura 52. Relación entre Angulo de fricción y tasa de desplazamiento de corte según Al-Mhaidib 2005	72
Figura 53. Ángulos de fricción para diferentes tasas de desplazamiento	72
Figura 54. Valores de cohesión para diferentes tasas de desplazamiento	76
Figura 55. Evolución del drenado para diferentes tasas de desplazamiento y esfuerzo normal de 3,48 kpa	78
Figura 56. Evolución del drenado para diferentes tasas de desplazamiento y esfuerzo normal de 48,74 kpa	78
Figura 57. Evolución del drenado para diferentes tasas de desplazamiento y esfuerzo normal de 97,48 kpa	79

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Descripción de la muestra	18
Tabla 2. Análisis granulométrico de muestra	20
Tabla 3. Resultado caracterización del suelo	21
Tabla 4. Datos de tasas de desplazamiento de corte y esfuerzos de confinamiento a usar en ensayos	28
Tabla 5. Datos de la muestra al inicio del ensayo con $V_c=1$ mm/min y $\sigma_c=3,48$ Kpa	31
Tabla 6. Datos de la muestra al final del ensayo con $V_c=1$ mm/min y $\sigma_c=3,48$ Kpa	31
Tabla 7. Datos de la muestra al inicio del ensayo con $V_c=1$ mm/min y $\sigma_c=48,74$ Kpa	35
Tabla 8. Datos de la muestra al final del ensayo con $V_c=1$ mm/min y $\sigma_c=48,74$	35
Tabla 9. Datos de la muestra al inicio del ensayo con $V_c=1$ mm/min y $\sigma_c=97,48$ Kpa	39
Tabla 10. Datos de la muestra al final del ensayo con $V_c=1$ mm/min y $\sigma_c=97,48$ Kpa	39
Tabla 11. Ángulos de fricción y cohesión	74

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE EN LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA DE UN SUELO

AUTOR: NIXON YAIR SEPULVEDA VERJEL

PALABRAS CLAVE: tasa de desplazamiento, cohesión, envolvente de resistencia, ángulo de fricción, resistencia al corte, drenado.

CONTENIDO: La práctica común en geotecnia es ejecutar los ensayos de resistencia al corte bajo condiciones de una tasa de carga elevada. Lo anterior conduce a una sobreestimación de la cohesión del material y por tanto obtener una envolvente de resistencia incorrecta. Ante la incertidumbre asociada a como varían los parámetros de resistencia por efectos de la tasa de desplazamiento se plantea este proyecto de investigación. Teniendo en cuenta lo anterior se desarrolla un programa experimental para estudiar dichos efectos.

A partir de la necesidad de estudiar dichos efectos sobre los parámetros de resistencia, se ejecutaron ensayos de corte directo con diferentes tasas de desplazamiento, a una muestra de suelo saturado presente en el Km 29 de la vía San Gil-Mogotes y así de esta manera poder determinar la cohesión y la envolvente de resistencia de este suelo.

Para dicho programa experimental fue utilizado el equipo de corte directo, el cual permitió obtener resultados que indican que la variación de la tasa de desplazamiento tiene una gran influencia en la evolución de la envolvente de resistencia y en el efecto drenante del suelo. Debido a los efectos de la tasa de desplazamiento de corte en los parámetros de resistencia se sugiere asumir de manera adecuada y observar la evolución de estos parámetros a la hora de diseñar obras civiles.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Director Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CUTTING RATE OF DISPLACEMENT ON THE STRENGTH PARAMETERS OF A SOIL

AUTHOR: NIXON YAIR SEPULVEDA VERJEL

KEYWORDS: rate of displacement, cohesion, strength envelope, friction angle, shear strength, strength parameters, drained

CONTENT:

The common practice in geotechnics is to perform the testing of shear strength under conditions of high load rate. This, leads to an overestimation of the material cohesion and thus obtaining a wrong strength envelope. To the uncertainty associated with varying strength parameters caused by rate of displacement, it is raised, as a result, this research project which involves, considering the above, an experimental program to study these effects.

Based on the necessity of considering these effects on the strength parameters, direct shear tests with different rates of displacement were performed to a saturated soil sample located at the 29th km of the road leading from San Gil to Mogotes in order to determine the cohesion and the strength envelope of this soil.

For this experimental program it was used direct shear equipment, which provided results indicating that the variation in the rate of displacement has a large influence on the evolution of the strength envelope and the draining effect of the soil. Due to the effects of the cutting rate of displacement on the strength parameters, it is suggested properly assume these parameters, and observe their evolution when designing the civil works.

* Graduate Work

** Faculty of Physical Mechanical Engineering, School of Civil Engineering, Director: Vladimir Ernesto Merchán Jaimes

INTRODUCCION

Los parámetros de resistencia al cortante de los suelos son de gran importancia a la hora de diseñar obras civiles, sobre todo en el caso específico de los suelos saturados ya que se presentan con mayor frecuencia en la práctica ingenieril. El objeto del presente trabajo es mostrar la variación de los parámetros de resistencia de un suelo saturado de la vía San Gil-Mogotes por efectos de la tasa de desplazamiento, estudiar la posible evolución de la envolvente de resistencia para diferentes tasas de desplazamiento y estudiar la relación del drenado con la tasa de desplazamiento.

La importancia del estudio de los suelos saturados reside en que, desde el punto de vista de comportamiento mecánico, es uno de los casos más desfavorables para un suelo frente a cargas debido a las elevadas presiones intersticiales, deformaciones excesivas, hinchamiento y colapso. Por otro lado la práctica común en geotecnia es ejecutar los ensayos de resistencia al corte bajo condiciones de una tasa de carga elevada, lo que conduce a una sobreestimación de la cohesión del material y por tanto obtener una envolvente de resistencia incorrecta. Por lo tanto, se desarrolló un programa experimental para estudiar la influencia de la tasa de desplazamiento en los parámetros de resistencia en un suelo de la vía San Gil-Mogotes, para que la perspectiva o el enfoque de este trabajo se centren en estudiar la variación de los parámetros de resistencia por efectos de la tasa de desplazamiento.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Determinar mediante un estudio experimental el efecto de la tasa de desplazamiento de corte en los parámetros de resistencia de un suelo natural en condición saturada ubicado en la vía San Gil-Mogotes.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Estudiar la posible evolución de la envolvente de resistencia para diferentes tasas de desplazamiento de corte.
- Estudiar la relación entre la velocidad de corte y el drenado de la muestra.

2. UBICACIÓN GEOGRAFICA DE LA MUESTRA TOMADA

La muestra con la que se realizaron los ensayos para este trabajo, fue tomada en la vía SAN GIL-MOGOTES, su ubicación se define en la **Tabla N° 1**.

Tabla 1. Descripción de la muestra

MUESTRA	UBICACIÓN	SECTOR	PROFUNDIDAD	DESCRIPCION
suelo de la vía SAN GIL-MOGOTES	KM 29	VIA SANGIL-MOGOTES	5 m	ML Limo inorgánico de baja plasticidad

Figura 1. Ubicación geográfica de la muestra



Fuente: Registro *Google Earth*

3. CARACTERIZACION DEL SUELO

La muestra fue llevada al laboratorio y se realizaron los siguientes ensayos:

- Granulometría
- Límites

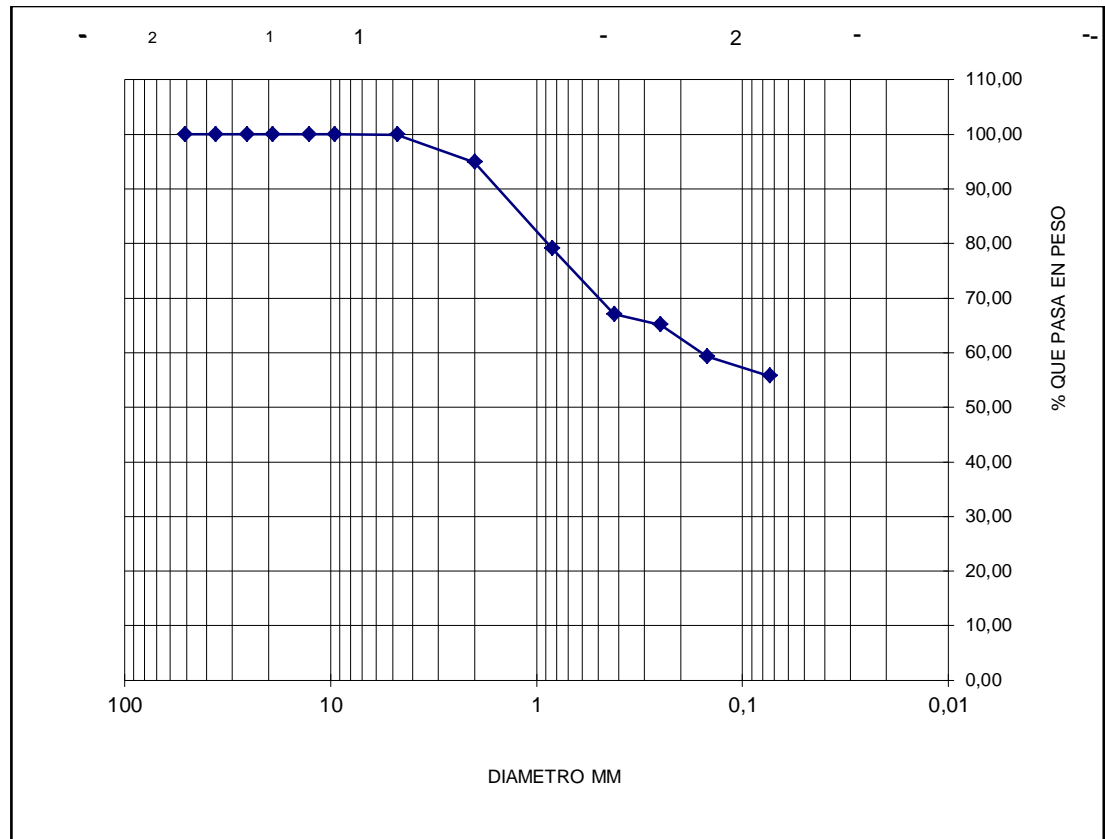
El resumen de los resultados obtenidos en la granulometría y límites de la muestra del suelo se describen en la **Tabla N° 3**

Tabla 2. Análisis granulométrico de muestra

MALLA No	ABERTURA	PESO SUELO RETENIDO	PORCIENTO RETENIDO PARCIAL	% QUE PASA LA MALLA
****	mm	gr	%	%
2"	50,8	0,00	0,00	100,00
1 1/2"	36,1	0,00	0,00	100,00
1"	25,4	0,00	0,00	100,00
3/4"	19,05	0,00	0,00	100,00
1/2"	12,7	0,00	0,00	100,00
3/8"	9,52	0,00	0,00	100,00
No 4	4,75	0,50	0,08	99,92
10	2	30,30	5,05	94,87
20	0,84	94,6	15,77	79,10
40	0,42	72,3	12,05	67,05
60	0,25	11,6	1,93	65,12
100	0,149	34,8	5,80	59,32
200	0,074	21,4	3,57	55,75
PASA 200	*****	334,20		
SUMA	*****	599,20	44,17	
TOTAL		599,70		

Fuente: Registro Propio

Figura 2. Curva granulométrica de la muestra



Fuente: Registro Propio

Tabla 3. Resultado caracterización del suelo

MUESTRA	LIMITES DE ATTEMBERG			GRANULOMETRIA			PESO UNITARIO (gr/cm3)	CLASIFICACION DE SUELO
	LIMITE LIQUIDO	LIMITE PLASTICO	INDICE DE PLASTICIDAD	% DE GRAVAS	% DE ARENAS	% DE FINOS		
SUELO DE LA VIA SAN GIL-MOGOTES	0	0	NP	0,08	44,17	55,75	3,06	ML

Fuente: Registro Propio

4. CORTE DIRECTO

4.1 ENSAYO DE CORTE DIRECTO

En la parte experimental se harán procedimientos para determinar la resistencia al corte y la variación del desplazamiento vertical de una muestra de suelo, sometida previamente a un proceso de consolidación, cuando se le aplica un esfuerzo de corte directo mientras se permite un drenaje completo de ella; así mismo cuando esta muestra esta sujeta a diferentes cargas normales y a diferentes velocidades controladas en incrementos definidos.

Los resultados de estos ensayos son usados para estimar la resistencia al corte y las propiedades de resistencia a partir de las envolventes de resistencia de una masa de suelo o terraplén, información que es de suma importancia en el diseño de estructuras.

Para realizar los ensayos de corte directo a la muestra de suelo analizada nos basaremos en la norma **I.N.V.E - 154 - 07**

4.1.1 PROCEDIMIENTO

El procedimiento inicia con la toma de la muestra, que como la norma lo señala debe ser relativamente inalterada, para que esta pueda conservar su humedad y de esta manera poder aumentar la utilidad de estos resultados. Se extrajo la muestra, posteriormente se sello con parafina, para que no existiera evidencia de secamiento parcial de esta como se observa en la Figura 3.

Figura 3. Muestra inicial



Fuente: *Registro Propio*

Se retira cuidadosamente la capa de parafina del sector de donde se va a extraer la muestra, se hacen cortes y se talla cuidadosamente un espécimen con un tamaño similar al anillo de corte de modo que se puedan sacar la muestra y procedemos a insertar el anillo de corte (Ver Figura 4).

Figura 4. Tallado y extracción del espécimen de tamaño similar al del anillo de corte



Fuente: *Registro Propio*

Luego se extrae el anillo de corte y se enrasa la muestra con el borde del anillo utilizando una espátula, se procura que los diferentes anillos de corte que se enrasen tengan el mismo peso para evitar errores en los resultados (Ver Figura 5).

Figura 5. Colocación de la muestra en el anillo de corte



Fuente: *Registro Propio*

Se coloca el anillo con la muestra sobre la caja de corte directo y se desliza la muestra sobre el anillo hacia la caja de corte, luego se coloca la piedra porosa superior saturada. Posteriormente la caja de corte se lleva a la maquina de corte y se procede a montar esta fijando los tornillos de ajuste, se instala el micrómetro para deformación vertical, se inunda la muestra con agua de 2 a 4 horas, y se aplica la carga normal (inicialmente se aplica una carga normal de 1kg (Ver Figura 6), después se repite el ensayo con cargas normales de 14 y 28 kg). Se determino la altura, diámetro y área de la muestra.

Figura 6. Montado de la caja de corte y micrómetro vertical



Fuente: *Registro Propio*

Se estableció previamente al ensayo el contenido natural de humedad, límites de Atterberg (límite líquido y límite plástico) y granulometría a la muestra. Todas estas pruebas se llevaron a cabo con base en las **normas INV E-122, INV E-125, INV E-126, INV E-123** respectivamente. Estos ensayos se realizaron con el fin de identificar y caracterizar el suelo.

Teniendo la muestra sujeta a la carga normal de 1kg tomamos lecturas de deformación vertical antes de realizar el corte a diferentes tiempos de 1, 15, 30, 45, 60, 75, 90, 105, 120, 135, 150, 165, 180 minutos con el fin de permitir la consolidación con la carga normal previamente escogida. Se procede a definir una

velocidad de corte igual a 1 mm/min para el ensayo, posteriormente se ajusta el medidor de fuerza horizontal igual a cero.

Se da inicio al ensayo de corte y simultáneamente tomamos lecturas de la fuerza de corte que va resistiendo la muestra contra el valor del desplazamiento asociado, además se toman lecturas del desplazamiento vertical a medida que avanza el ensayo de corte hasta alcanzar la resistencia máxima del espécimen. Después de que la muestra ha fallado se desmonta la maquina de corte, se extrae la caja de corte de la maquina y de esta la muestra ensayada, se procede a establecer el contenido de humedad final a la muestra (Ver figura 7).

Figura 7. Extracción de muestra al final de ensayo



Fuente: *Registro Propio*

Finalizado el ensayo con carga normal de 1kg se procede a ensayar otro espécimen pero con una carga de 14 kg y nuevamente se toman lecturas de deformación vertical antes de realizar el corte en los mismos intervalos de tiempos controlados, lecturas durante el ensayo de la fuerza de corte que va resistiendo la muestra contra el valor del desplazamiento asociado, y lecturas del desplazamiento vertical a medida que avanza el ensayo de corte hasta alcanzar la resistencia máxima del espécimen. De igual manera se establece el contenido natural de humedad y el contenido final de humedad. Después de terminar el ensayo de corte con carga normal de 14 kg se repitió el ensayo de corte pero con una carga de 28 kg se siguió el procedimiento de ensayo y de toma de lecturas de deformación vertical antes y durante el corte así como las lecturas de la fuerza de corte contra el desplazamiento.

Finalizados los tres ensayos con cargas normales de 1,14 y 28 kg respectivamente y con una tasa de desplazamiento de corte igual a 1 mm/min se procede a repetir el proceso anterior con tasas de desplazamiento de 0,1 mm/min, 0,05 mm/min y 0,01 mm/min como se observa en la **Tabla N° 4**.

Tabla 4. Datos de tasas de desplazamiento de corte y esfuerzos de confinamiento a usar en ensayos

Tasa de desplazamiento de corte V_c (mm/min)	Esfuerzos normales aplicados o de confinamiento σ_c (Kpa)
1	3.48, 48.74, 97.48
0,1	3.48, 48.74, 97.48
0,05	3.48, 48.74, 97.48
0,01	3.48, 48.74, 97.48

El transporte de la muestra se llevo a cabo de acuerdo a I.N.V. E-103-07 para preservar las propiedades físicas y de humedad

4.1.2 DETERMINACION DE LAS ENVOLVENTES DE RESISTENCIA

A partir de los datos de fuerza cortante que resiste la muestra contra desplazamiento horizontal registrados durante cada uno de los ensayos con carga de (3.48, 48.74, 97.48 [KPa] ó 1, 14, 28 [kg] respectivamente) es posible ilustrar el esfuerzo cortante máximo contra el esfuerzo normal aplicado y así mismo determinar la envolvente de resistencia para cada una de las cuatro velocidades ensayadas.

A continuación se entregaran los resultados analíticos y un ejemplo del procedimiento anteriormente expuesto para los ensayos hechos con una velocidad de 1 mm/min escogida como ejemplo para el trabajo de grado.

4.1.3 EJEMPLO: ENSAYO DE CORTE CON TASA DE DESPLAZAMIENTO DE 1 (mm/min)

Se retira cuidadosamente la capa de parafina del sector de donde se va a extraer la muestra, se hacen cortes y se talla cuidadosamente un espécimen con un tamaño similar al anillo de corte de modo que se pueda sacar la muestra y procedemos a insertar el anillo de corte (Ver Figura 8).

Figura 8. Extracción espécimen



Fuente: *Registro Propio*

Como se observa en las Tablas 5 y 6 se calcula el contenido de humedad de la muestra antes de realizar el ensayo y después de que la muestra ha alcanzado su resistencia pico (es decir al final del ensayo).

- **MUESTRA AL INICIO DEL ENSAYO:**

Tabla 5. Datos de la muestra al inicio del ensayo con $V_c = 1$ mm/min y $\sigma_c = 3,48$ Kpa

Área (cm ²):	28,15
ALT. (cm):	2,32
peso anillo (gr):	230
DIAM. (cm):	5,99
Ww (gr):	7,8
Ws (gr):	26
W (%):	30%

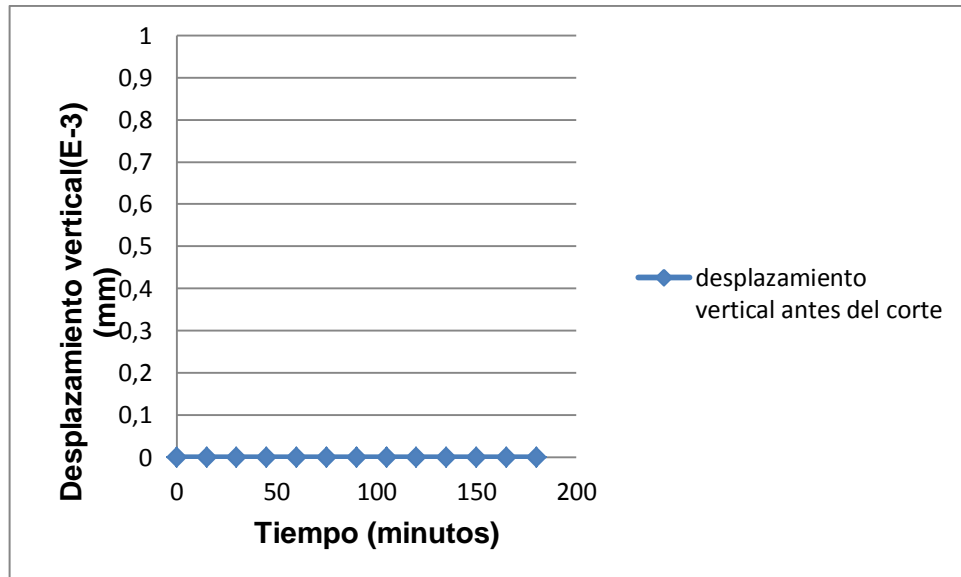
- **MUESTRA AL FINAL DEL ENSAYO:**

Tabla 6. Datos de la muestra al final del ensayo con $V_c = 1$ mm/min y $\sigma_c = 3,48$ Kpa

Ww (gr):	30,4
Ws (gr):	79,2
w (%):	38,38%

- La muestra se introduce en la caja de corte directo y esta se monta en la maquina de corte haciendo el respectivo ajuste de tornillos, se instala el micrómetro para deformación vertical, se inunda la muestra con agua de 2 a 4 horas, y se aplica una carga normal de 3,48 Kpa (1Kg)
- Se toman lecturas de desplazamiento vertical en el tiempo antes de realizar el ensayo de corte como se observa en la Figura 9.

Figura 9. Datos de la etapa de consolidación antes del corte a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_c = 1$ mm/min

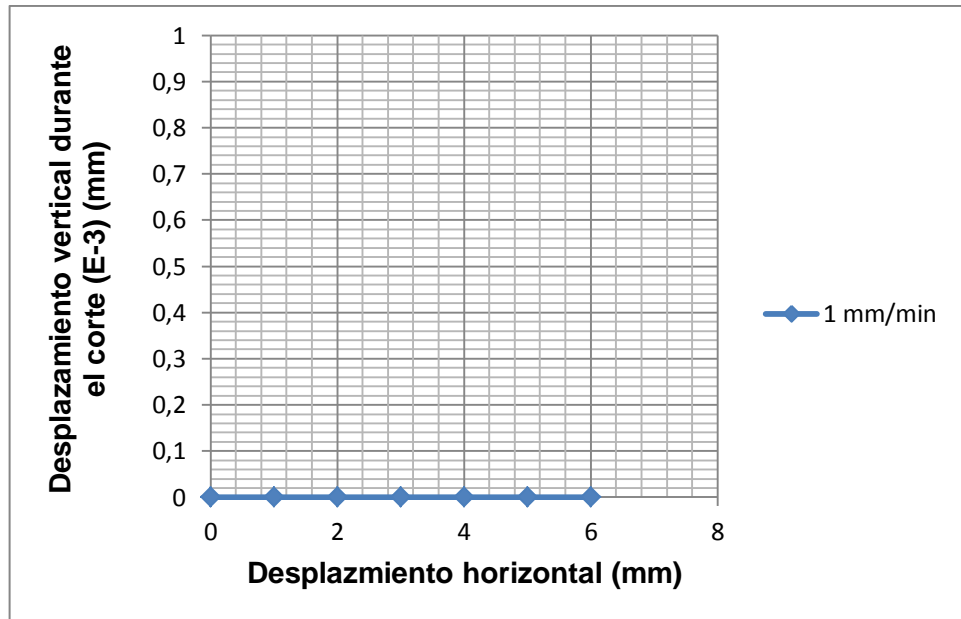


Fuente: Registro Propio

- **FASE DE CORTE:**

Se toman lecturas del desplazamiento vertical en el tiempo durante el corte (estas lecturas de tiempo se convierten a lecturas de desplazamiento horizontal) como se puede observar en la Figura 10.

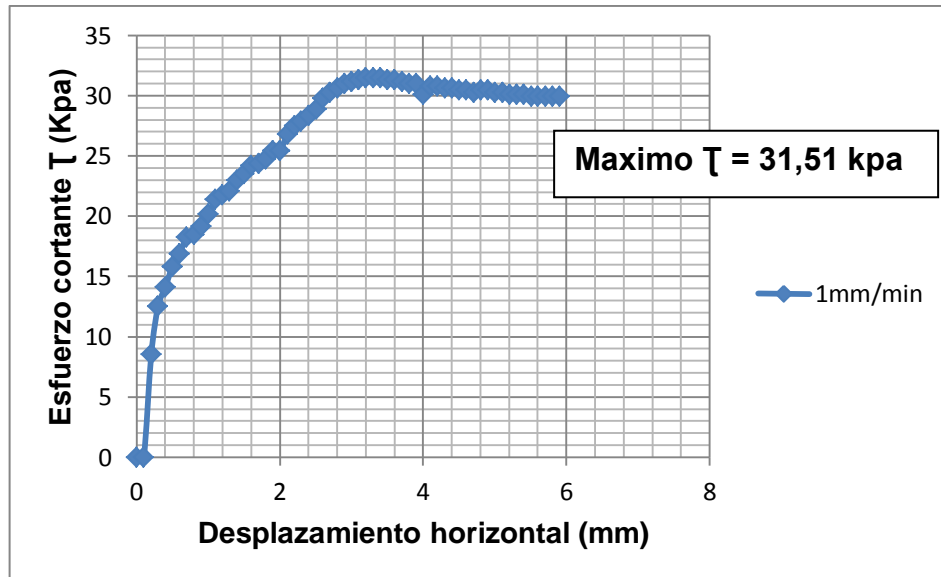
Figura 10. Datos de la etapa de expansión-compresión durante el corte a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_c = 1$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

- Se toman lecturas de la fuerza de corte que resiste la muestra en el desplazamiento horizontal, con ayuda de estas lecturas obtenemos la relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal además se obtiene el esfuerzo cortante máximo que resiste el espécimen como se observa en la Figura 11.

Figura 11. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_c = 1$ mm/min



Fuente: Registro Propio

- **CORTES SUCESIVOS**

Con el fin de determinar la envolvente de resistencia para esta tasa de desplazamiento de corte de 1mm/min, se repite los pasos anteriores dos veces, uno con un esfuerzo normal de 48,74 Kpa (14 Kg) y otro con un esfuerzo normal de 97,48 Kpa (28 Kg) respectivamente.

- **Segundo corte: esfuerzo normal de 48,74 Kpa (14 Kg):**

Se extrae y se talla un nuevo espécimen de la muestra inalterada y se introduce una nueva muestra en el anillo de corte.

En las Tablas 7 y 8 se calcula el contenido de humedad de la muestra antes de realizar el ensayo y después de que la muestra ha alcanzado su resistencia pico (es decir al final del ensayo).

- **MUESTRA AL INICIO DEL ENSAYO:**

Tabla 7. Datos de la muestra al inicio del ensayo con $V_c = 1$ mm/min y $\sigma_c = 48,74$ Kpa

Área (cm ²):	28,15
ALT. (cm):	2,32
peso anillo (gr):	230
DIAM. (cm):	5,99
Ww (gr):	16,8
Ws (gr):	49,7
W (%):	33,8%

- **MUESTRA AL FINAL DEL ENSAYO:**

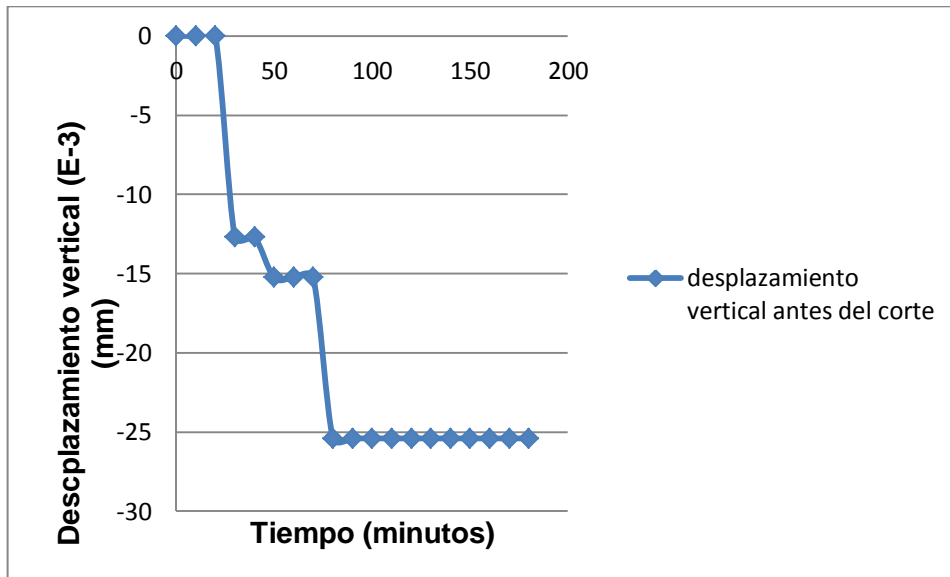
Tabla 8. Datos de la muestra al final del ensayo con $V_c = 1$ mm/min y $\sigma_c = 48,74$ Kpa

Ww (gr):	29,3
Ws (gr):	75,1
w (%):	39,01%

La muestra se introduce en la caja de corte directo y esta se monta en la maquina de corte haciendo el respectivo ajuste de tornillos, se instala el micrómetro para deformación vertical, se inunda la muestra con agua de 2 a 4 horas, y se aplica un esfuerzo normal de 48,74 Kpa (14Kg).

Se toman lecturas del desplazamiento vertical en el tiempo antes de realizar el ensayo de corte (Ver Figura 12).

Figura 12. Datos de la etapa de consolidación antes del corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_c = 1$ mm/min

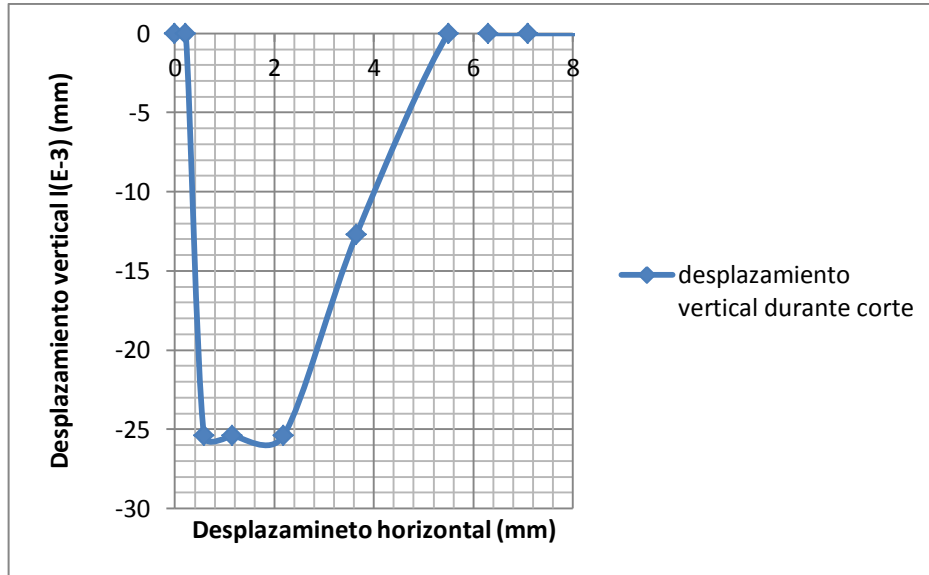


Fuente: Registro Propio

FASE DE CORTE:

- En la Figura 13, se toman lecturas del desplazamiento vertical en el tiempo durante el corte (estas lecturas de tiempo se convierten a lecturas de desplazamiento horizontal)

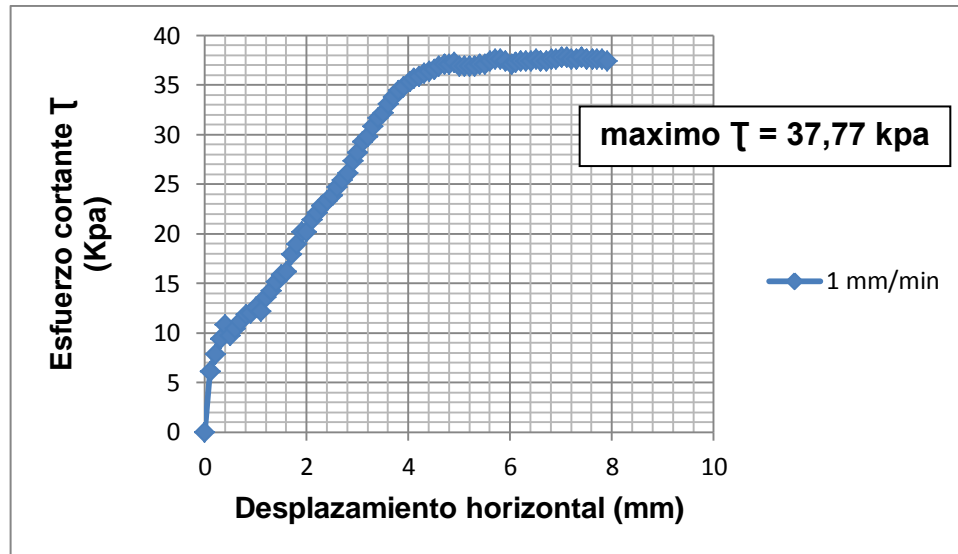
Figura 13. Datos de la etapa expansión-compresión durante el corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_c = 1$ mm/min



Fuente: Registro Propio

- Se toman lecturas de la fuerza de corte que resiste la muestra en el desplazamiento horizontal, con ayuda de estas lecturas obtenemos la relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal además se obtiene el esfuerzo cortante máximo que resiste el espécimen como se observa en la Figura 14.

Figura 14. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_c = 1$ mm/min



Fuente: Registro Propio

- **Tercer corte: esfuerzo normal de 97,48 Kpa (28 Kg):**

Se extrae y se talla un nuevo espécimen de la muestra inalterada y se introduce una nueva muestra en el anillo de corte

Como se observa en las Tablas 9 y 10, se calcula el contenido de humedad de la muestra antes de realizar el ensayo y después de que la muestra ha alcanzado su resistencia pico (es decir al final del ensayo).

- **MUESTRA AL INICIO DEL ENSAYO:**

Tabla 9. Datos de la muestra al inicio del ensayo con $V_c= 1$ mm/min y $\sigma_c=97,48$ Kpa

Área (cm ²):	28,15
ALT. (cm):	2,32
peso anillo (gr):	230
DIAM. (cm):	5,99
Ww (gr):	15,1
Ws (gr):	61,8
W (%):	24,43%

- **MUESTRA AL FINAL DEL ENSAYO:**

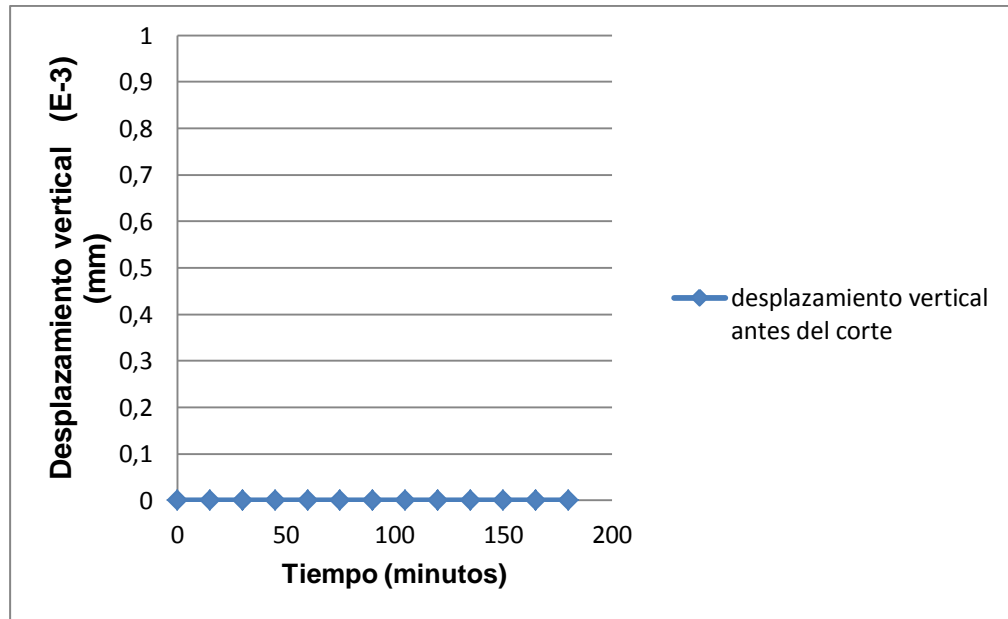
Tabla 10. Datos de la muestra al final del ensayo con $V_c= 1$ mm/min y $\sigma_c=97,48$ Kpa

Ww (gr):	28,6
Ws (gr):	75,8
w (%):	37,73%

La muestra se introduce en la caja de corte directo y esta se monta en la maquina de corte haciendo el respectivo ajuste de tornillos, se instala el micrómetro para deformación vertical, se inunda la muestra con agua de 2 a 4 horas, y se aplica un esfuerzo normal de 97,48 Kpa (28Kg).

Como se observa en la Figura 15, se toman lecturas del desplazamiento vertical en el tiempo antes de realizar el ensayo de corte.

Figura 15. Datos de la etapa de consolidación antes del corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_c = 1$ mm/min

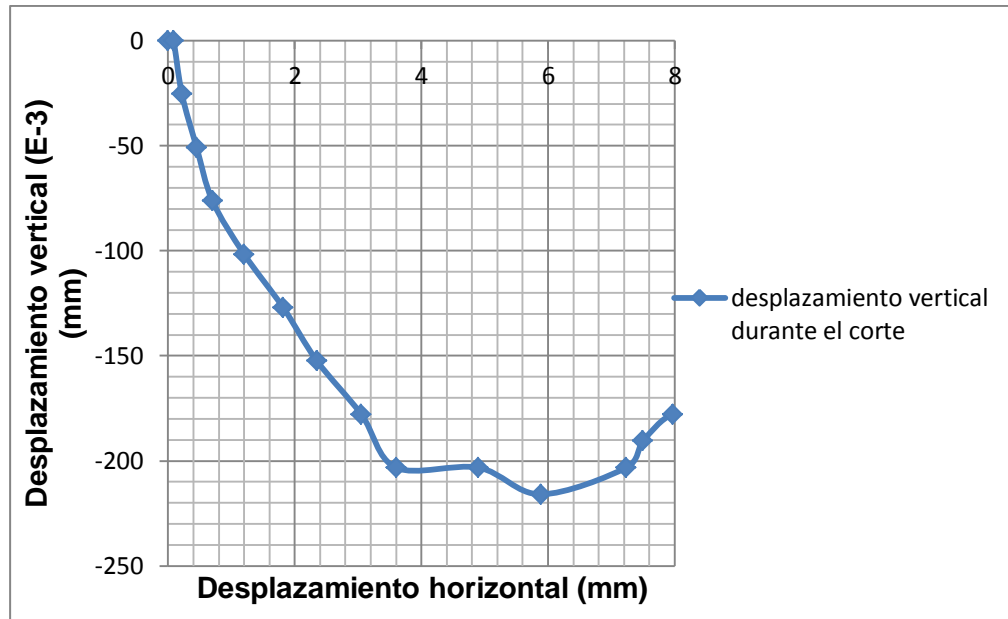


Fuente: *Registro Propio*

FASE DE CORTE:

- En la Figura 16, se toman lecturas del desplazamiento vertical en el tiempo, durante el corte (estas lecturas de tiempo se convierten a lecturas de desplazamiento horizontal)

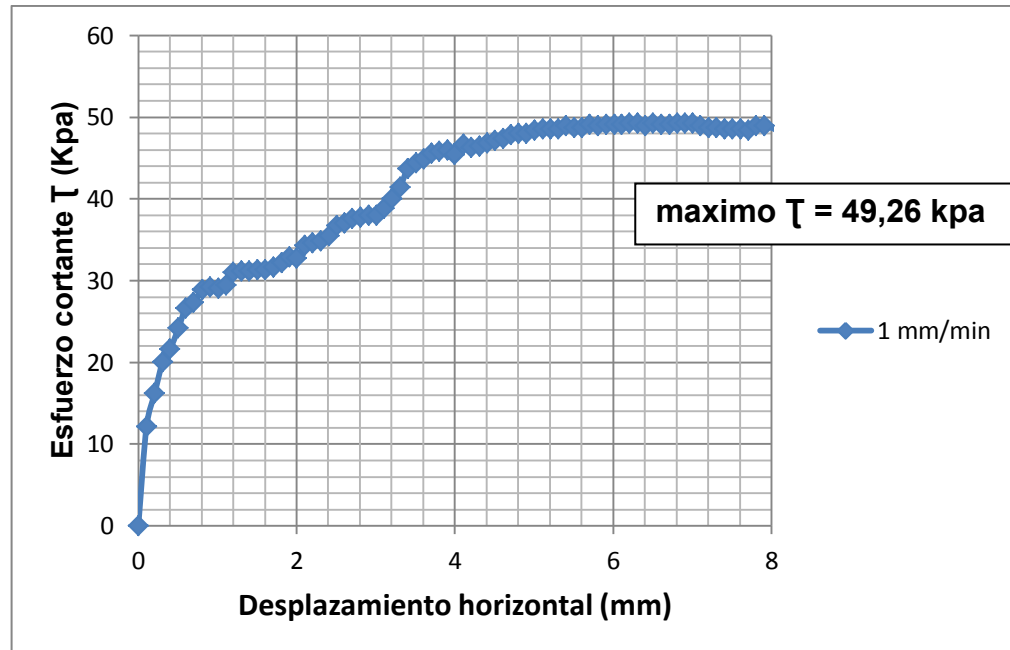
Figura 16. Datos de la etapa expansión-compresión durante el corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_c = 1$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

- Se toman lecturas de la fuerza de corte que resiste la muestra en el desplazamiento horizontal, con ayuda de estas lecturas obtenemos la relación entre el esfuerzo cortante y el desplazamiento horizontal además se obtiene el esfuerzo cortante máximo que resiste el espécimen como se observa en la Figura 17.

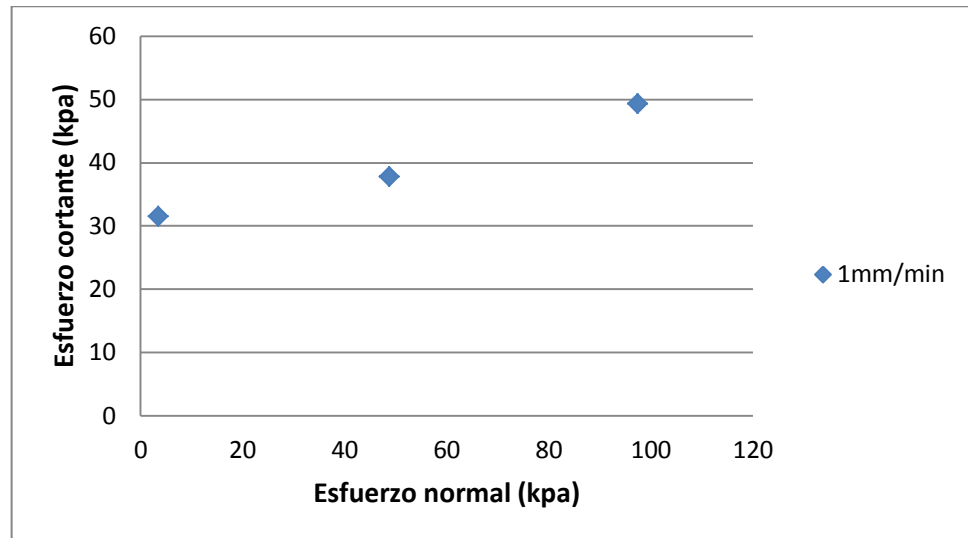
Figura 17. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_c = 1$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

- Como se observa en la Figura 18 se obtiene la envolvente de resistencia experimental para esta tasa de desplazamiento de 1mm/min, con los valores de esfuerzo máximo (31.51, 37.77, 49.26 Kpa) para cada esfuerzo de confinamiento de 3.48, 48.74 y 97.48 Kpa).

Figura 18. Envolvente de resistencia experimental para $V_c = 1$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

5. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Antes de analizar el estudio experimental es necesario comentar un fenómeno que se ve en la mayoría de los resultados de este trabajo el cual es el fenómeno de la compresión-dilatancia: al iniciar el corte se genera una etapa de compresión la cual provoca que las partículas ocupen los vacíos que hay en el suelo esta compresión se da hasta que las partículas alcanzan un máximo de compactación(no hay mas vacíos para que ocupen las partículas) , a partir de este máximo comienza una etapa de dilatación también llamada cabalgamiento de partícula, la cual consiste en un fenómeno de giro que tiene la partícula generando así una cambio en el volumen del suelo (Ver Figura 19).

Figura 19. Fenómeno cabalgamiento de partícula



Fuente: *Registro Propio*

Cuando se aplica tensión de corte, la deformación resultante se acompaña siempre de un cambio de volumen, que se conoce como dilatancia. Este cambio de volumen inducido por el corte es el resultado de dos modos contrapuestos de movimiento de las partículas, a saber, el deslizamiento hacia abajo y vuelco (Dafalias, 1993).

5.1 ESTUDIO PARA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE DE 0,01 (mm/min)

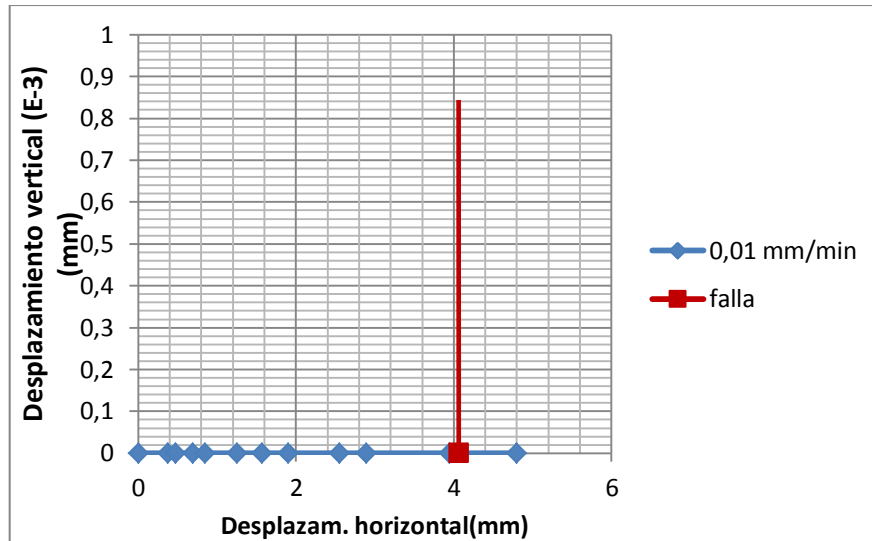
Las figuras 20 y 21 muestran las dos etapas del estudio experimental del ensayo a saber, la deformación vertical en el desplazamiento horizontal seguida de la evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal. Como se puede observar en la figura 20, después de la aplicación de esfuerzo normal de 3,48 kpa y la consolidación respectiva, la muestra fue sometida a una tasa de desplazamiento de corte de 0,01 mm/min que corresponde a un desplazamiento vertical en el desplazamiento horizontal constante e igual a cero, además no hay etapa de compresión o dilatancia por lo tanto no se puede decir en que etapa esta ubicada la falla. Como se muestra en la figura 21 durante el corte el esfuerzo cortante aumento hasta un valor máximo de 9,051 kpa tras 4,07 mm de desplazamiento horizontal, este esfuerzo máximo se desarrollo en un amplio desplazamiento horizontal como lo hacen los suelos blandos y dúctiles.

Por otro lado como se puede observar en la figura 22 al realizar el mismo ensayo pero con un esfuerzo normal de 48,74 la muestra únicamente se comprime hasta alcanzar un valor de desplazamiento vertical igual a $-25,4E-3$ mm, localizándose la falla en esta etapa de compresión; en cuanto al esfuerzo cortante este aumenta suavemente en función del desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor de 10,966 kpa (Ver figura 23).

Como se puede observar en la Figura 24 al utilizar un esfuerzo normal de 97,48 kpa la muestra únicamente se comprime hasta alcanzar un valor de desplazamiento vertical igual a $-76,2E-3$ mm, localizándose la falla en esta etapa de compresión; la Figura 25 muestra que el esfuerzo cortante aumenta en función de desplazamiento horizontal de manera suave hasta alcanzar un valor de 16,710 kpa.

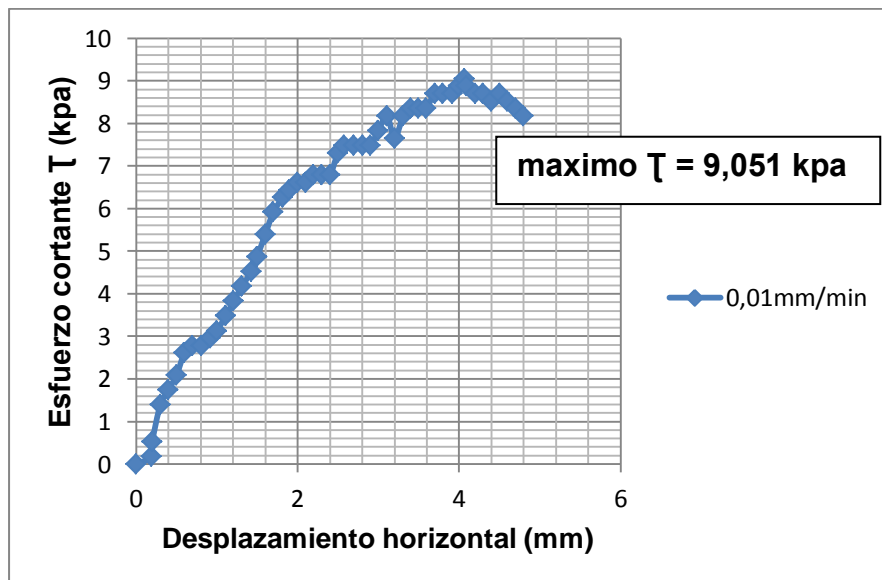
- **Primer corte: esfuerzo normal de 3,48 Kpa (1 Kg):**

Figura 20. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_c = 0,01$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

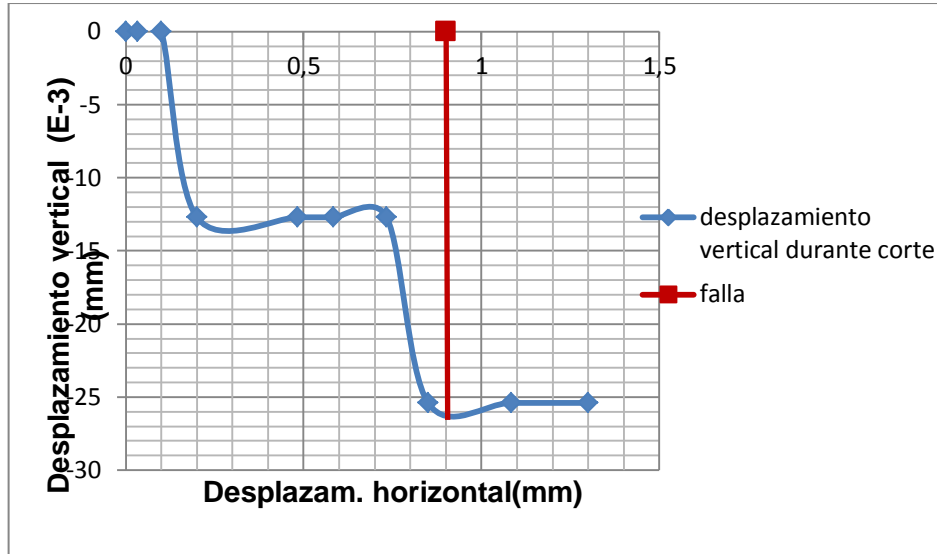
Figura 21. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_c = 0,01$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

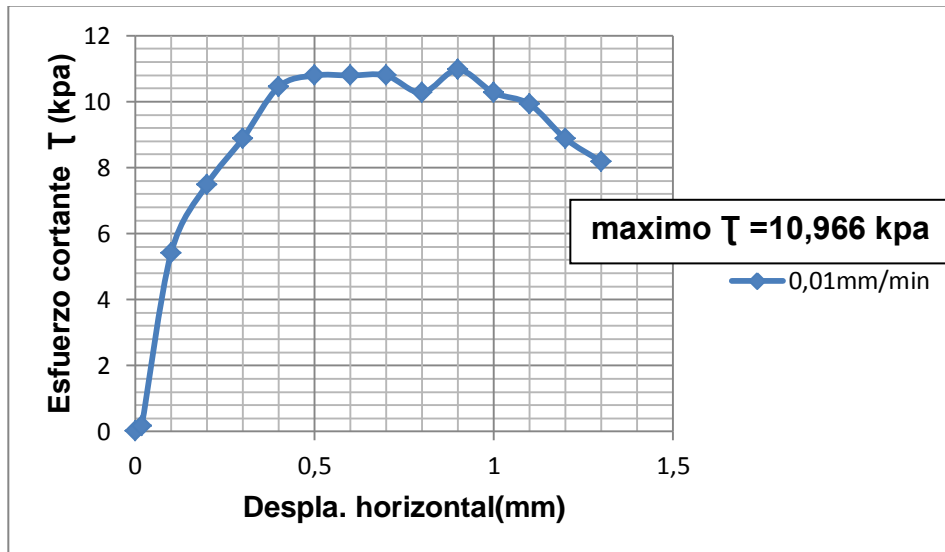
- **segundo corte: esfuerzo normal de 48,74 Kpa (14 Kg):**

Figura 22. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_c = 0,01$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

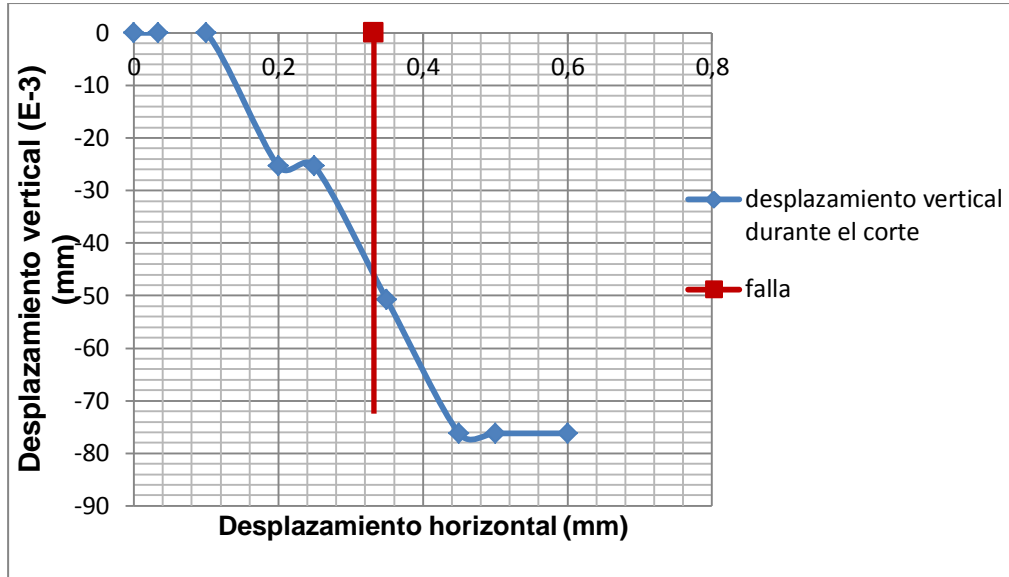
Figura 23. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_c = 0,01$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

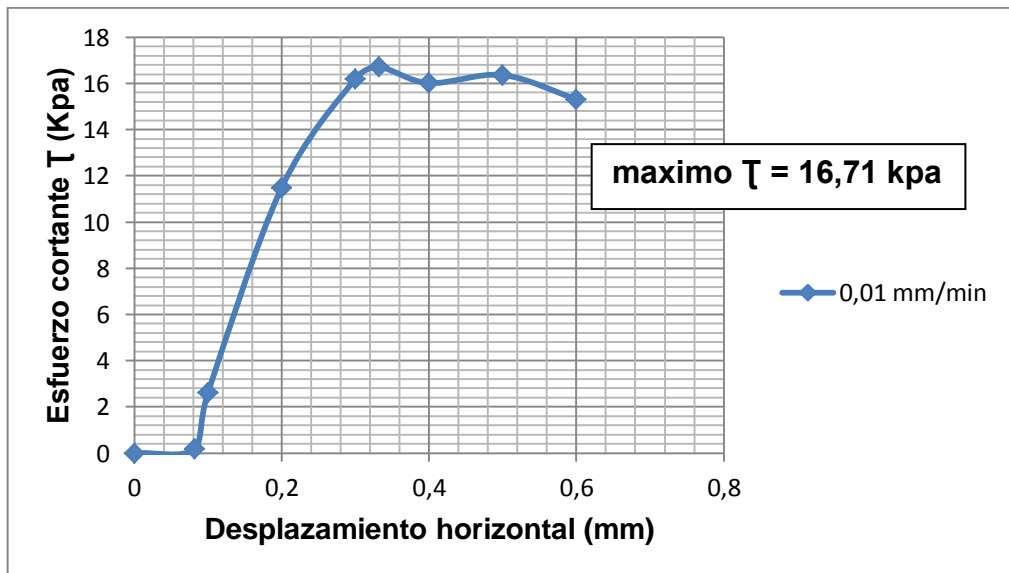
- Tercer corte: esfuerzo normal de 97,48 Kpa (28 Kg):

Figura 24. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_c = 0,01$ mm/min



Fuente: Registro Propio

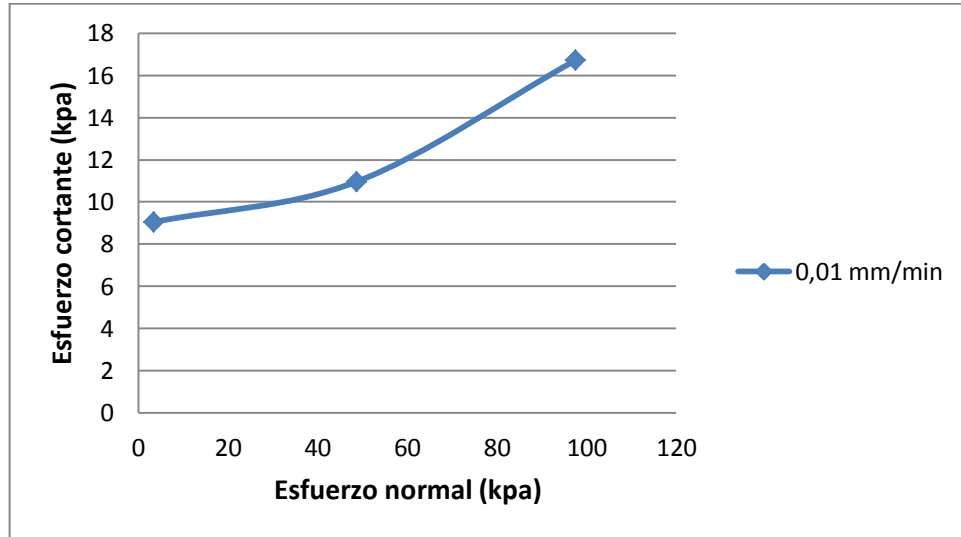
Figura 25. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_c = 0,01$ mm/min



Fuente: Registro Propio

- **Envolvente de resistencia experimental 0,01 mm/min: esfuerzos cortante máximos de 9.05, 10.97, 16.71 kpa**

Figura 26. Envolverte de resistencia experimental para $V_C = 0,01$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

5.2 ESTUDIO PARA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE DE 0,05 (mm/min)

Las Figuras 27 y 28 muestran las dos etapas del estudio experimental del ensayo a saber, la deformación vertical en el desplazamiento horizontal seguida de la evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal. Como se puede observar en la Figura 27, después de la aplicación de esfuerzo normal de 3,48 kpa y la consolidación respectiva, la muestra fue sometida a una tasa de desplazamiento de corte de 0,05 mm/min, la muestra comienza a comprimirse, sometiéndose a importantes desplazamientos verticales a medida que se da el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor de desplazamiento vertical igual

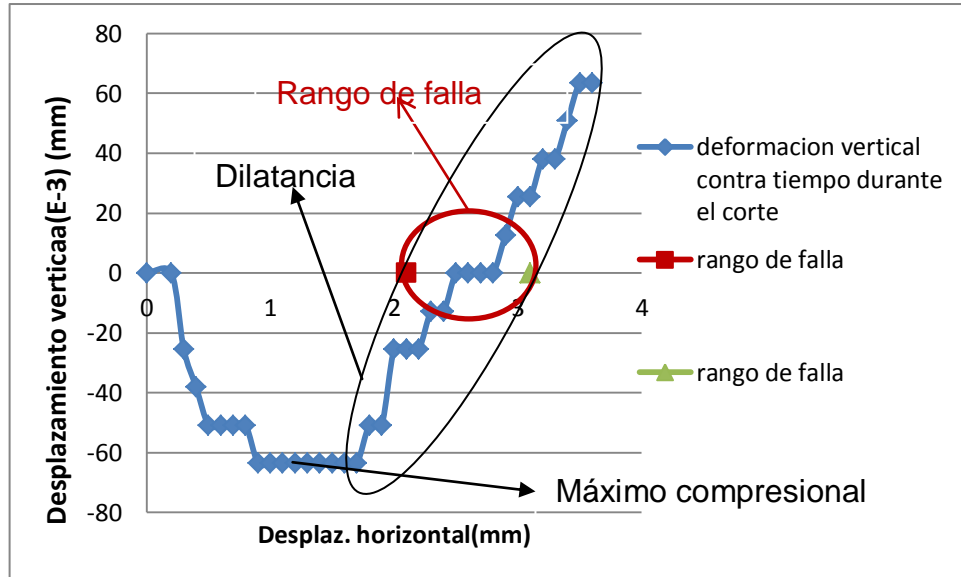
a $-63,5E-3$ mm (máximo compresional), finalmente se genera una etapa de dilatación la cual alcanza un valor de desplazamiento vertical de $63E-3$ mm, cabe anotar que el fenómeno de dilatación se presenta antes de la falla y de igual forma este fenómeno se desarrolla a lo largo del rango de falla; Como se muestra en la Figura 28 durante el corte el esfuerzo cortante aumenta de manera suave hasta un valor máximo de 25,41 kpa tras 3,1 mm de desplazamiento horizontal, la curva que describe el esfuerzo al corte es la que se desarrolla en un suelo blando y dúctil.

Por otro lado como se puede observar en la Figura 29 al realizar el mismo ensayo pero con un esfuerzo normal de 48,74 kpa la muestra comienza a comprimirse, sometiéndose a importantes desplazamientos verticales a medida que se da el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor de desplazamiento vertical igual a $-304,8 E-3$ mm, finalmente se genera una etapa de dilatación la cual alcanza un valor de desplazamiento vertical de $-101,6E-3$ mm, cabe anotar que el fenómeno de dilatación se presenta antes de la falla; en cuanto al esfuerzo cortante este aumenta suavemente en función del desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor de 31,158 kpa tras 4,3 mm de desplazamiento horizontal (Ver Figura 30).

Como se puede observar en la Figura 31 la muestra comienza a comprimirse, sometiéndose a importantes desplazamientos verticales a medida que se da el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor de desplazamiento vertical igual a $-317,5E-3$ mm, finalmente se genera una etapa de dilatación la cual alcanza un valor de desplazamiento vertical de $-203,2E-3$ mm, localizándose la falla en la etapa de dilatación; la Figura 32 muestra que el esfuerzo cortante aumenta en función de desplazamiento horizontal de manera suave hasta alcanzar un valor de 35,161 kpa tras 4,9 mm de desplazamiento horizontal.

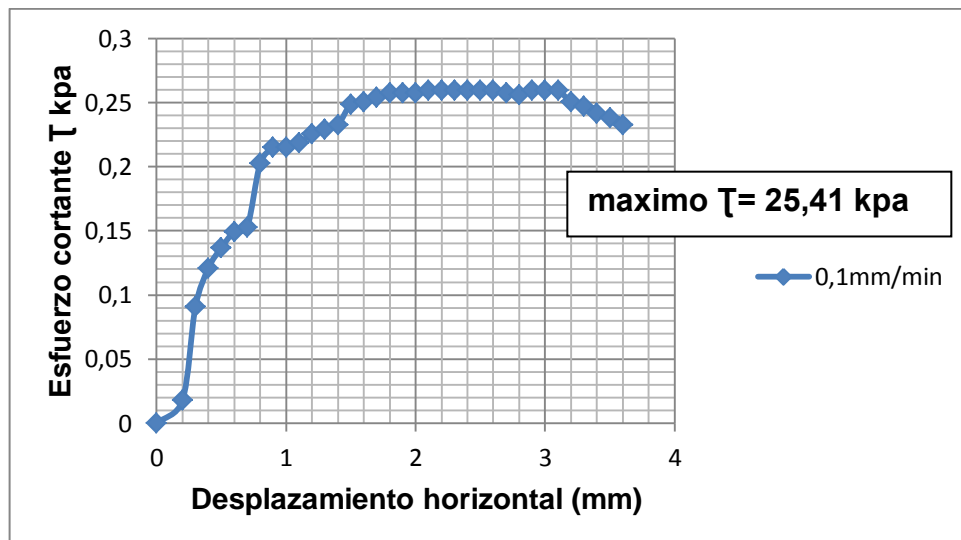
- **Primer corte: esfuerzo normal de 3,48 Kpa (1 Kg):**

Figura 27. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_C = 0,05$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

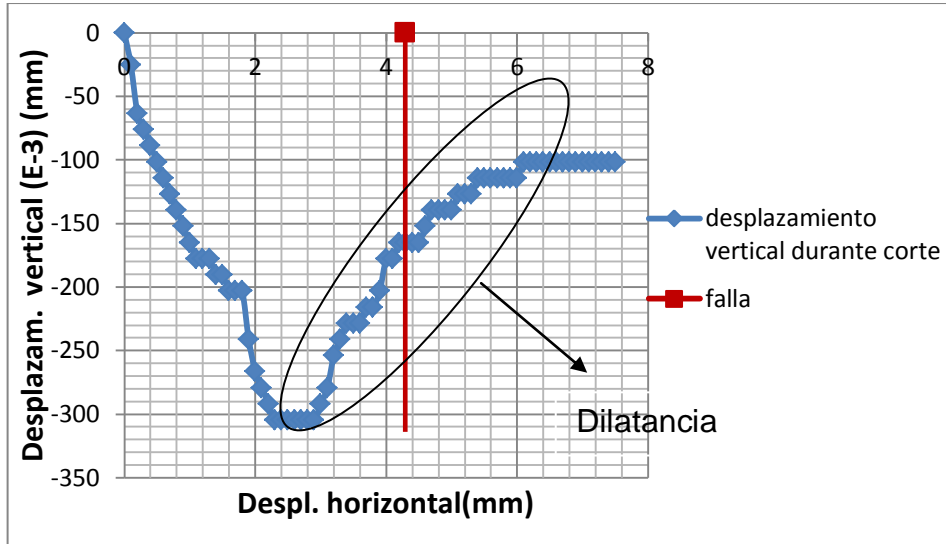
Figura 28. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_C = 0,05$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

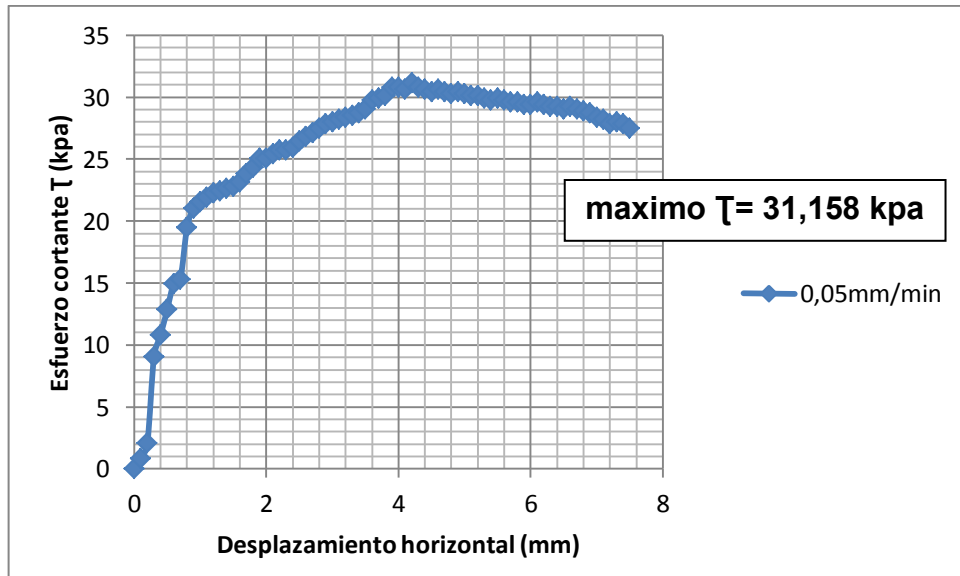
- segundo corte: esfuerzo normal de 48,74 Kpa (14 Kg):

Figura 29. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_c = 0,05$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

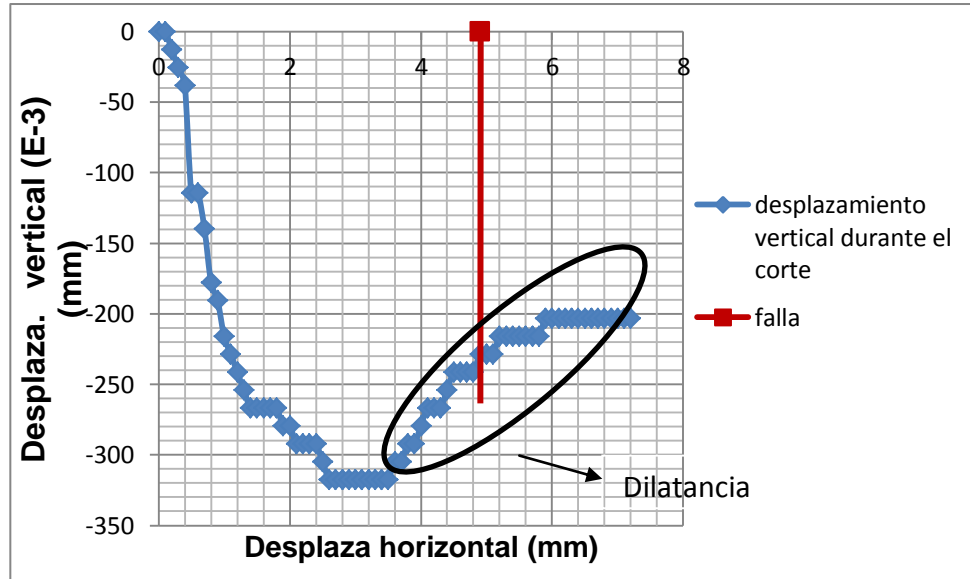
Figura 30. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_c = 0,05$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

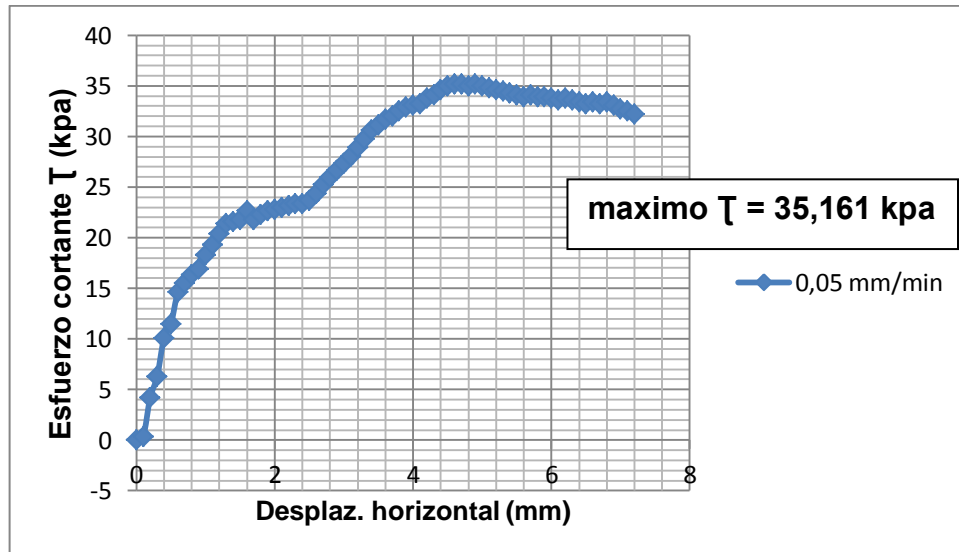
- Tercer corte: esfuerzo normal de 97,48 Kpa (28 Kg):

Figura 31. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_c = 0,05$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

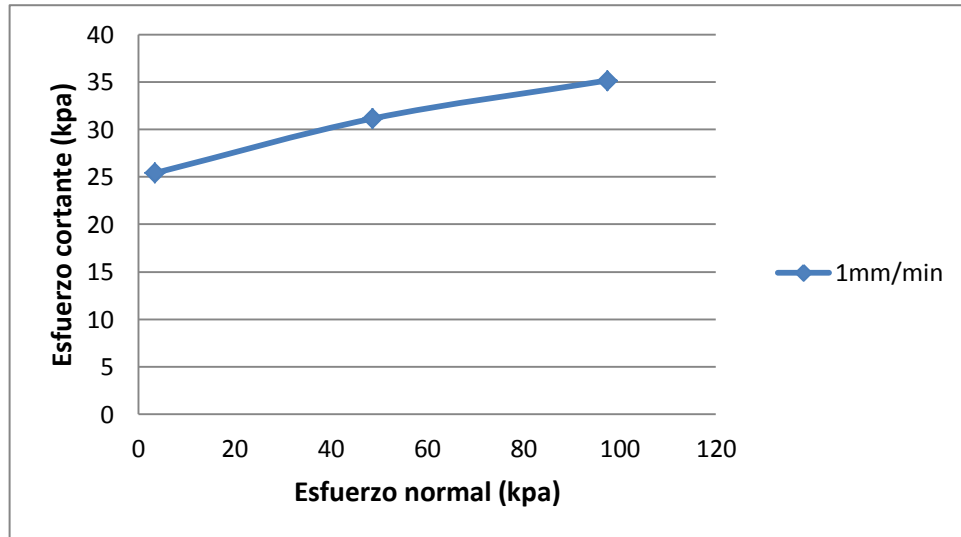
Figura 32. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_c = 0,05$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

Envolvente de resistencia experimental 0,05 mm/min: esfuerzos cortante máximos de 25.41, 31.16, 35.16 kpa

Figura 33. Envolvente de resistencia experimental para $V_C = 0,05$ mm/min



Fuente: Registro Propio

5.3 ESTUDIO PARA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE DE 0,1(mm/min)

Las Figuras 34 y 35 muestran las dos etapas del estudio experimental del ensayo a saber, la deformación vertical en el desplazamiento horizontal seguida de la evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal. Como se puede observar en la Figura 34, después de la aplicación de esfuerzo normal de 3,48 kpa y la consolidación respectiva, la muestra fue sometida a una tasa de desplazamiento de corte de 0,1 mm/min, a continuación la muestra comienza a comprimirse, sometiéndose a importantes desplazamientos verticales a medida que se da el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor de desplazamiento

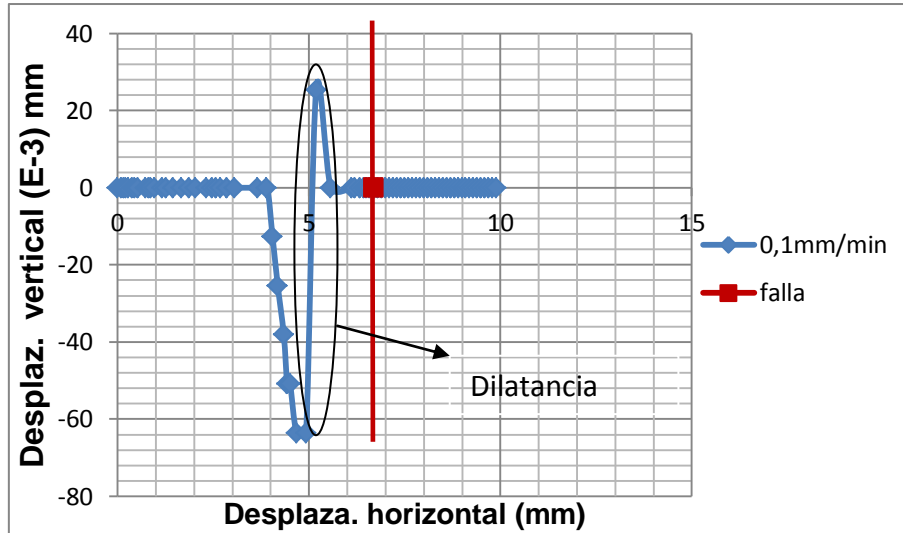
vertical igual a -63 E-3 mm , finalmente se genera una etapa de dilatancia la cual alcanza un valor de desplazamiento vertical de $25,4 \text{ E-3 mm}$, cabe anotar que el fenómeno de dilatancia se presenta antes de la falla; Como se muestra en la Figura 35 durante el corte el esfuerzo cortante aumento de manera suave hasta un valor máximo de $32,20 \text{ kpa}$ tras $6,71 \text{ mm}$ de desplazamiento horizontal, la curva que describe el esfuerzo al corte es la que se desarrolla en un suelo blando y dúctil.

Por otro lado como se puede observar en la Figura 36 al realizar el mismo ensayo pero con un esfuerzo normal de $48,74 \text{ kpa}$ la muestra comienza a comprimirse, sometiéndose a importantes desplazamientos verticales a medida que se da el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor de desplazamiento vertical igual a $-266,7\text{E-3 mm}$,finalmente se genera una etapa de dilatancia la cual alcanza un valor de desplazamiento vertical de -127E-3 mm , localizándose la falla en la etapa de expansión; en cuanto al esfuerzo cortante este aumenta suavemente en función del desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor de $35,34 \text{ kpa}$ tras $7,6 \text{ mm}$ de desplazamiento horizontal (Ver Figura 37).

Como se puede observar en la Figura 38 la muestra comienza a comprimirse, sometiéndose a importantes desplazamientos verticales a medida que se da el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor de desplazamiento vertical igual a $-228,6\text{E-3 mm}$,finalmente se genera una etapa de dilatancia la cual alcanza un valor de desplazamiento vertical de -129E-3 mm , localizándose la falla en la etapa de expansión; la Figura 39 muestra que el esfuerzo cortante aumenta en función de desplazamiento horizontal de manera suave hasta alcanzar un valor de $43,52 \text{ kpa}$ tras 4 mm de desplazamiento horizontal.

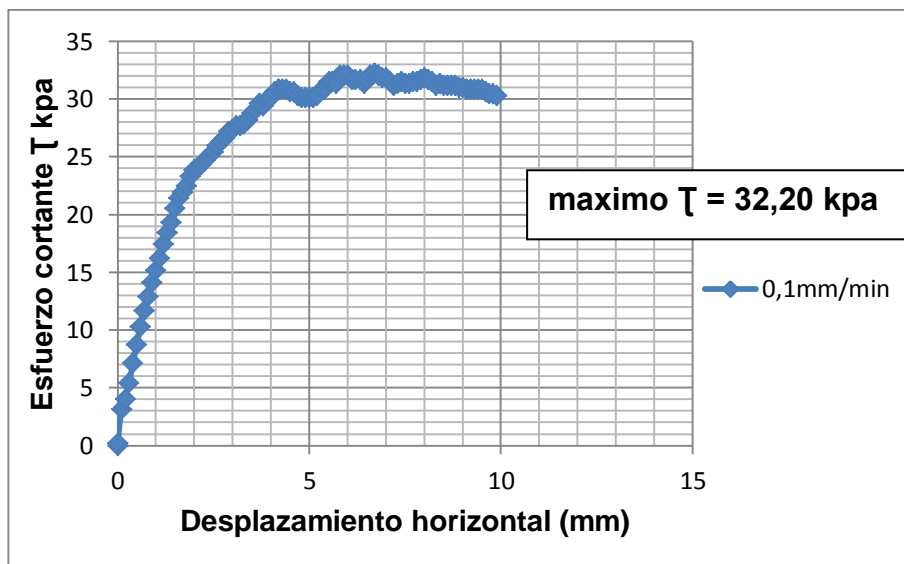
- **Primer corte: esfuerzo normal de 3,48 Kpa (1 Kg):**

Figura 34. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_c = 0,1$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

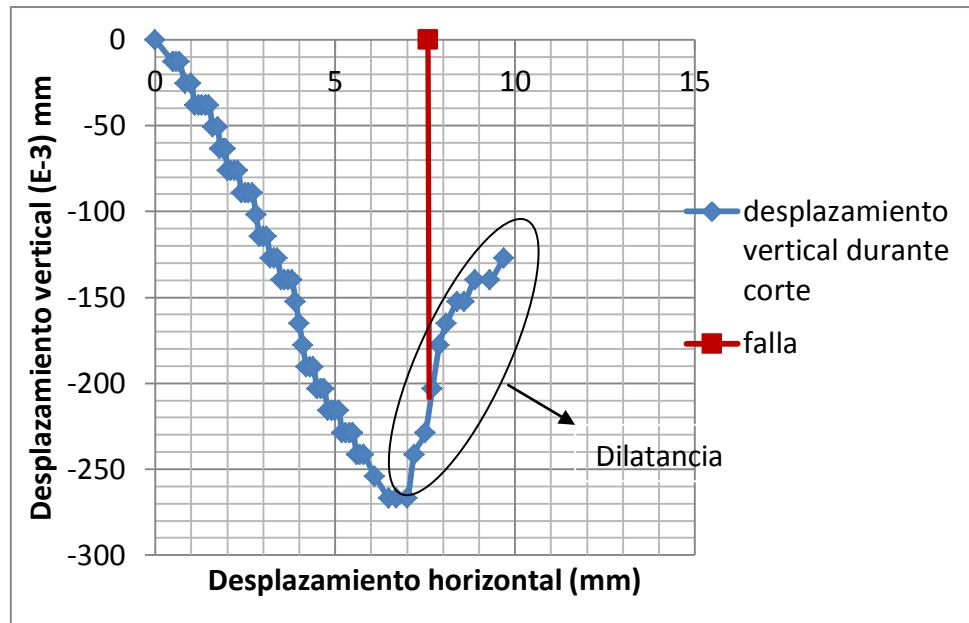
Figura 35. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_c = 0,1$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

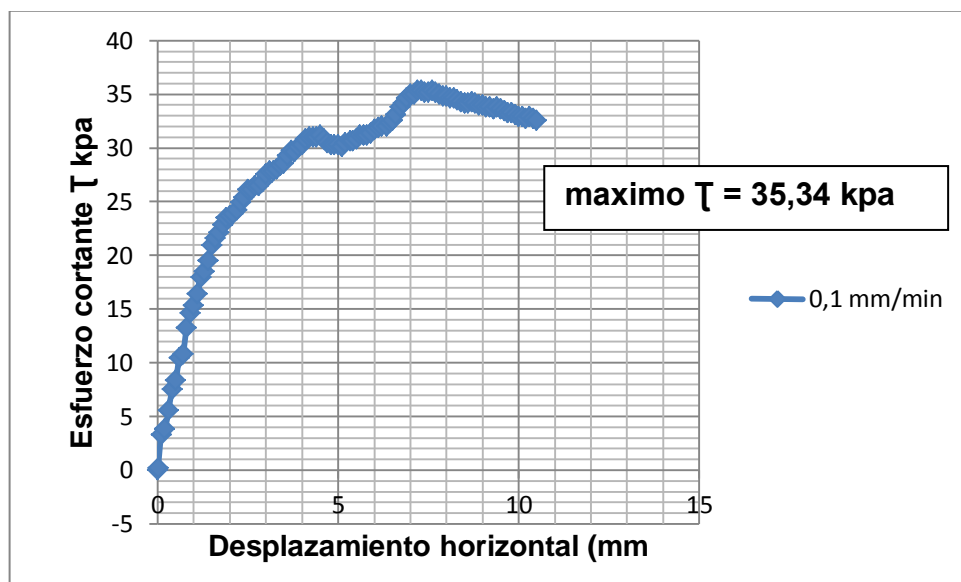
- segundo corte: esfuerzo normal de 48,74 Kpa (14 Kg):

Figura 36. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_c = 0,1$ mm/min



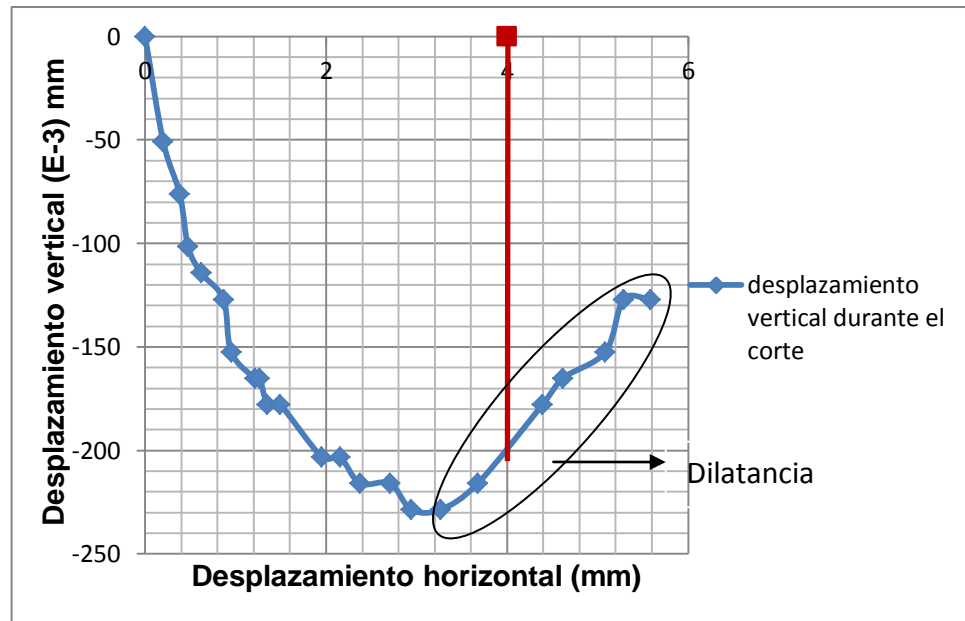
Fuente: *Registro Propio*

Figura 37. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_c = 0,1$ mm/min



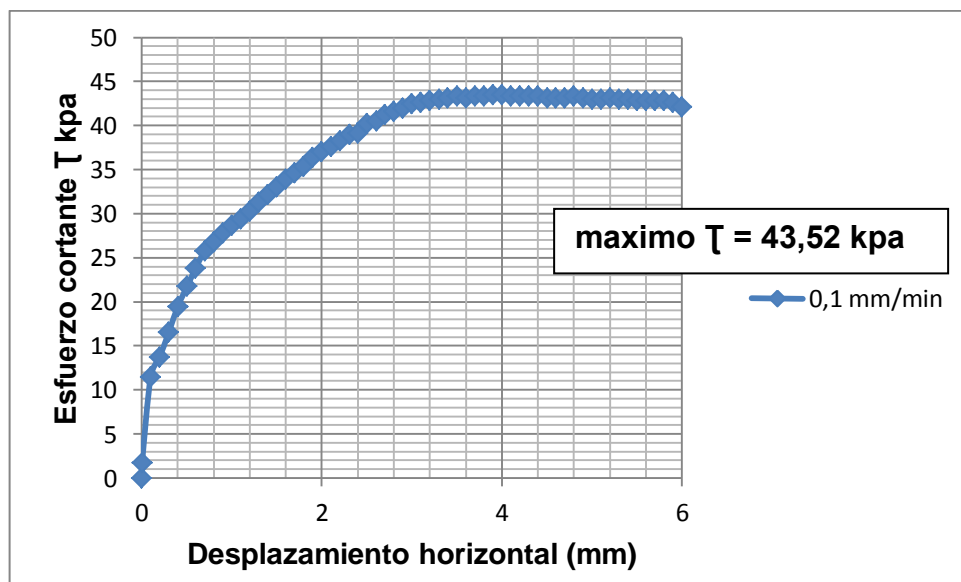
- Tercer corte: esfuerzo normal de 97,48 Kpa (28 Kg):

Figura 38. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_c = 0,1$ mm/min



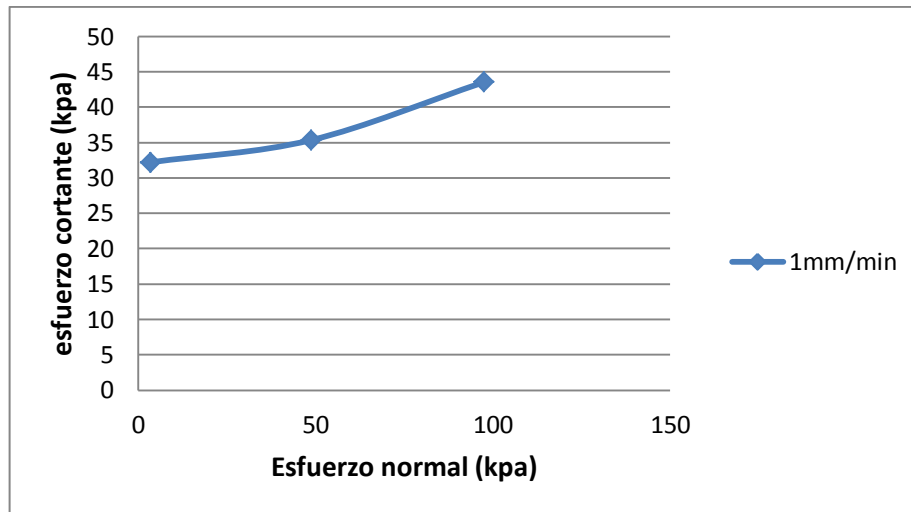
Fuente: *Registro Propio*

Figura 39. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_c = 0,1$ mm/min



Envolvente de resistencia experimental 0,1 mm/min: esfuerzos cortantes máximos de 32.2, 35.34, 43.52 kpa.

Figura 40. Envolvente de resistencia experimental para $V_c = 0,1$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

5.4 ESTUDIO PARA TASA DE DESPLAZAMIENTO DE CORTE DE 1 (mm/min)

Como se puede observar en la Figura 41 , después de la aplicación de esfuerzo normal de 3,48 kpa y la consolidación respectiva, la muestra fue sometida a una tasa de desplazamiento de corte de 1 mm/min, durante este corte la muestra no sufrió compresiones y dilataciones; Como se muestra en la Figura 42 durante el corte el esfuerzo cortante aumento de manera suave hasta un valor máximo de 31,50 kpa tras 3,4 mm de desplazamiento horizontal, la curva que describe el esfuerzo al corte es la que se desarrolla en un suelo blando y dúctil.

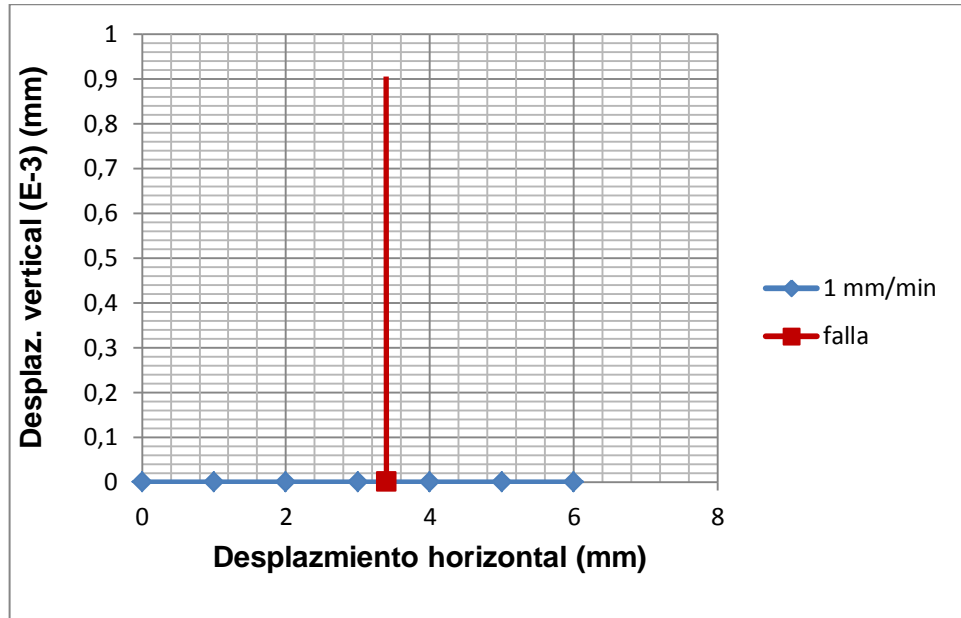
Por otro lado como se puede observar en la Figura 43 al realizar el mismo ensayo pero con un esfuerzo normal de 48,74 kpa la muestra comienza a comprimirse,

sometiéndose a desplazamientos verticales a medida que se da el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor de desplazamiento vertical igual a $-25,4E-3$ mm, finalmente se genera una etapa de dilatación la cual es en magnitud igual a la de compresión, localizándose la falla después de la etapa de dilatación; en cuanto al esfuerzo cortante este aumenta suavemente en función del desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor de $37,7$ kpa tras $7,4$ mm de desplazamiento horizontal (Ver Figura 44).

Como se puede observar en la Figura 45 la muestra comienza a comprimirse, sometiendo a importantes desplazamientos verticales a medida que se da el desplazamiento horizontal hasta alcanzar un valor de desplazamiento vertical igual a $-215,9E-3$ mm, finalmente se genera una etapa de dilatación la cual alcanza un valor de desplazamiento vertical de $-165,1E-3$ mm, localizándose la falla en la etapa de dilatación; la Figura 46 muestra que el esfuerzo cortante aumenta en función de desplazamiento horizontal de manera suave hasta alcanzar un valor de $49,26$ kpa tras 7 mm de desplazamiento horizontal.

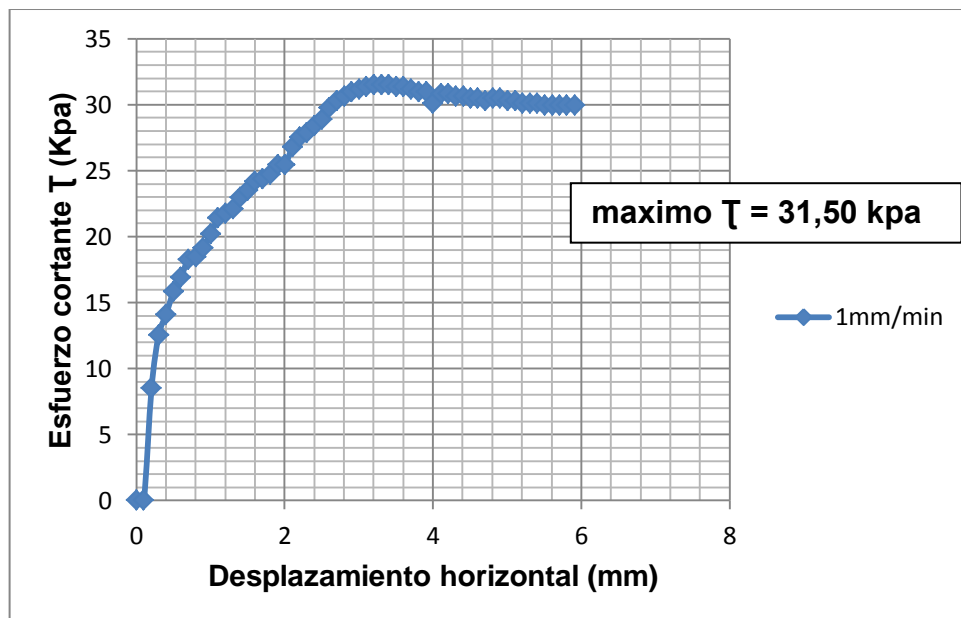
Primer corte: esfuerzo normal de 3,48 Kpa (1 Kg):

Figura 41. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_c = 1$ mm/min



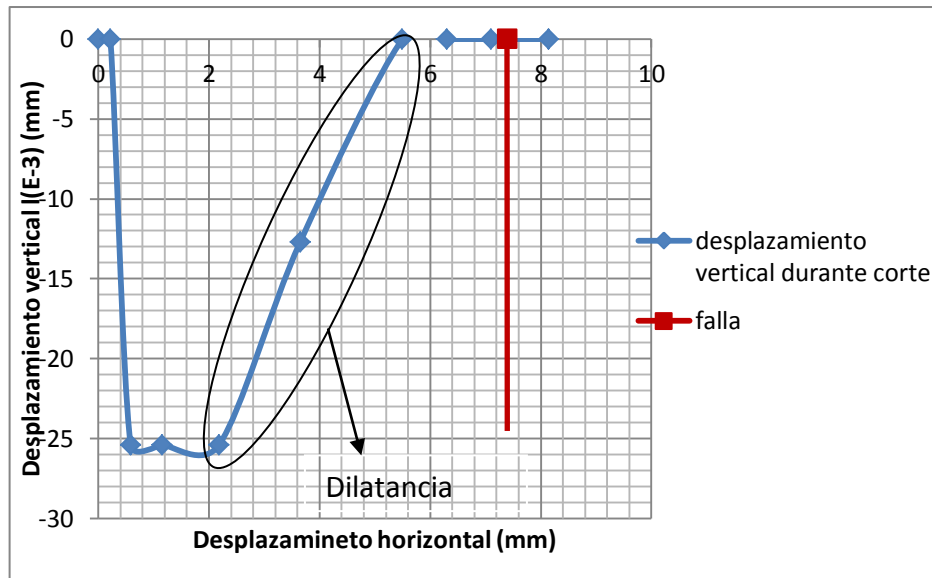
Fuente: *Registro Propio*

Figura 42. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 3,48 Kpa y $V_c = 1$ mm/min



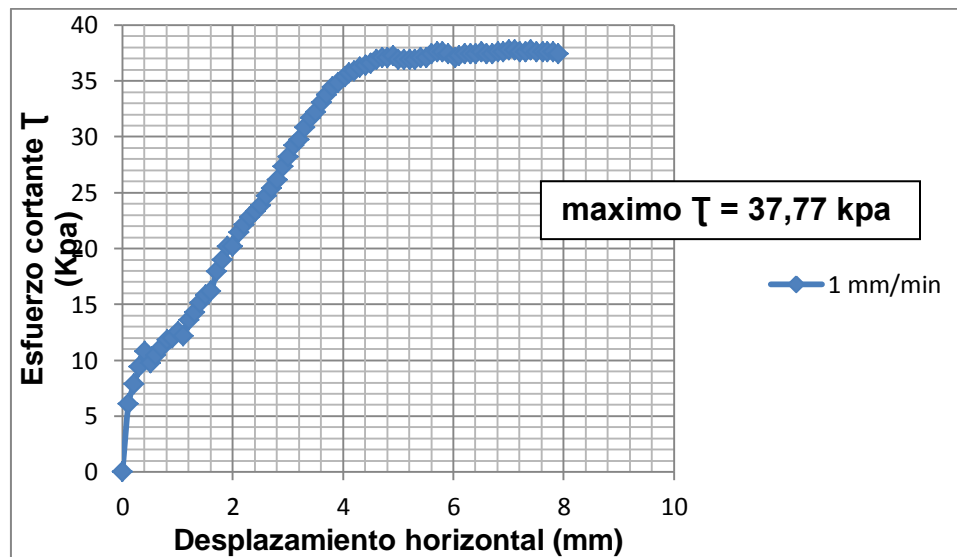
- segundo corte: esfuerzo normal de 48,74 Kpa (14 Kg):

Figura 43. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 1$ mm/min



Fuente: Registro Propio

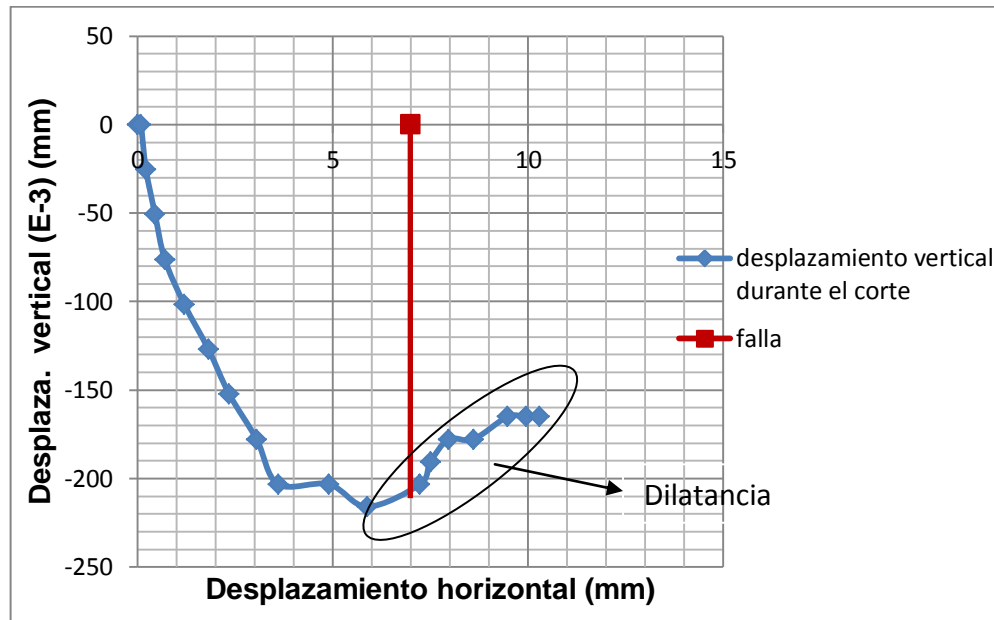
Figura 44. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 1$ mm/min



Fuente: Registro Propio

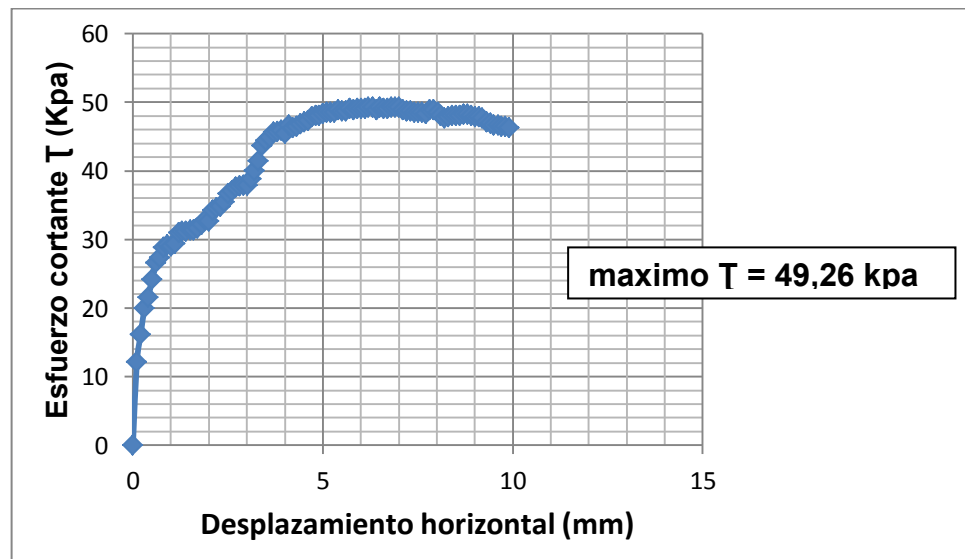
- Tercer corte: esfuerzo normal de 97,48 Kpa (28 Kg):

Figura 45. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_c = 1$ mm/min



Fuente: Registro Propio

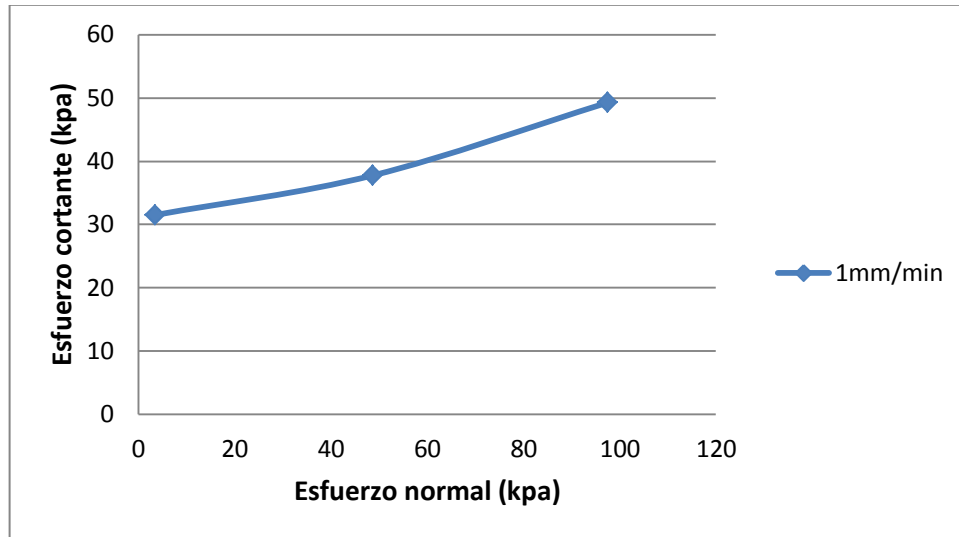
Figura 46. Relación entre el esfuerzo de corte y el desplazamiento horizontal a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_c = 1$ mm/min



Fuente: Registro Propio

Envolvente de resistencia experimental 1 mm/min: con esfuerzos cortantes máximos de 31.51, 37.77, 49.26 Kpa para cada esfuerzo de confinamiento de 3.48, 48.74 y 97.48 Kpa.

Figura 47. Envolverte de resistencia experimental para $V_c = 1$ mm/min



Fuente: Registro Propio

6. INTERPRETACION DE RESULTADOS

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos de corte para diferentes tasas de desplazamiento, se procede a realizar un análisis de la variación de los parámetros de resistencia del suelo por efecto de las tasa de desplazamiento. Se analiza la evolución de la envolvente de resistencia del material y el drenado de la muestra.

6.1 Influencia de la tasa de desplazamiento de corte en el esfuerzo cortante.

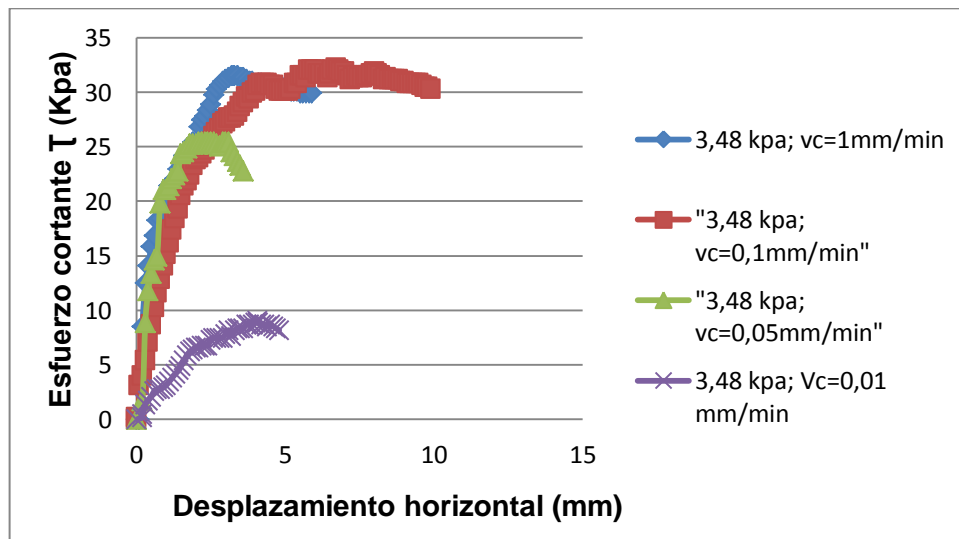
En las Figuras 49 y 50 se observa que para la muestra de suelo limo ML, la tasa de desplazamiento de corte tiene una importante influencia en la resistencia al corte, lo cual nos indica a menor tasa de desplazamiento la resistencia al corte se disminuirá para esfuerzos normales medios y altos. Para esfuerzos normales bajos no sigue la tendencia anterior como se puede observar en la figura 48. Teniendo en cuenta lo anterior se puede decir que la resistencia al corte debe suponerse cuidadosamente teniendo en cuenta que esta no solo dependerá del esfuerzo normal, sino que también dependerá de la tasa de desplazamiento de corte.

Como se puede observar en las Figuras 48, 49 y 50, la tasa de desplazamiento de corte influye en el comportamiento que tiene el suelo ya que a pequeñas tasas de desplazamiento de corte (0,01 mm/min), este comportamiento es de un suelo rígido con falla frágil y para tasas de desplazamiento de corte mayores a 0,05 mm/min este comportamiento es el de un suelo blando y dúctil. Además se puede observar que este suelo inicialmente tiene una etapa de endurecimiento y después de alcanzar el esfuerzo de corte pico tiene una etapa de ablandamiento (Ver Figuras 48, 49 y 50).

En la envolvente de Coulomb, al aplicar una carga normal mayor a la capacidad de soporte, la tasa de incremento de la resistencia disminuye como efecto de una

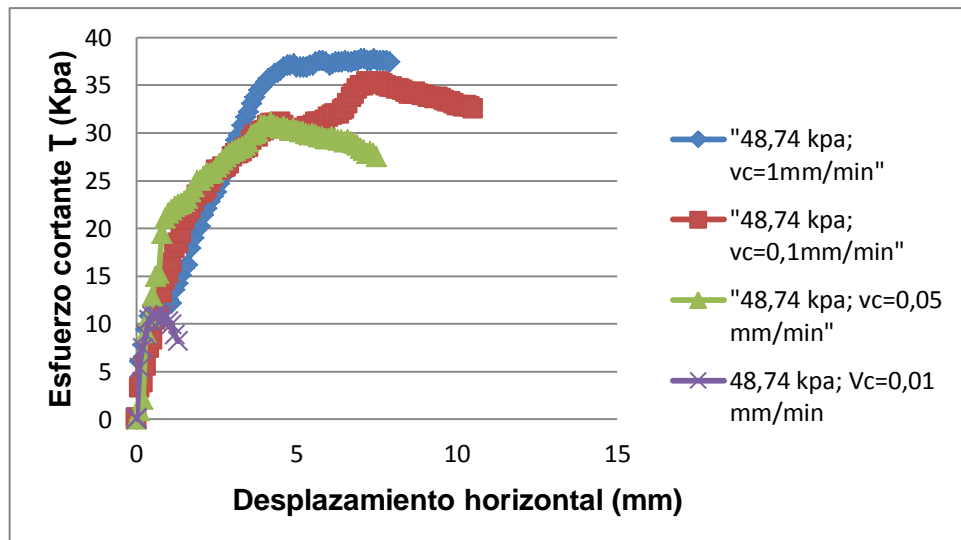
pérdida estructural (Horn *et al.*, 1995); como complemento a lo anterior se puede decir que una tasa de desplazamiento menor también disminuye la tasa de incremento de la resistencia al corte.

Figura 48. Evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal para la influencia de la tasa de desplazamiento y para esfuerzo normal de 3,48 kpa



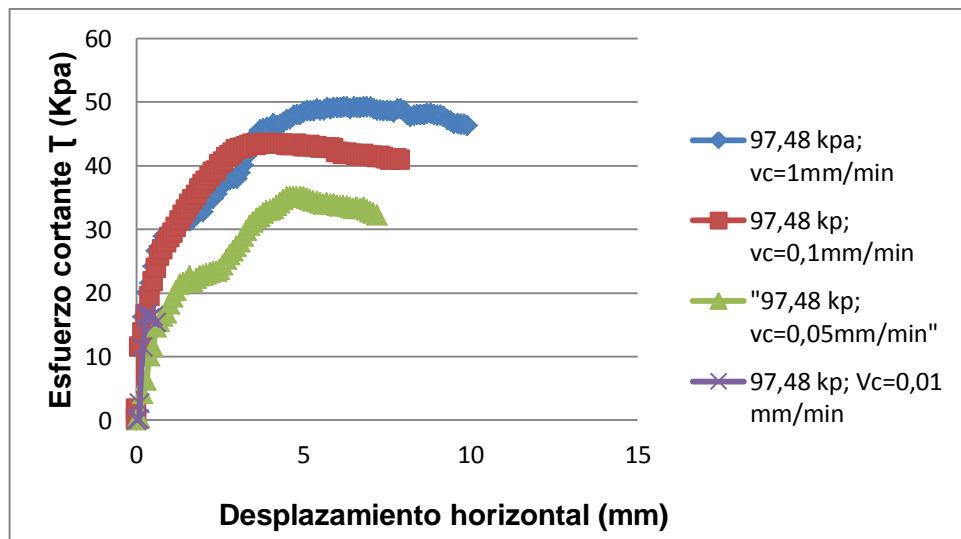
Fuente: *Registro Propio*

Figura 49. Evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal para la influencia de la tasa de desplazamiento y para esfuerzo normal de 48,74 kpa



Fuente: Registro Propio

Figura 50. Evolución del esfuerzo cortante en el desplazamiento horizontal para la influencia de la tasa de desplazamiento y para esfuerzo normal de 97,48 kpa



Fuente: Registro Propio

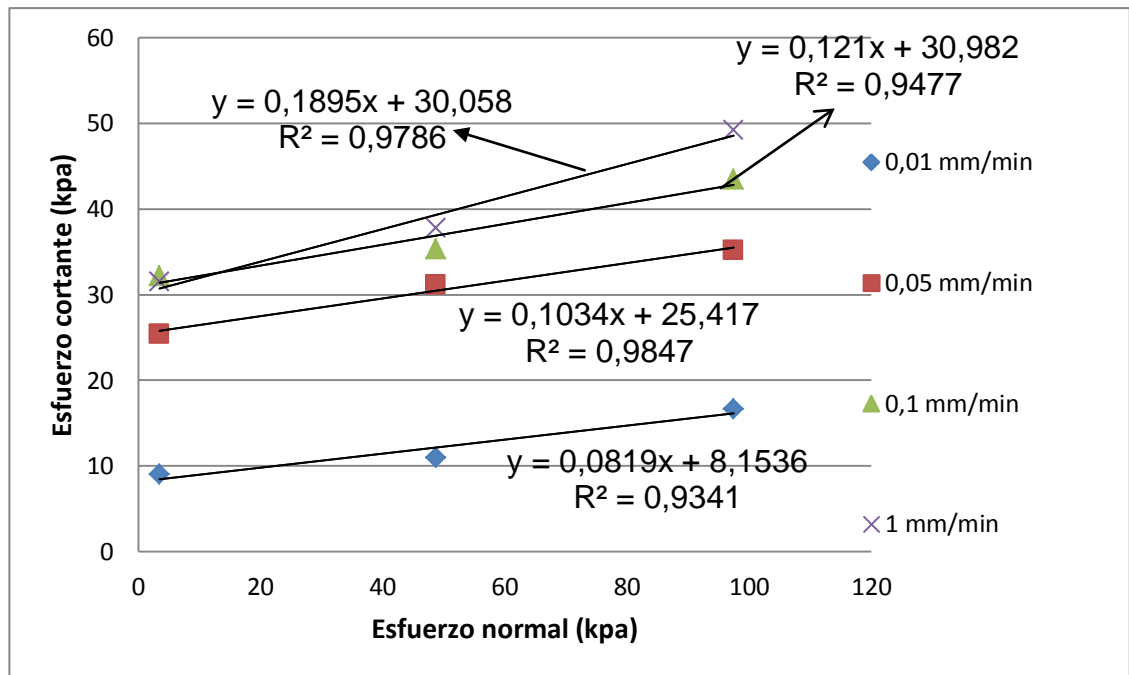
6.2 Evolución de la envolvente de resistencia para las diferentes tasas de desplazamiento. Como se puede ver en la Figura 51, se realizaron varios ensayos de corte directo con diferentes tasas de desplazamiento, al realizar estas pruebas se producen diferentes envolventes de resistencia en el suelo limo inorgánico; lo cual indica que dependiendo de la tasa de desplazamiento se tendrá una envolvente de resistencia diferente, a menor tasa de desplazamiento la envolvente de resistencia disminuirá, es decir la pendiente de la envolvente bajara, indicando una disminución en el ángulo de fricción.

Cabe anotar que la Figura 51 presente un error, ya que para velocidades altas como la de 1mm/min tienden hacia una condición no drenada (parcialmente drenada) es decir habrá un incremento de presión de poros lo que genera un esfuerzo efectivo menor al graficado:

$$\sigma'_v = \sigma_v - U ; U=0 \text{ Para condiciones drenadas}$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - \Delta U ; \sigma'_v = \text{esfuerzo efectivo verdadero} \text{ Para condiciones no drenadas}$$

Figura 51. Evolución de la envolvente de resistencia para diferentes tasas de desplazamiento



Fuente: *Registro Propio*

6.3 Influencia de la tasa de desplazamiento de corte en el ángulo de fricción.

En la Figura 51 se puede ver a simple vista que la tasa de desplazamiento de corte tiene influencia en el ángulo de fricción de la muestra; de igual manera la Figura 53 y la Tabla N° 11 nos hace ver a menor tasa de desplazamiento se produce menor ángulo de fricción, indicando menor resistencia al corte al someterse lentamente al corte.

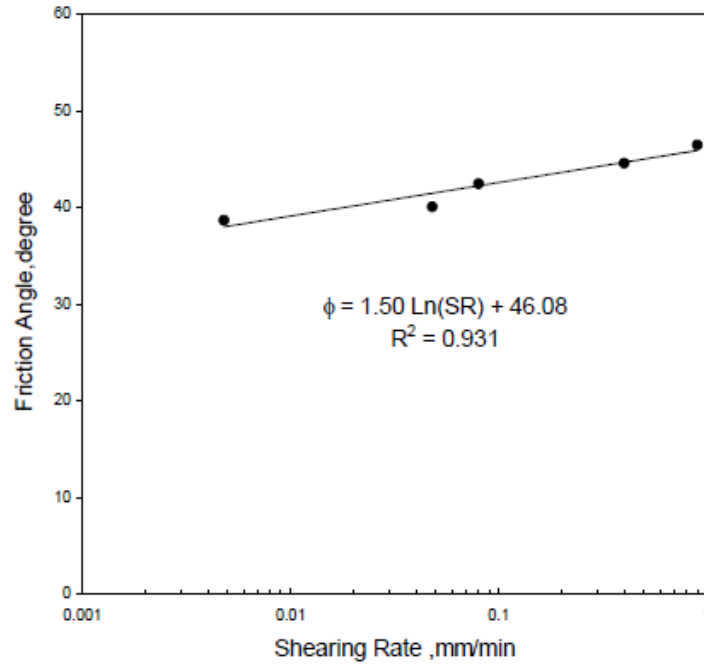
Teóricamente al disminuir la tasa de desplazamiento de corte debe incrementarse el ángulo de fricción ya que el agua drenara e ira apareciendo la fuerza de fricción entre las partículas; En este caso ocurre lo contrario, es decir al disminuir la tasa el ángulo de fricción disminuye lo que es un resultado interesante.

Una justificación probable de este comportamiento es que una alta tasa de desplazamiento permite menos tiempo para fracturar y para el reordenamiento de las partículas dentro de la caja de cizalladura, esto hace que la muestra tenga menor compresión y su fuerza aumente con el aumento de la tasa, lo cual resulta en un mayor ángulo de fricción del material (Al-Mhaidib, 2005) (Ver Figura 52).

Otra posibilidad para que el ángulo de fricción sea mas alto es que el espesor del suelo cuando se hace el corte varia con la tasa de desplazamiento y la cantidad de contracción (compresión) en la zona de desplazamiento se disminuye al aumentar la tasa de desplazamiento.(Ver Figuras 55,56 y 57).

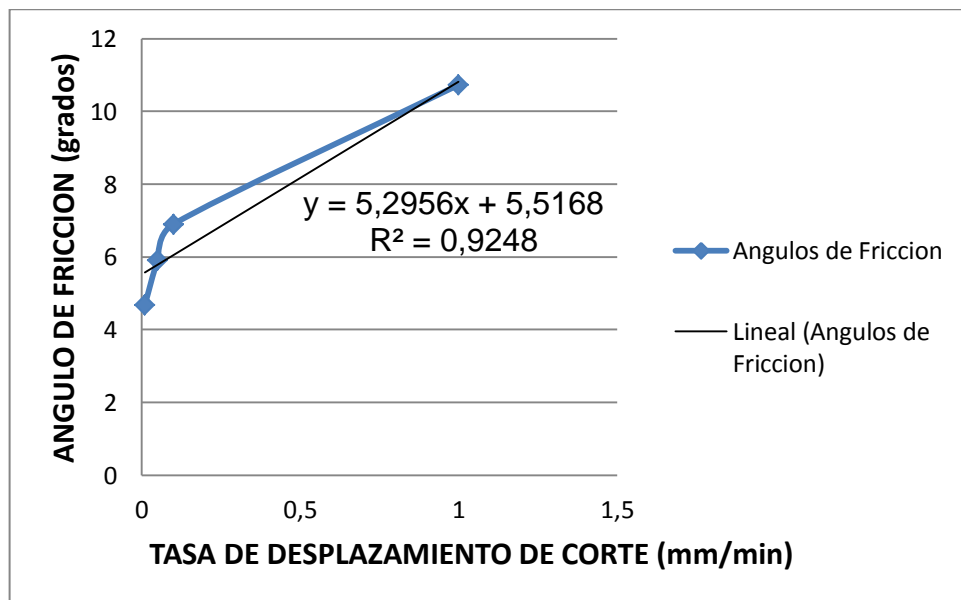
Este resultado es importante ya que se puede complementar el hecho de que el ángulo de fricción depende de varios factores entre ellos el tamaño de los granos, forma de los granos, distribución de los tamaños de los granos y la densidad del material (Bilz, 1995), en este caso en particular también dependería de la tasa de desplazamiento.

Figura 52. Relación entre Angulo de fricción y tasa de desplazamiento de corte según Al-Mhaidib 2005



Fuente: Al-Mhaidib 2005

Figura 53. Ángulos de fricción para diferentes tasas de desplazamiento



Fuente: Registro Propio

Ello se debe probablemente a que a menor tasa de desplazamiento de corte hay mayor disipación de presión de poros, es decir se disminuyen las presiones de poros en exceso, debidas a la aplicación de la carga, provocando así una menor resistencia al cortante y una disminución en la pendiente de la envolvente de resistencia.

Por otro lado al haber mayor disipación de poros, se va a disminuir la resistencia al cortante, ya que esta depende del esfuerzo efectivo.

Es decir:

Corte directo: consolidado drenadas

Cuando hay corte lento: $\Delta U \approx 0$

$$\sigma_v = \sigma'_v$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - \Delta U; \quad \Delta U \approx 0 \quad \text{entonces} \quad \tau \text{ disminuye al disminuir el } \sigma'_v$$

Lo anterior indica el grado de deterioro que puede ejercer una presión depende de las características intrínsecas del suelo y de la intensidad, frecuencia y duración de la presión (Sepúlveda, 2001); es decir que la disminución de la tasa de desplazamiento disminuye la presión de poros y esta a la fuerza de fricción de la arena que hay en este suelo.

Tabla 11. Ángulos de fricción y cohesión

Vc (mm/min)	esfuerzo normal (kpa)	esfuerzo cortante pico (kpa)	Φ' (grados)	C'(kpa)	%w
1	3,48	31,51	10,73	30,058	38,25
1	48,74	37,77			
1	97,48	49,26			
0,1	3,48	32,20	6,9	30,982	37,52
0,1	48,74	35,34			
0,1	97,48	43,52			
0,05	3,48	25,41	5,9	25,417	36,31
0,05	48,74	31,16			
0,05	97,48	35,16			
0,01	3,48	9,05	4,68	8,1536	41,26
0,01	48,74	10,97			
0,01	97,48	16,71			

Fuente: *Registro Propio*

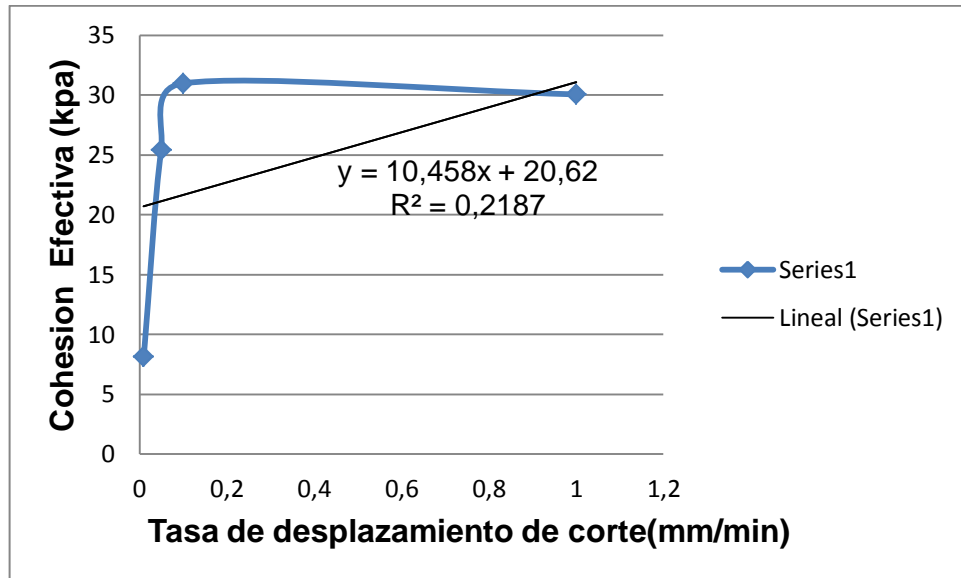
6.4 Influencia de la tasa de desplazamiento de corte en la cohesión. Como se puede ver en la Figura 54, la tasa de desplazamiento de corte tiene una importante influencia en la cohesión de la muestra; lo cual nos indica a menor tasa de desplazamiento la muestra tendrá una menor cohesión, indicando una menor adherencia entre las partículas de este suelo, esto para tasas de desplazamiento (bajas) en el rango de 0,1 a 0,01 mm/min. Para tasas de desplazamiento altas, es decir en el rango de 1 a 0,1 mm/min no se genera la tendencia anterior, en contraste indica a menor tasa de desplazamiento mayor cohesión; Entonces de manera general al disminuirse la tasa de desplazamiento la cohesión disminuye como se puede observar en la Figura 54.

El hecho de que al disminuirse la tasa de desplazamiento se disminuye la cohesión se puede verificar con el tipo de suelo que se tiene, es decir para este caso es un suelo ML y estos tienen poca cohesión, entonces como se ve en la Tabla N°11, al disminuir la tasa va a pareciendo la poca cohesión característica de este suelo y en contraste va desapareciendo la cohesión aparente debida al exceso de presión de poros.

Teniendo en cuenta lo anterior se puede decir que este parámetro debe suponerse cuidadosamente teniendo como base esta variación por efecto de la tasa de desplazamiento.

En general, la cohesión es un parámetro muy sensible en comparación con el ángulo de fricción. Revisión de la literatura muestra que la cohesión puede tener una gran dispersión; un coeficiente de variación de más del 50% ha sido reportado para la cohesión en la literatura (Baecher y cristiana, 2003).

Figura 54. Valores de cohesión para diferentes tasas de desplazamiento



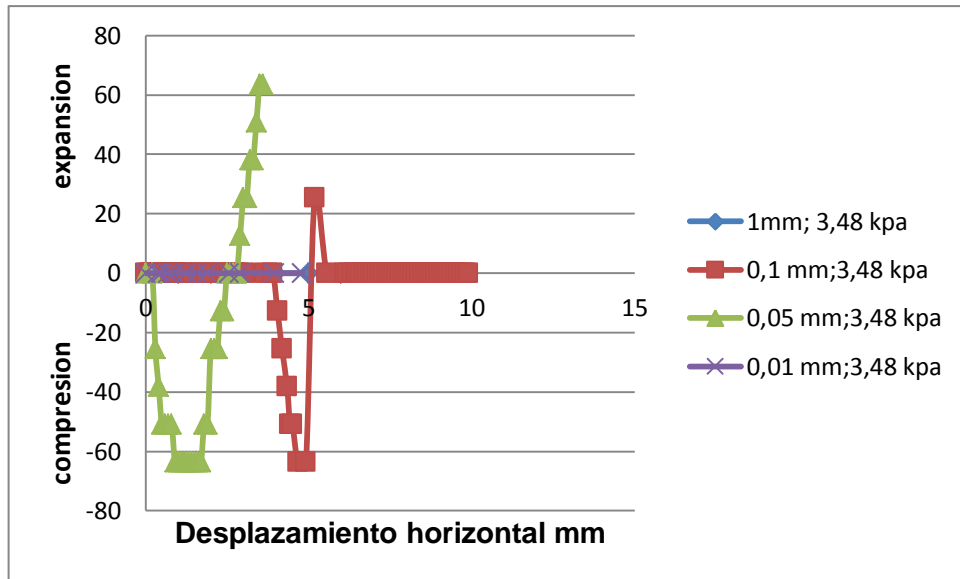
Fuente: Registro Propio

6.5 Relación de la tasa de desplazamiento de corte en el drenado. El efecto del drenaje se observa en el aumento de la cohesión a medida que aumenta la tasa de desplazamiento porque un aumento en la cohesión en este caso esta relacionada directamente con la presión de poros. Es decir una tasa de desplazamiento muy rápida genera una presión de poros elevada al mismo tiempo genera una condición parcialmente drenada lo que conduce a una cohesión aparente como se puede ver en la Tabla N°11. Con base en lo anterior se puede decir que al aumentar la tasa de desplazamiento se generará menor efecto drenante y esto es mas explicito a medida que el material sea mas arcilloso.

Una justificación probable de este comportamiento es que el espesor del suelo cuando se hace el corte varia con la tasa de desplazamiento y la cantidad de contracción (compresión) en la zona de desplazamiento se aumenta al disminuir la tasa de desplazamiento de corte lo cual nos dice que hay mayor drenado, es decir las partículas ocupan los espacios donde estaba el agua que fue drenada (Ver Figuras 55, 56 y 57).

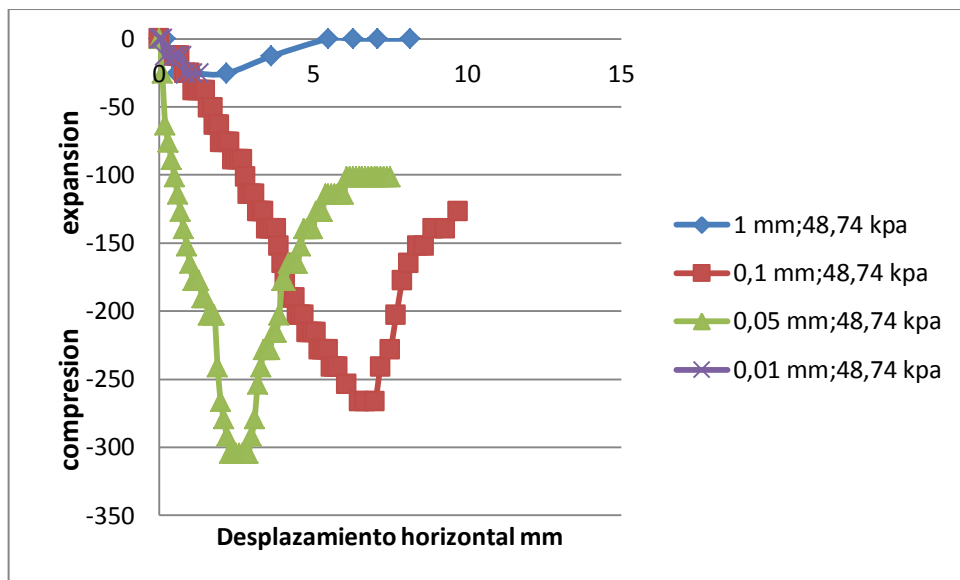
En las Figuras 43, 45, 36, 38, 29 y 31 se puede observar que la tasa de desplazamiento tiene una influencia en la etapa donde se presenta la falla, lo cual indica que en el rango de tasas de desplazamiento de 1 a 0,05 mm/min y esfuerzos normales medios y altos la falla se presentará en la etapa de dilatancia. En contraste en las figuras 22 y 24 se observa que para tasas de desplazamiento bajas (0,01 mm/min) y esfuerzos medios y altos la falla se generará en la etapa de compresión.

Figura 55. Evolución del drenado para diferentes tasas de desplazamiento y esfuerzo normal de 3,48 kpa



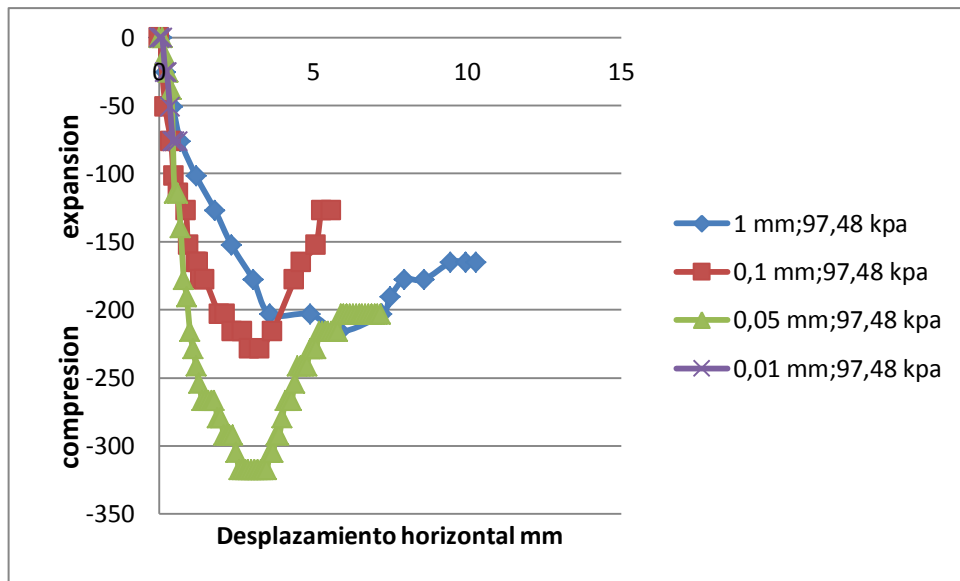
Fuente: *Registro Propio*

Figura 56. Evolución del drenado para diferentes tasas de desplazamiento y esfuerzo normal de 48,74 kpa



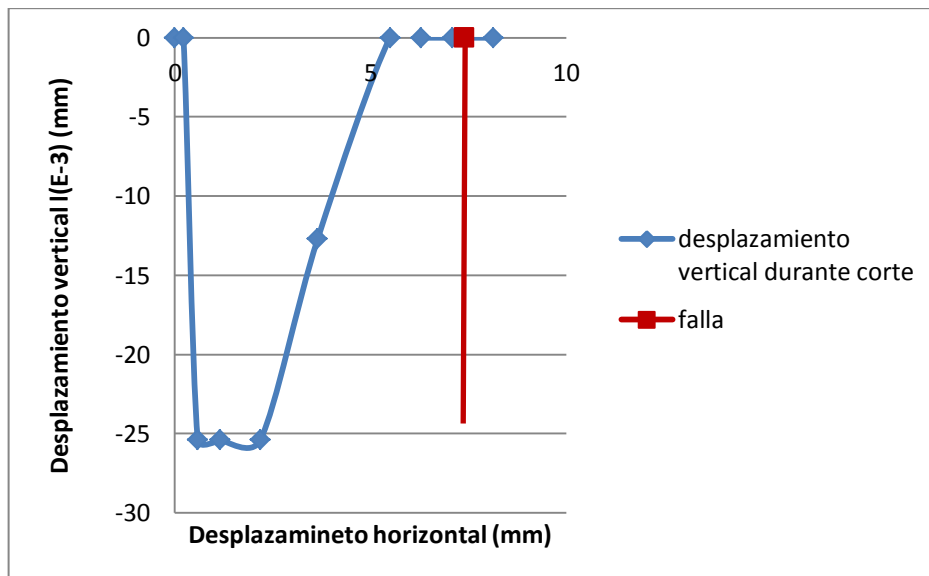
Fuente: *Registro Propio*

Figura 57. Evolución del drenado para diferentes tasas de desplazamiento y esfuerzo normal de 97,48 kpa



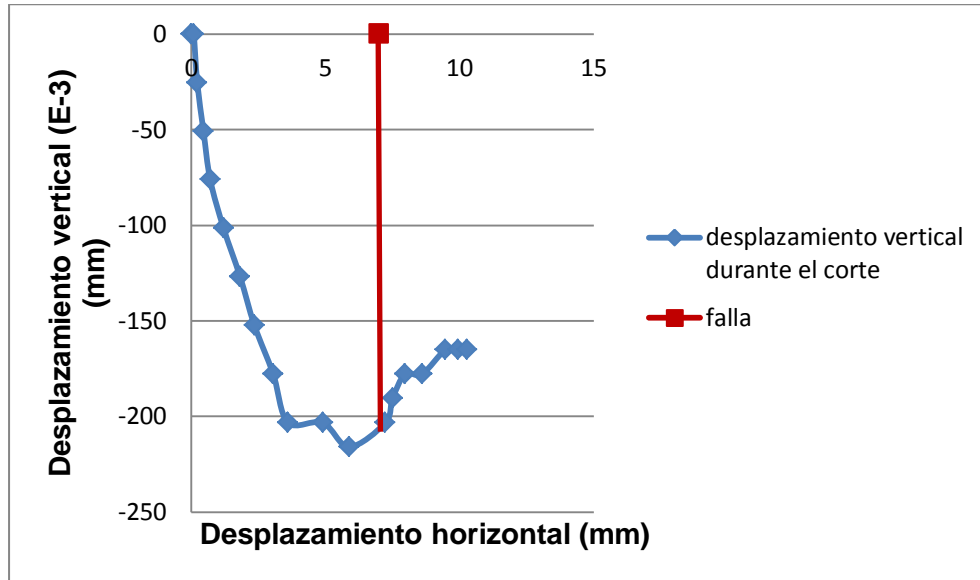
Fuente: Registro Propio

Figura 43. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_c = 1$ mm/min



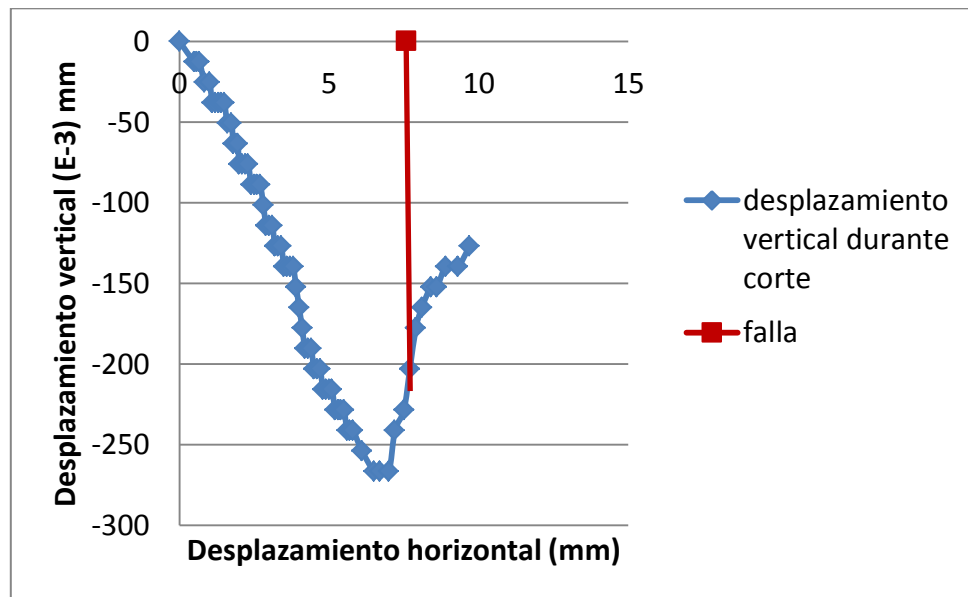
Fuente: Registro Propio

Figura 45. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_C = 1$ mm/min



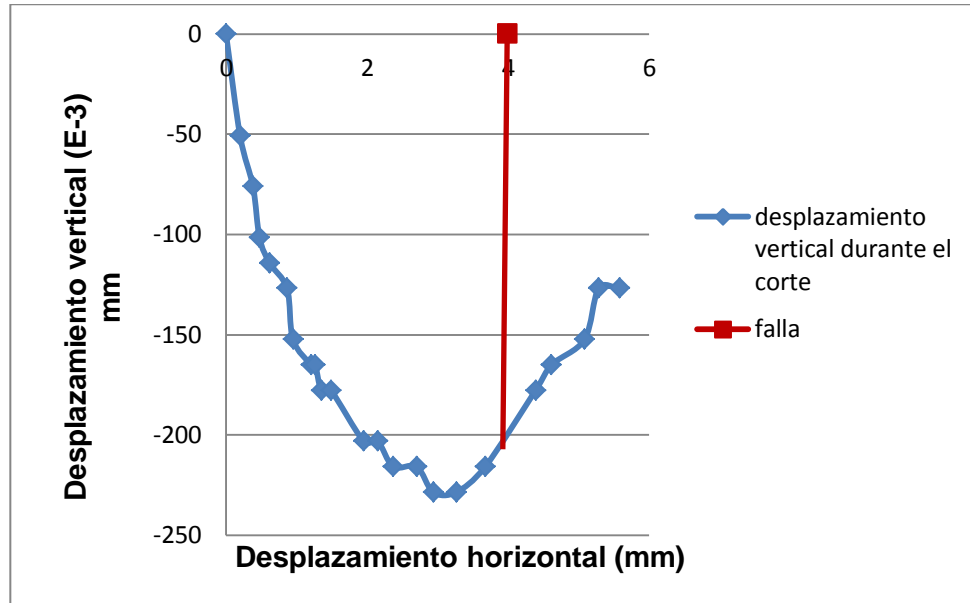
Fuente: *Registro Propio*

Figura 36. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 0,1$ mm/min



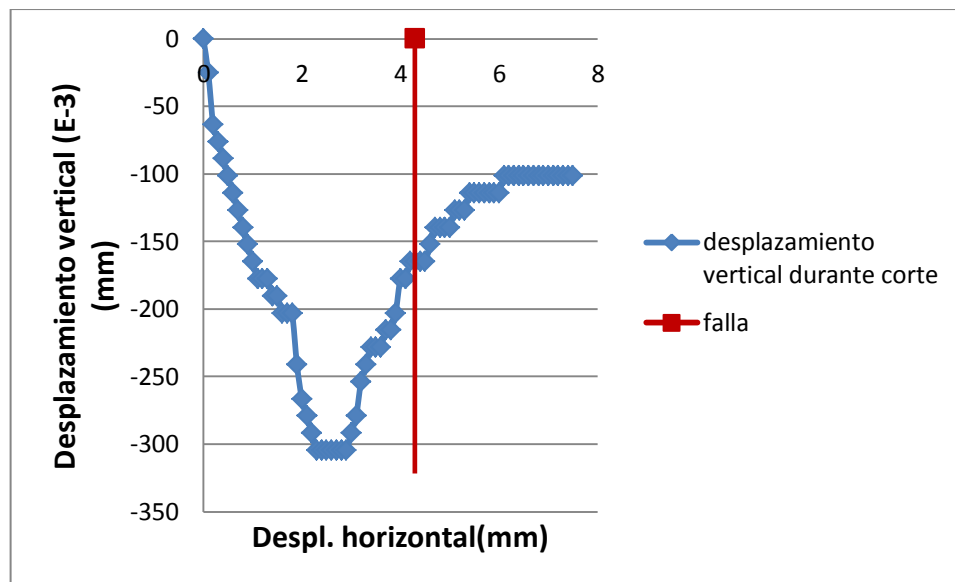
Fuente: *Registro Propio*

Figura 38. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_C = 0,1$ mm/min



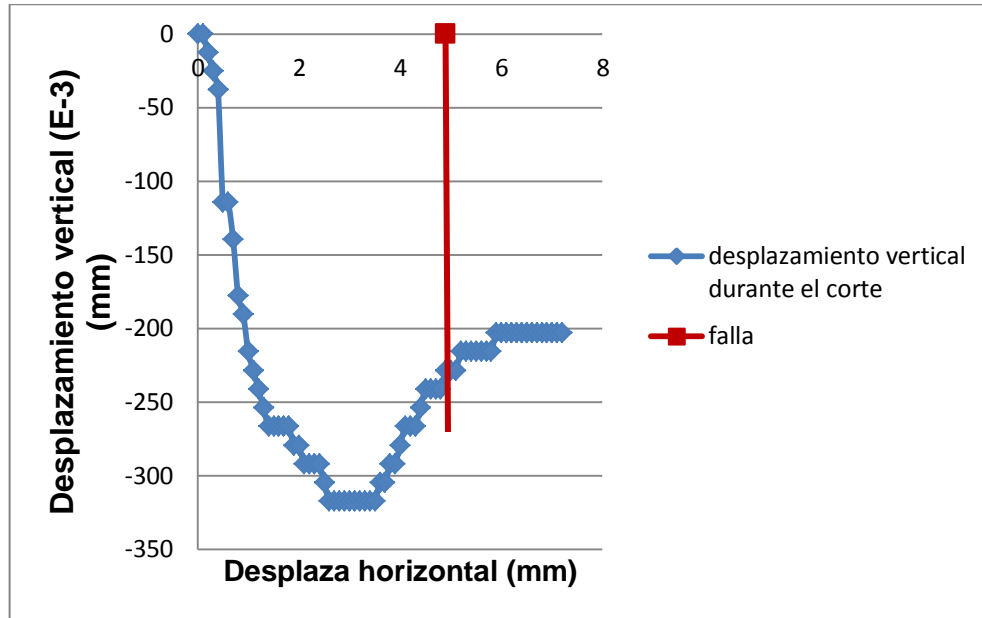
Fuente: *Registro Propio*

Figura 29. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 0,05$ mm/min



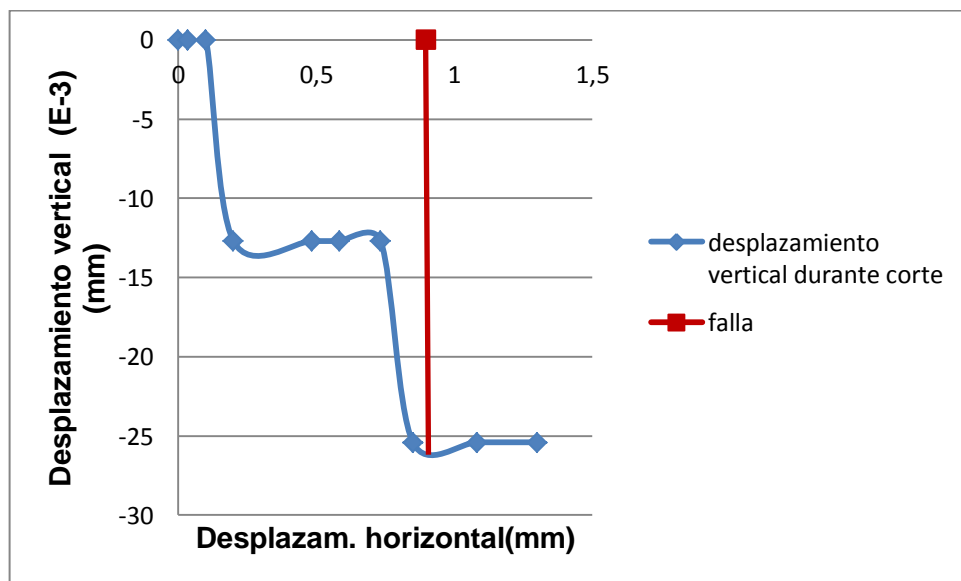
Fuente: *Registro Propio*

Figura 31. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_C = 0,05$ mm/min



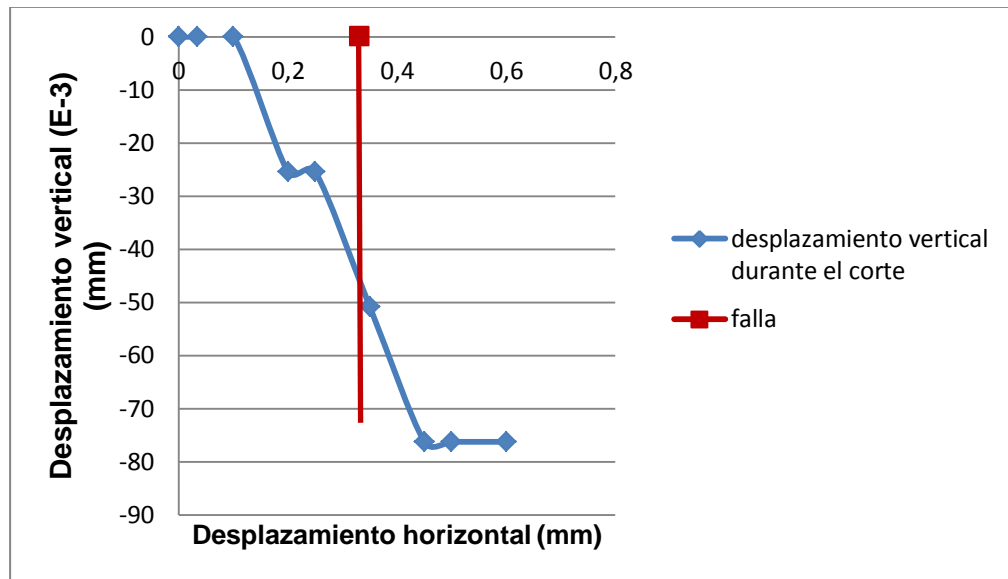
Fuente: *Registro Propio*

Figura 22. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 48,74 Kpa y $V_C = 0,01$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

Figura 24. Relación entre el desplazamiento vertical y el desplazamiento horizontal durante el corte a un esfuerzo normal de 97,48 Kpa y $V_c = 0,01$ mm/min



Fuente: *Registro Propio*

7. CONCLUSIONES

- La realización de ensayos de corte directo con diferentes tasas de desplazamiento permiten tener información de la evolución de la envolvente de resistencia y de la variación de los parámetros de resistencia. De esta forma se puede asumir de manera más adecuada y observar la evolución de estos a la hora de diseñar obras civiles.
- Según los ensayos realizados se puede observar con claridad la influencia de la tasa de desplazamiento en la cohesión del material. Primero se concluye que este parámetro disminuye con la disminución de la tasa de desplazamiento, es decir existe un error en la práctica común en geotecnia al ejecutar los ensayos de resistencia al corte bajo condiciones de una tasa de carga elevada. En este caso en particular se encontró que la tasa de desplazamiento de 0,01 mm/min es la más adecuada para reducir las sobreestimaciones sobre el parámetro mencionado para este suelo.
- Del análisis de los resultados se concluye que la tasa de desplazamiento determina la envolvente de resistencia del suelo, es decir al disminuir la tasa de desplazamiento la pendiente de esta se disminuye por lo tanto el ángulo de fricción disminuye. Por otra parte, la determinación de la envolvente de resistencia en el laboratorio puede ser incorrecta si se utiliza una tasa de desplazamiento alta, con lo cual se sugiere que este cálculo de esta envolvente se realice para diferentes tasas de desplazamiento lo suficientemente bajas para obtener valores de parámetros de resistencia sin sobreestimaciones y acordes con la realidad. Es importante notar que esta envolvente de resistencia que en principio es afectada por los esfuerzos de confinamiento, también se vea afectada por la tasa de desplazamiento.

Cabe anotar que para este caso en particular al disminuir la tasa de desplazamiento disminuirá el ángulo de fricción, lo que es un resultado interesante ya que teóricamente al disminuir esta tasa debe incrementarse este ángulo debido a que al haber drenado aparecerán las fuerzas de fricción entre partículas.

- Como es de esperar, la tasa de desplazamiento de corte tiene una influencia en el drenado, por lo tanto se puede concluir que el efecto del drenaje se observa en el aumento de la cohesión a medida que aumenta la tasa de desplazamiento por que un aumento en la cohesión en este caso esta relacionado directamente con la presión de poros, por consiguiente tasas de desplazamiento altas generan grandes cohesiones aparentes y situaciones parcialmente drenadas.
- Con este trabajo se demuestra que las ejecuciones de ensayos de resistencia al corte con diferentes tasas de desplazamiento permitieron establecer los efectos de dicha tasa en los parámetros de resistencia del suelo. Con lo cual se sugiere la ejecución de este tipo de ensayos para mejorar el criterio de escogencia de estos parámetros.

REFERENCIAS

- <http://geoinfo.nmt.edu/staff/mclemore/documents/Kojothesis.pdf> (consultado el 29 de Agosto de 2012)
- Al-Mhaidib, A. I., (2005), Shearing Rate Effect on Interfacial Friction between Sand and Steel, Proceedings of The Fifth International Offshore and Polar Engineering Conference, Department of Civil Engineering, King Saud University, pp. 633-639.
- Al-Mhaidib, A. I., (2004), "Effect of Loading Rate on Pile Groups in Sand", proceedings of the International Conference on Geotechnical Engineering (ICGE-2004) , Sharjah, United Arab Emirates, pp. 62-67.
- Baecher, G.B. and Christian, J.T., (2003), Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering, John Wiley and Sons, London and New York.
- Bishop, A.W. and Blight, G.E., (1963). Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. Géotechnique Vol. 13, pp. 177–197.
- Bishop, A.W., Eldin, A. K. G., (1953). "The Effect of stress History on the Relation Between Friction Angle and Porosity in Sand." Proceedings, 3rd International conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Zurich, Vol. 1, 100105.
- Dafalias, Y. F., (1993). "Overview of constitutive models used in VELACS." Verification of Numerical Procedures for the analysis of soil liquefaction problems, 2, pp. 1293-1304.

- Das, B. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Thomson. Editores.2001.Cap.7
- HORN, R., BAUGARTL, T., KAYSER, R. and BAASCH, S. 1995. Effect of aggregate strength on strength and stress distribution in structured soils, in Hartge, K.H. and Steward, B. A. (Eds.). Soil structure. Its development and functions. Advances in Soil Science, p. 31-52
- RICO RODRIGUEZ, Alfonso, 2005. La ingeniería de suelos en las vías terrestres: Carreteras ferrocarriles y aeropistas, Cap. 2 y 3.
- Suárez, J.Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en ZonasTropicales.Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.1998. Cap 3.
- SEPÚLVEDA, M. 2001. Efecto de la preconsolidación sobre la resistencia al corte en un suelo Durudand con dos potenciales mátricos. Tesis Licenciado en Agronomía, Universidad Austral de Chile. 54 p.