



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLAS DE HIDALGO.

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL.

**DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO.**

**Influencia del agrietamiento en la  
resistencia al corte de un suelo arcilloso y  
sus consecuencias en la estabilidad de  
taludes.**

---

Para obtener el grado de maestro en infraestructura del  
transporte en la rama de las vías terrestres.

**Presenta: Ingeniero David Cervantes Navarro.**

Asesor: Dr. Carlos Chávez  
Negrete.

17 de febrero de 2012.



## Índice.

1.	Introducción. ....	8
1.1.	Objetivos. ....	8
1.2.	Justificación. ....	8
2.	Estado del Arte. ....	9
2.1.	La Teoría de la falla. ....	9
2.1.1.	Mecánica de la fractura. ....	9
2.1.2.	Resistencia de los suelos al corte. ....	15
2.1.2.1.	Resistencia al corte y el modelo de fricción. ....	15
2.1.2.2.	Prueba de corte directo. ....	24
2.2.	Estabilidad de los taludes. ....	26
2.3.	Esfuerzo residual. ....	33
3.	Metodología de ensayos en el laboratorio. ....	35
3.1.	Ensayos. ....	36
3.1.1.	Teoría de la clasificación de suelos. ....	36
3.1.1.1.	Granulometría en suelos. ....	36
3.1.1.2.	Clasificación SUCS. ....	38
3.1.1.3.	Plasticidad. ....	39
3.1.1.4.	Peso específico relativo de los sólidos. ....	46
3.1.2.	Teoría de la compactación de suelos. ....	47
3.1.2.1.	Compactación tipo Proctor. ....	48
3.2.	Pruebas base. ....	49
3.2.1.	Pruebas para establecer el procedimiento de inducción de falla. ....	59
3.2.2.	Pruebas para mejorar el método. ....	68
3.3.	Experimentación. ....	72
3.3.1.	Procedimiento para labrar la muestra (EC). ....	73
3.3.2.	Procedimiento para montar, consolidar y probar a corte (EC). ....	73
3.4.	Resultados. ....	81
3.4.1.	Resultados de la prueba CU. ....	87
3.4.2.	Resultados de la prueba CD. ....	95
4.	Interpretación de resultados. ....	106
4.1.	Pruebas CU. ....	106
4.2.	Pruebas CD. ....	112
4.3.	Puntos sobresalientes de las pruebas CU y CD. ....	117
5.	Conclusiones. ....	119
5.1.	Trabajo experimental. ....	119
5.2.	Resultados y análisis. ....	120
5.3.	Trabajos futuros. ....	120
6.	Bibliografía. ....	122



7.	Anexos.....	123
7.1.	Anexo A: Límites y su clasificación.....	123
7.2.	Anexo B: Humedad óptima. ....	125
7.3.	Anexo C: Densidad o Peso específico relativo de los sólidos.....	129
7.4.	Anexo D: Primeros ensayos C1-C4, fallada. ....	131
7.5.	Anexo E: Segundos ensayos F, G y T.....	135
7.6.	Anexo F: Obtención de la energía específica. ....	138
7.7.	Anexo G: Determinación $t_{50}$ .....	139
7.8.	Anexo H: Resumen pruebas con y sin grieta, CU y CD.....	140
7.8.1.	Prueba consolidada no drenada CU.....	140
7.8.2.	Prueba consolidada drenada CD.....	156



## Índice de figuras.

- Figura 1: Clasificación de la fractura, desde el punto de vista ingenieril, González L; 2002. 10
- Figura 2: Variables del diseño de componentes estructurales por mecánica del medio continuo, González L; 2002. 11
- Figura 3: Comportamiento típico esfuerzo contra deformación de un material en tensión uniaxial, González L; 2002. 12
- Figura 4: Definición de los niveles de esfuerzo en un componente estructural, González L; 2002. 13
- Figura 5: Categorías de fractura de acuerdo a la extensión de la zona plástica, González L; 2002. 15
- Figura 6: Modelo de fricción, Whitlow R; 1994. 16
- Figura 7: Ángulo de fricción interna, Whitlow R; 1994. 17
- Figura 8: Esfuerzo máximo, último y residual, Whitlow R; 1994. 18
- Figura 9: Envolturas de resistencia máxima y residual, Whitlow R; 1994. 19
- Figura 10: Envoltura de resistencia al corte sin drenado, Whitlow R; 1994. 20
- Figura 11: Ecuación de Coulomb y envoltura de falla, Whitlow R; 1994. 21
- Figura 12: Resistencias, máximas, última y residual, Whitlow R; 1994. 23
- Figura 13: Caja de corte directo, Whitlow R; 1994. 24
- Figura 14: Comportamiento del esfuerzo cortante en suelos densos y sueltos, Whitlow R; 1994. 25
- Figura 15: Tipos de deslizamiento o falla en talud, González L; 2004. 28
- Figura 16: Tipos de deslizamiento rotacional, González L; 2004. 29
- Figura 17: Corte Selborne, Smith G; 1998. 31
- Figura 18: Zona debilitada, zona de corte y superficie de deslizamiento, Smith G; 1998. 32
- Figura 19: Macro localización Google Maps 2011. 35
- Figura 20: Micro localización Google Maps 2011. 35
- Figura 21: Material arcilloso de estudio visto en campo, dirección de oeste a este. 36
- Figura 22: Material arcilloso de estudio visto en campo, dirección este a oeste. 36
- Figura 23: Copa de Casagrande, [labequim.com.mx/html/APARATOSHUMBOLDT.htm](http://labequim.com.mx/html/APARATOSHUMBOLDT.htm), 2011. 41
- Figura 24: Dimensiones de la ranura en la copa de Casagrande, Badillo J; 2009. 42
- Figura 25: Determinación de límite líquido en la curva de flujo, Badillo J; 2009. 43
- Figura 26: Obtención del límite de contracción, según Terzaghi, Badillo J; 2009. 46
- Figura 27: Triturado del material en el mortero. 50
- Figura 28: Cribado en la malla número 40. 50
- Figura 29: Material arcilloso, saturada durante 24 horas. 51
- Figura 30: Cierre de la brecha de arcilla en la copa de Casagrande. 51
- Figura 31: Contenido de agua contra número de golpes. 52
- Figura 32: Rollitos de arcilla para determinar el límite plástico. 52
- Figura 33: Muestras para determinar la contracción lineal y volumétrica de la arcilla. 53
- Figura 34: Muestras después del secado para determinar su contracción lineal y volumétrica. 53
- Figura 35: Carta de plasticidad. 54
- Figura 36: Molde para compactación tipo Proctor. 55
- Figura 37: Triturado de material arcilloso que es demasiado grande. 55
- Figura 38: Cribado del material por la malla no. 4. 56
- Figura 39: Pesaje de 2.5kg de material arcilloso. 56
- Figura 40: Material secado en horno para eliminar humedad. 56
- Figura 41: Peso específico contra contenido de agua de las primeras 4 determinaciones. 57
- Figura 42: Peso específico contra contenido de agua de otras 4 determinaciones. 58
- Figura 43: Peso específico contra contenido de agua con 6 determinaciones de las 8 realizadas. 58
- Figura 44: Espécimen de compactación tipo Proctor y la extracción de muestras representativas. 59
- Figura 45: Material representativo de cada ciclo (Proctor), para determinar su humedad. 59
- Figura 46: Placas de corte directo, sección circular. 60
- Figura 47: Muestra fallada número 1, correspondiente a C1. 61
- Figura 48: Implementación de las cuerdas en los extremos de la sección circular. 62
- Figura 49: Muestra de la posición de cuerda que cortará la muestra en este experimento. 62
- Figura 50: Muestra que se humedeció en demasia y estropeo la muestra, correspondiente a C2. 62
- Figura 51: Muestra correspondiente a C3 después de la prueba de corte, placa superior. 63
- Figura 52: Placa inferior de la muestra C3, muestra como se corto la muestra de arcilla. 64
- Figura 53: Ambas placas correspondientes a la prueba C3. 64
- Figura 54: Muestra con inducción de la falla, con una cuerda de guitarra (SOL). 65
- Figura 55: Desplazamiento horizontal contra carga, muestra completamente cortada. 66
- Figura 56: Consolidación de las pruebas C1 a C4. 67
- Figura 57:  $\sigma_h$  contra carga para pruebas C1 a C4. 67
- Figura 58: No existe visualización de la falla a simple vista para la prueba F. 68
- Figura 59: Implementación de la grasa en las paredes de las placas para la prueba G. 69
- Figura 60: Placas de corte de directo y sección circular con tornillos de sujeción y tornillos auxiliares. 70
- Figura 61: ejemplificación del momento en el que se eleva la placa superior al girar los tornillos auxiliares. 70
- Figura 62: Muestra de arcilla después de la prueba a corte con método anterior. 71
- Figura 63: Consolidación de las pruebas F-G-T. 72
- Figura 64:  $\sigma_h$  contra carga para pruebas F-G-T. 72
- Figura 65: Subprograma en LABview para captura de datos en consolidación en máquina de corte directo. 74
- Figura 66: Tarjeta que captura los datos de los sensores en la máquina de corte directo USB NI. 75
- Figura 67: Sensor de movimiento para la consolidación. 75
- Figura 68: Bandeja llena de agua destilada. 76
- Figura 69: Captura de pantalla del subprograma en el momento de la consolidación en tiempo real. 77
- Figura 70: Tablero de controles de la máquina de corte directo. 77
- Figura 71: Tabla de ajuste para obtener el valor del contador, respecto al t50. 78
- Figura 72: Velocidad de engranaje indicado en la tabla de ajuste. 78



Figura 73: Sensor de movimiento en la bandeja para determinar la $\epsilon_h$ .	79
Figura 74: Sensor de movimiento para determinar la carga.	79
Figura 75: Subprograma en LABview para captura de datos en el corte directo.	80
Figura 76: Tabla de datos básicos como pesos y dimensiones de cada muestra.	81
Figura 77: Muestra del archivo generado en LABview, muestra la captura de datos.	82
Figura 78: Muestra del archivo modificado para consolidación.	83
Figura 79: Muestra del archivo modificado para prueba de corte.	83
Figura 80: Diferencia de áreas entre las placas, cuando se desplaza en la prueba de corte.	85
Figura 81: Tabla concentradora de los esfuerzos, en programa de cálculo.	86
Figura 82: Esfuerzo deformación prueba I, CU.	88
Figura 83: Esfuerzo deformación prueba I.I, CU.	89
Figura 84: Esfuerzo deformación prueba II, CU.	90
Figura 85: Esfuerzo deformación prueba II.I, CU.	91
Figura 86: Esfuerzo deformación prueba III, CU.	92
Figura 87: Esfuerzo deformación prueba III.I, CU.	93
Figura 88: Envoltente de falla de esfuerzos para pruebas con grieta y sin grieta CU.	94
Figura 89: Esfuerzo deformación prueba I, CD.	96
Figura 90: Esfuerzo deformación prueba I.I, CD.	97
Figura 91: Esfuerzo deformación prueba II, CD.	98
Figura 92: Esfuerzo deformación prueba II.I, CD.	99
Figura 93: Esfuerzo deformación prueba III, CD.	100
Figura 94: Esfuerzo deformación prueba III.I, CD.	101
Figura 95: Envoltente de falla para esfuerzos en pruebas con grieta y sin grieta, CD.	102
Figura 96: Esfuerzo deformación prueba I, CD, repetición.	103
Figura 97: Esfuerzo deformación muestra II, CD, repetición.	104
Figura 98: Envoltente de falla para pruebas con grieta CD, repetición.	105
Figura 99: Esfuerzo-deformación, envoltente de falla y esfuerzo residual pruebas con grieta, CU.	106
Figura 100: esfuerzo-deformación, envoltente de falla y esfuerzo residual pruebas sin grieta, CU.	107
Figura 101: caso 1, CU.	108
Figura 102: caso 2, CU.	109
Figura 103: caso 3, CU.	110
Figura 104: caso 4, CU.	111
Figura 105: Esfuerzo-deformación, envoltente de falla y esfuerzo residual pruebas con grieta, CD.	112
Figura 106: Esfuerzo-deformación, envoltente de falla y esfuerzo residual pruebas sin grieta CD.	112
Figura 107: caso 1, CD.	114
Figura 108: caso 2, CD.	115
Figura 109: caso 3, CD.	116
Figura 110: caso 4, CD.	117
Figura 111: Ejemplo de cómo funciona la implementación de una placa de aluminio para cortar la muestra.	121
Figura 112: labrador de aluminio para muestras de corte.	121

## Índice de ecuaciones.

Ecuación 1: Definición matemática de esfuerzo.	11
Ecuación 2: Relación de esfuerzo cuando es propenso a fallar.	12
Ecuación 3: Definición de esfuerzo cortante límite.	17
Ecuación 4: Esfuerzo cortante límite respecto al ángulo.	17
Ecuación 5: Esfuerzo cortante límite respecto del ángulo efectivo.	19
Ecuación 6: Esfuerzo cortante a lo largo de plano de deslizamiento.	21
Ecuación 7: Definición de esfuerzo cortante efectivo.	21
Ecuación 8: Esfuerzo cortante respecto del ángulo máximo.	23
Ecuación 9: Esfuerzo cortante respecto del ángulo crítico.	23
Ecuación 10: Esfuerzo cortante respecto del ángulo residual.	23
Ecuación 11: Profundidad grieta de tensión.	32
Ecuación 12: Profundidad de la grieta en función del esfuerzo cortante.	32
Ecuación 13: Valor del esfuerzo residual según Skempton.	34
Ecuación 14: Definición de la curva de flujo.	43
Ecuación 15: Definición de límite líquido.	45
Ecuación 16: Definición de límite plástico.	45
Ecuación 17: Definición del índice plástico, respecto al número de golpes.	45
Ecuación 18: Definición del índice plástico.	45
Ecuación 19: Definición del índice de tenacidad.	45
Ecuación 20: Límite de contracción por definición.	46
Ecuación 21: límite de contracción, ecuación desarrollada.	46
Ecuación 22: Definición del peso específico relativo de los sólidos.	47
Ecuación 23: Definición de la energía específica.	48
Ecuación 24: Corrección del área circular respecto de una elipse.	84



## Índice de tablas.

Tabla 1: Clasificación internacional de suelos.	37
Tabla 2: Clasificación del instituto tecnológico de Massachusetts. propuesta por G. Gilboy.	38
Tabla 3: Clasificación de los suelos propuesta por Kopecky.	38
Tabla 4: Datos generales de la muestra I, CU.	87
Tabla 5: Datos de la prueba de corte en la muestra I, CU.	87
Tabla 6: Datos generales para prueba I.I, CU.	88
Tabla 7: Datos de la prueba de corte en I.I, CU.	88
Tabla 8: Datos generales prueba II, CU.	89
Tabla 9: Datos de la prueba de corte en II, CU.	89
Tabla 10: Datos generales prueba II.I, CU.	90
Tabla 11: Datos de la prueba de corte en II.I, CU.	90
Tabla 12: Datos generales prueba III, CU.	91
Tabla 13: Datos de la prueba de corte en III, CU.	91
Tabla 14: Datos generales prueba III.I, CU.	92
Tabla 15: Datos de la prueba de corte en III.I, CU.	93
Tabla 16: Resumen de esfuerzos cortantes máximos en muestras con grieta, CU.	93
Tabla 17: Resumen de esfuerzos cortantes máximos en muestras sin grieta, CU.	93
Tabla 18: Ángulos de tendencia de las envolventes de falla, CU.	93
Tabla 19: Datos generales prueba I, CD.	95
Tabla 20: Datos de la prueba de corte en I, CD.	95
Tabla 21: Datos generales prueba I.I, CD.	96
Tabla 22: Datos de la prueba de corte en I.I, CD.	96
Tabla 23: Datos generales prueba II, CD.	97
Tabla 24: Datos de la prueba de corte en II, CD.	97
Tabla 25: Datos generales prueba II.I, CD.	98
Tabla 26: Datos de la prueba de corte en II.I, CD.	98
Tabla 27: Datos generales prueba III, CD.	99
Tabla 28: Datos de la prueba de corte en III, CD.	99
Tabla 29: Datos generales prueba III.I, CD.	100
Tabla 30: Datos de la prueba de corte en III.I, CD.	100
Tabla 31: Resumen de esfuerzos cortantes máximos en pruebas con grietas, CD.	101
Tabla 32: Resumen de esfuerzos cortantes máximos en pruebas sin grietas CD.	101
Tabla 33: Ángulos de tendencia para las envolventes de falla, CD.	101
Tabla 34: Datos generales pruebas I, CD, repetición.	102
Tabla 35: Datos de la prueba de corte en I, CD, repetición.	102
Tabla 36: Datos generales prueba II, CD, repetición.	103
Tabla 37: Datos de la prueba de corte en II, CD, repetición.	104
Tabla 38: Resumen de esfuerzos cortantes máximos en pruebas agrietadas, repetición.	104
Tabla 39: Ángulos de tendencia para envoltente de falla CD, repetición.	104



## Agradecimientos.

***A Dios.***

***A mis padres:***

Manuel Cervantes Campos  
Elvira Navarro Rivas

7

***A mis hermanos:***

Manuel Cervantes Navarro  
Noelia Cervantes Navarro  
Saul Cervantes Navarro

***A mi prometida:***

Alejandra Ibáñez Benítez

***A mis profesores:***

Carlos Chávez Negrete  
Jorge Alarcón Ibarra  
Eleazar Arreygue Rocha  
Felipe de Jesús Jerónimo Rodríguez  
Jaime Saavedra Rosales

***A mis amigos.***

***A mis compañeros del laboratorio:***

Tarsicio Domínguez Téllez  
Jaime Guadalupe Chora Calderón



# 1. Introducción.

## 1.1. Objetivos.

Conocer el comportamiento mecánico de un suelo arcilloso agrietado, mediante la obtención de la resistencia máxima y residual con la máquina de corte directo. El agrietamiento de las arcillas se forma de manera natural por expansiones y contracciones. Estas grietas se propagan cuando se incrementa el esfuerzo cortante al final de la grieta.

Analizar los resultados para llegar a una serie de recomendaciones, para que cuando se presente en campo el caso se pueda atacar mejor el problema.

El propósito general es adentrarse en el estudio de los suelos arcillosos que presentan agrietamientos de forma natural, tomado en cuenta, la interacción de dos zonas; la zona con grieta y la zona sin grieta, además de ver como se propaga la grieta.

## 1.2. Justificación.

Así podremos entender, ¿cuál es la variación de la resistencia a corte debido a las grietas? y tener un mejor entendimiento de este fenómeno de campo y su influencia en los taludes de corte en carreteras.

Al no haber literatura que hable directamente de este fenómeno y que ayude a entender el problema, desencadena en una mala toma de decisiones. Esta investigación ayudará a complementar esa parte del conocimiento y mejorar la toma de decisiones en campo. Una vez entendiendo los factores que gobiernan el fenómeno se disminuirá los deslizamientos, por tanto, las pérdidas monetarias y humanas disminuirán también.



## 2. Estado del Arte.

### 2.1. La Teoría de la falla.

En el siguiente subcapítulo hablaremos de la mecánica de la factura, como es que se inicia, como se comporta y todo esto con el fin de entender como la factura (en este caso las grietas que se desarrollan en el suelo, dan origen a las fallas, es evidente que el agrietamiento en una masa de suelo, fragiliza su capacidad de soportar esfuerzos mayores, debido a estas grietas, cuando su capacidad es rebasada, las grietas al disminuir esta capacidad a su vez propagan la grieta a una mayor porción de suelo, comunicando algunas grietas con otras existentes, hasta generar una falla en la masa de suelo.

#### 2.1.1. Mecánica de la fractura.

La fractura es la separación o fragmentación de un sólido bajo la acción de una carga externa, a través de un proceso de creación de nuevas superficies; las superficies de fractura. Usualmente, para fracturar un material se requiere incrementar la carga progresivamente hasta que un proceso de iniciación y propagación de grietas ocurra.

Dependiendo de las condiciones de carga, geometría del cuerpo y de las propiedades mecánicas del material, para fracturar un componente estructural, puede ser necesario sostener e incluso incrementar la carga después de que la iniciación de grietas ha tenido lugar; mientras que en otros casos bastará con alcanzar el punto de iniciación de grieta que después se propagará. Un aspecto muy importante a considerar es que la fractura puede iniciar a partir de una grieta ya existente en el material, entonces la etapa de iniciación de las grietas es suprimida y el proceso se reduce a iniciar la propagación de la grieta.

Para que la fractura ocurra no es necesario que se presente en toda la masa de suelo solo en una región estrecha para que la fractura ocurra; esto se conoce como "principio de la ruptura".

El hecho de que una fractura pueda iniciar en regiones muy localizadas y frecuentemente pequeñas y de que ocurra a esfuerzos menores de los que supone el material soporta, le dan sus características de ser súbita, inesperada y catastrófica.

Desde el punto de vista del comportamiento de los materiales, se reconocen dos tipos de fractura dependiendo de la cantidad de deformación plástica previa, estos son:

- a) *Fractura frágil*: es la que ocurre cuando la deformación de la mayor parte del cuerpo es elástica.
- b) *Fractura dúctil*: es la fractura que ocurre después de una apreciable deformación plástica del cuerpo.

La Figura 1: Clasificación de la fractura, desde el punto de vista ingenieril, González L; 2002., presenta en forma esquemática dos cuerpos con fractura frágil y dúctil respectivamente. La clasificación de las fracturas en frágiles y dúctiles es estrictamente ingenieril, ya que de hecho, en algunas fracturas de aspecto frágil, pueden existir una intensa deformación plástica, solo que ésta se localiza en una región pequeña alrededor de la grieta y el resto del material permanece sin deformación plástica, como muestra el tercer cuerpo de la Figura 1: Clasificación de la



fractura, desde el punto de vista ingenieril, González L; 2002. Tradicionalmente, la mayor atención se le ha dado a la fractura frágil por sus características de ser súbita, catastrófica y de ocurrir a esfuerzos por debajo de los esfuerzos que debe de esperarse del material, aunque en la actualidad, la fractura dúctil también es ampliamente estudiada, en particular en aquellos casos en los que se presentan materiales de alta ductilidad y donde los niveles de esfuerzo son altos. En la práctica ambos tipos de fractura pueden llegar a presentarse en el mismo componente fallado.

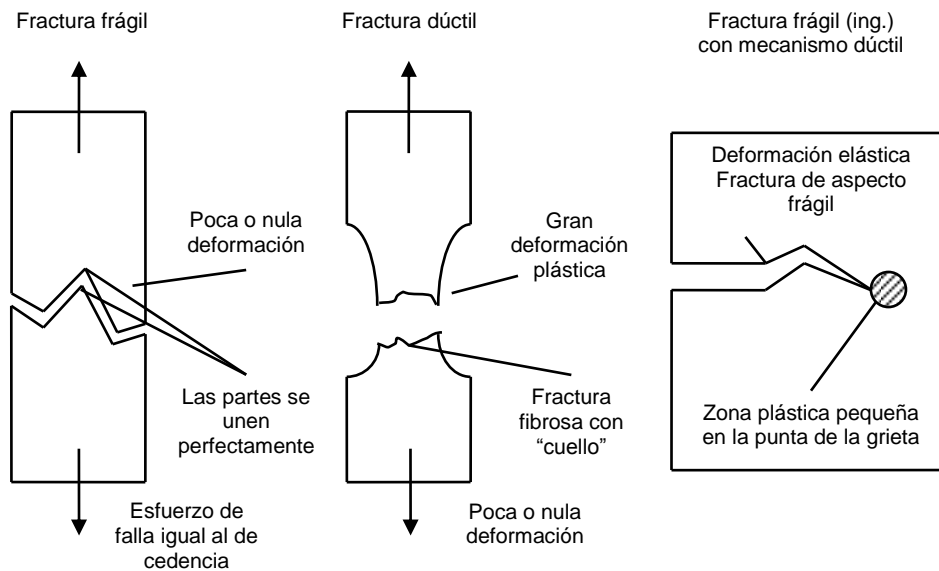


Figura 1: Clasificación de la fractura, desde el punto de vista ingenieril, González L; 2002.

La consecuencia inmediata de la aplicación de cargas en un cuerpo sólido es la aparición de los esfuerzos. **El esfuerzo, es la reacción interna a la aplicación de una carga externa.** Los esfuerzos causan las deformaciones y en el momento en que un material no puede deformarse más, sobreviene la fractura.

Tradicionalmente el análisis de esfuerzos en un componente estructural es realizado considerando que el material es un continuo; esto significa que no existen huecos, grietas ni defectos en el material y por lo tanto los esfuerzos generados por las cargas externamente impuestas son calculados considerando el total del área de la sección donde son transmitidos los esfuerzos (esta suposición también se aplica en suelos, considerando así un material homogéneo).

Este tipo de análisis es conocido como mecánica del medio continuo. Bajo este concepto, el análisis del comportamiento mecánico de un sólido se hace bajo el siguiente procedimiento:

- Definición de la geometría de la pieza o estructura.
- Definición o cálculo de las cargas.
- Cálculo o medición de los esfuerzos.
- Cálculo de los desplazamientos y deformaciones resultado de los esfuerzos generados.

Una vez conocidos estos cuatro aspectos, se selecciona el material cuya resistencia sea superior a los esfuerzos calculados o bien, se define una geometría tal, que los esfuerzos presentes no superen la resistencia del material. En todo caso, los



desplazamientos y deformaciones existentes deben mantenerse debajo de un valor tal, que no alteren el funcionamiento de la pieza o estructura.

En resumen, la base del diseño de un componente con base en la mecánica del medio continuo es el componente que tenga la capacidad de soportar y transmitir cargas menores a su resistencia, que se establece como el *esfuerzo máximo permisible*.

Así, como ilustra la Figura 2, en el diseño tradicional, el ingeniero juega con tres variantes que son: la resistencia del material, definida por sus propiedades en tensión; la geometría, caracterizada por la forma y tamaño de la sección transversal que soporta los esfuerzos y las cargas, para las cuales considera los valores normales de servicio y sobrecargas eventuales.

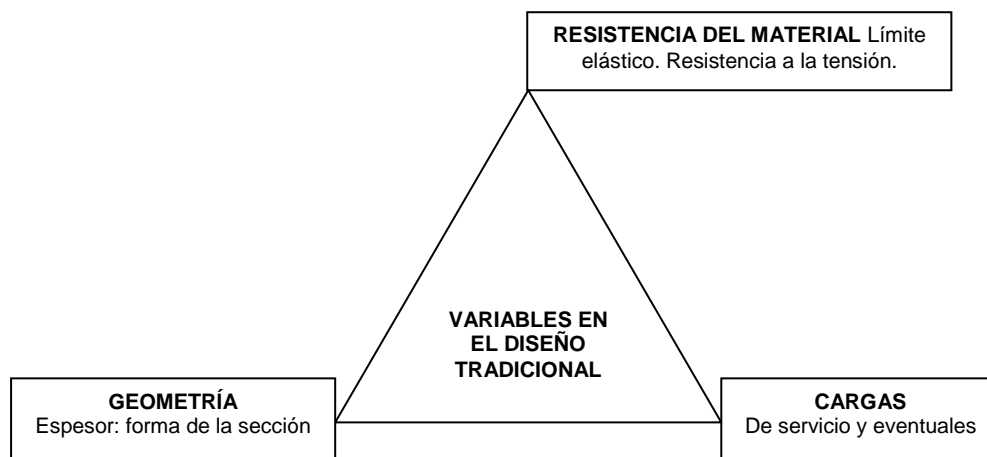


Figura 2: Variables del diseño de componentes estructurales por mecánica del medio continuo, González L; 2002.

Para llevar a cabo el diseño con base en la mecánica del medio continuo es necesario conocer:

- La distribución de esfuerzos en la sección transversal del componente, en función de las cargas, geometría y dimensiones del mismo.
- El valor de la resistencia última y el límite de cedencia del material.
- La forma y dimensiones de la sección transversal del componente y sobre la cual esta definidos los esfuerzos.

Estos tres factores están relacionados en forma general por la definición matemática del esfuerzo, que es

$$\sigma = P / A.$$

Ecuación 1: Definición matemática de esfuerzo.

Donde  $\sigma$  es el esfuerzo, P es la carga o fuerza externa que actúa sobre el componente y A es la magnitud del área de la sección transversal. El criterio general de diseño es usualmente



El componente es propenso a la falla, si  $\sigma > EMP$

Ecuación 2: Relación de esfuerzo cuando es propenso a fallar.

En EMP es el esfuerzo máximo permisible en el diseño tradicional, por lo general, se busca prevenir la deformación plástica, ya que una pieza deformada plásticamente no cumplirá su función eficientemente; por lo que el esfuerzo máximo permisible a considerar en la estructura, es el *límite de fluencia* ( $\sigma_0$ ). Bajo esta condición todas las deformaciones en el material son elásticas y la magnitud de las deformaciones en la pieza son solo función del *módulo elástico* (E) del material. Este criterio está basado en el comportamiento típico esfuerzo-deformación de los materiales en el ensayo de tensión uniaxial, el cual se muestra esquemáticamente en la Figura 3.

12

En esta figura, se observa que un material sometido a un esfuerzo de tensión, primero ocurre una deformación elástica, cuya magnitud es proporcional al esfuerzo (la constante de proporcionalidad es el módulo elástico E); seguida de una deformación plástica, después de sobrepasar el *esfuerzo de fluencia* ( $\sigma_0$ ). Durante la deformación, hasta alcanzar un valor máximo, llamado *resistencia máxima* ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ).

Después de este punto el esfuerzo decrece, porque se forma una constricción en la sección transversal de la pieza, llamada *cuello*, hasta llegar al punto de fractura. La deformación máxima hasta el punto de fractura se conoce como *ductilidad*. Como la fractura es una etapa posterior a la deformación plástica, se supone que un diseño contra deformación plástica automáticamente es un diseño contra fractura.

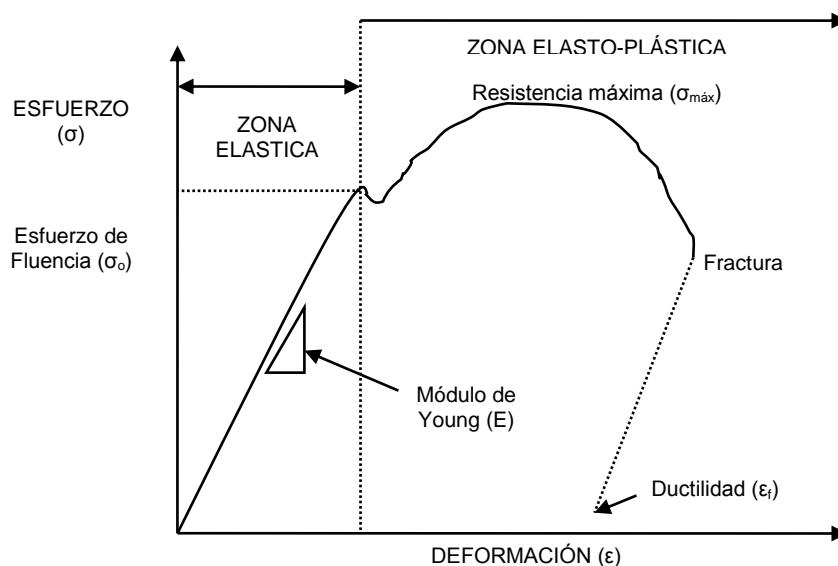


Figura 3: Comportamiento típico esfuerzo contra deformación de un material en tensión uniaxial, González L; 2002.

Para compensar la presencia de esfuerzos adicionales introducidos durante la fabricación, ensamble o servicio y de defectos que incrementen los esfuerzos, el esfuerzo máximo permisible o esfuerzo de diseño de seguridad, el cual típicamente varía de 1 hasta 10, dependiendo del tipo de aplicación, servicio, calidad del material, etc. Entre más desconfianza se tenga acerca de las cargas en servicio y calidad del material y entre más graves sean las posibles consecuencias de una falla, más alto es el factor de seguridad. De esta manera, al diseñar y poner en servicio un componente estructural, se definen al menos cuatro de esfuerzos, como muestra la Figura 4.



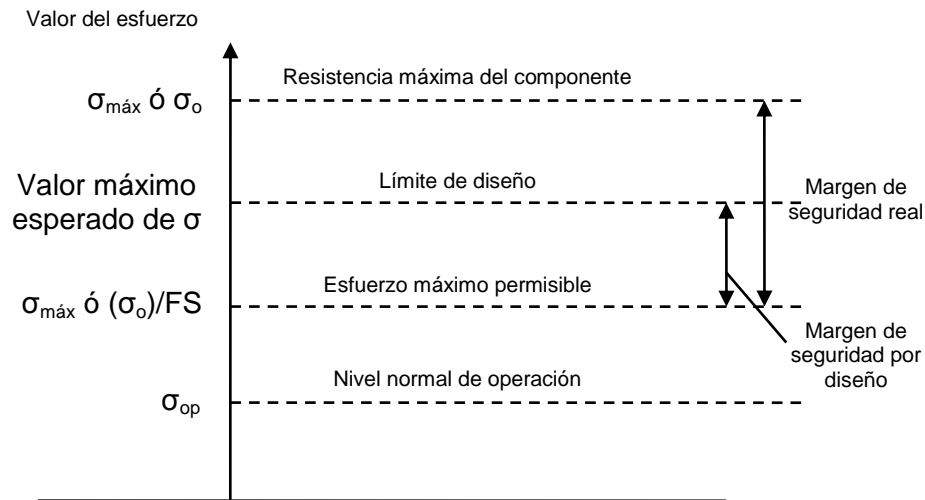


Figura 4: Definición de los niveles de esfuerzo en un componente estructural, González L; 2002.

En casos muy especiales, el diseño se realiza contra colapso plástico. El colapso es la fractura precedida de la deformación plástica de la totalidad del componente; en este caso el esfuerzo rebasa la resistencia última a la tensión en la sección transversal del material y la falla ocurre cuando el material agota su capacidad de continuar deformándose plásticamente.

El diseño contra fracturas es para cuando se encuentra una grieta es una estructura o un defecto que se comporte como tal, la situación descrita antes cambia por completo. Los desplazamientos y deformaciones serán generalmente mayores, sobre todo en la región de la grieta; habrá una concentración de esfuerzos en el extremo de la grieta y con esto una deformación local muy superior a la deformación global y finalmente, las sustancias agresivas del medio ambiente encontrarán una trayectoria hacia el interior del material. Esto tiene las siguientes consecuencias:

- Reducción de la capacidad de soportar cargas.
- Mayores desplazamientos y distorsiones.
- Desempeño inadecuado y riesgo de falla.
- Reducción en la vida útil.

La experiencia ha demostrado que el considerar la presencia de grietas en el diseño y análisis de un componente estructural es muy importante por las siguientes razones: toda grieta eventualmente conduce a una falla; por fractura la falla es generalmente inesperada y catastrófica y cuando las condiciones de servicio propician la propagación de grietas, el periodo de tiempo en que una grieta que se propaga hasta alcanzar un tamaño que ocasiona una falla, constituye el límite de la vida útil de todo componente estructural.

Ante la inevitable presencia de defectos en estructuras y componentes mecánicos y su defecto en el servicio se ha introducido recientemente el concepto de *integridad estructural*, que puede definirse con *el nivel de capacidad de un componente estructural para desempeñar la función para la cual fue concebido en función de si contenido de defectos*. La evaluación de la integridad estructural requiere por lo tanto de un *análisis de integridad*, que se refiere a la inspección de la estructura



para determinar el contenido de defectos, la recopilación de los datos de diseño y condiciones de operación y el análisis de comportamiento de los defectos. Este último aspecto es el que se apoya en la mecánica de la fractura.

El análisis de defectos con base en la mecánica de fractura consta de dos partes principales.

- a) La determinación de resistencia residual.
- b) La predicción de vida residual o remanente.

La resistencia residual se define como la carga que puede soportar un componente que contiene defectos de dimensiones conocidas; también puede establecerse en términos del tamaño máximo de defecto que puede resistir el componente bajo las cargas normales de operación y la vida residual es el tiempo que puede seguir operando el componente bajo condiciones de carga y conteniendo defectos conocidos, sin que ocurra la falla.

Un componente estructural que contiene defectos puede seguir trabajando aun conteniendo defectos si la carga que puede seguir soportando es mayor que la carga normal de operación y el tiempo de falla sea mayor que el tiempo de servicio.

La mecánica de la fractura relaciona el tamaño y forma de una grieta y las fuerzas o cargas que conducen a la fractura de un componente de forma y dimensiones definidas.

Para esto, se apoya en el cálculo de la distribución de esfuerzos, deformaciones, desplazamientos alrededor de una grieta y en el establecimiento de los balances de energía que tienen lugar durante la extensión de una grieta. Existen varias metodologías de análisis de componentes agrietados, dependiendo de la extensión de la deformación plástica que precede a la fractura. De acuerdo con la extensión de la deformación plástica, las categorías de la fractura son:

- a) *Fractura lineal elástica*: cuando la extensión de la zona plástica está confinada a una pequeña región frente a la punta de la grieta y la deformación del resto del cuerpo es elástica.
- b) *Fractura elasto plástica*: la zona plástica se extiende en el total remanente del ancho de la pieza, pero permaneciendo como una región relativamente estrecha alrededor del plano de la grieta.
- c) *Colapso plástico*: la fractura es precedida de deformación plástica es generalizada.



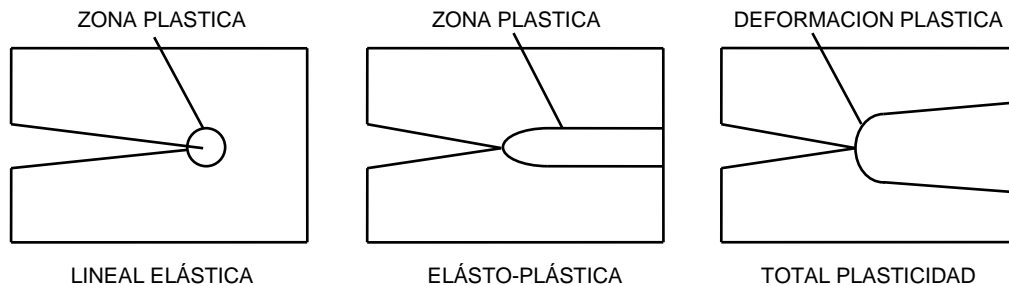


Figura 5: Categorías de fractura de acuerdo a la extensión de la zona plástica, González L; 2002.

La mecánica de fractura considera que el proceso de fractura inicia con una grieta que se propaga hasta la separación final o fragmentación de la pieza. Si durante la propagación de la grieta, ésta puede detenerse al disminuir o desaparecer los esfuerzos, se dice que la propagación es *estable* y si la grieta se propaga de manera rápida, auto acelerada y es prácticamente imposible de detener, entonces la propagación es *inestable*.

La mecánica de fractura también separa la fractura en función de su dependencia del tiempo. De acuerdo con esto, la fractura se clasifica en:

- a) Fractura estática: es la fractura bajo una sola aplicación de carga, relativamente independiente del tiempo y con una rapidez de propagación muy grande en condiciones de inestabilidad. Estos tipos de fractura incluyen la fractura frágil, la ruptura dúctil y el colapso plástico.
- b) Fractura retardada o propagación de grietas: es en la que la propagación de las grietas transcurre a través del tiempo o por la acción de cargas repetitivas o fluctuantes. Es de carácter estable e incluye a la fatiga, la propagación de grietas por termo fluencia y al agrietamiento por corrosión y esfuerzos.

Todo lo antes mencionado es esencialmente para comportamiento en elementos de acero, pero lo tomamos como principios básicos que nos permite entender el comportamiento de elementos homogéneos de un solo compuesto y que constituyen la masa y de comportamiento específico que tiene gran similitud con una masa de suelo, en nuestro caso de arcilla.

## 2.1.2. Resistencia de los suelos al corte.

### 2.1.2.1. Resistencia al corte y el modelo de fricción.

Se define a la *resistencia al corte*, o *resistencia al esfuerzo cortante* de un suelo como el valor máximo, o límite, que resiste el suelo al ser cortado dentro de su masa antes de que ceda. Bajo ciertas condiciones, por ejemplo: la flexibilidad conducirá a la formación de una *superficie de deslizamiento por corte*, sobre la cual puede tener una



cantidad apreciable de movimiento de deslizamiento, como en el caso de las avalanchas, rotación de taludes o fallas en excavaciones. La evaluación de los parámetros de la resistencia al corte es parte necesaria de los procedimientos analíticos y de diseño relacionado con cimientos, muros de retención y pendiente de terreno. En esencia, la resistencia al corte en el núcleo de lo que constituye una masa sólida se debe al desarrollo de la resistencia a la fricción entre partículas adyacentes, de modo que los análisis se basan principalmente en el modelo de fricción.

La fuerza transmitida por dos cuerpos en contacto estático Figura 6, puede construirse en dos componentes: la componente *normal*  $N$ , perpendicular a la superficie de deslizamiento y la componente *tangencial*  $\tau$ , paralela a la misma. En el momento en el que se inicia el deslizamiento, la relación  $\tau/N$  habrá llegado a un valor límite (máximo), que recibe el nombre de *coeficiente de fricción* ( $\mu$ ):

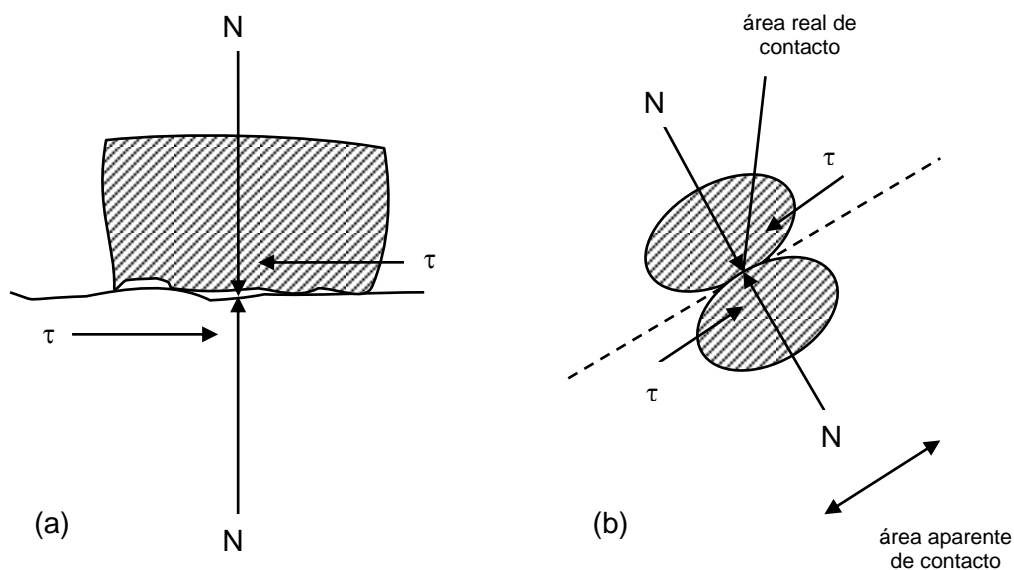


Figura 6: Modelo de fricción, Whitlow R; 1994.



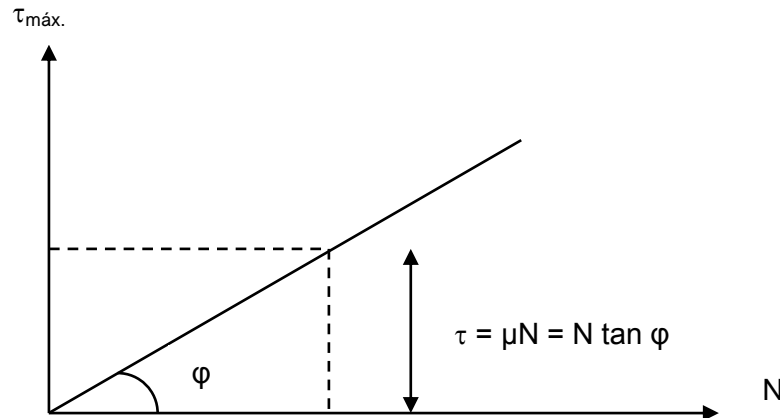


Figura 7: Ángulo de fricción interna, Whitlow R; 1994.

$$\tau \text{ límite} = \mu N$$

Ecuación 3: Definición de esfuerzo cortante límite.

Si se supone que el valor promedio de  $\tau/N$  permanece constante para un material dado, se puede escribir el valor límite de  $\tau$  como sigue:

$$\tau \text{ límite} = N \tan \varphi'$$

Ecuación 4: Esfuerzo cortante límite respecto al ángulo.

Donde  $\varphi'$  = *ángulo de fricción interna* o simplemente *ángulo de fricción*, y es el ángulo dado en la gráfica de  $\tau/N$  de la Figura 7.

Una de las causas de la resistencia a la fricción es, que en los puntos de contacto, las partículas quedan trabadas entre sí. Para que se presenten deslizamientos es necesario que el material pueda determinarse en forma aproximada midiendo la dureza a la indentación. Los valores típicos son del orden de  $4000 \text{ MN/m}^2$  para el acero de herramientas y  $7000 \text{ MN/m}^2$  para el cuarzo. En esta forma, para una herramienta de acero que transmite un esfuerzo normal de  $100 \text{ MN/m}^2$ , el área verdadera de contacto será de aproximadamente  $1/40$  del área aparente. En el caso de una arena típica, el esfuerzo normal debido a  $25\text{m}$  de sobrecarga sería  $0.5 \text{ MN/m}^2$ , por lo que el área verdadera de contacto entre los granos será tan pequeña como  $1/14000$  del área superficial. (Bowden y Taylor, 1950 y 1964),

El modelo de fricción da una base útil para desarrollar descripciones matemáticas del comportamiento del suelo al corte. Sin embargo, se debe ampliar para incluir varios factores importantes peculiares de los suelos. Por ejemplo, cualquier aplicación de carga un suelo indicará cambios apreciables en su volumen y en un suelo saturado se presentarían cambios en el contenido de humedad a una tasa determinada por la permeabilidad. El intervalo de permeabilidad, desde la de arenas hasta la de arcillas abarca unos diez órdenes de magnitud, de modo que las velocidades correspondientes del cambio de volumen varían mucho. El valor límite del esfuerzo cortante está influido tanto por la magnitud como por la velocidad de deformación, así como por la historia de esfuerzos del suelo.



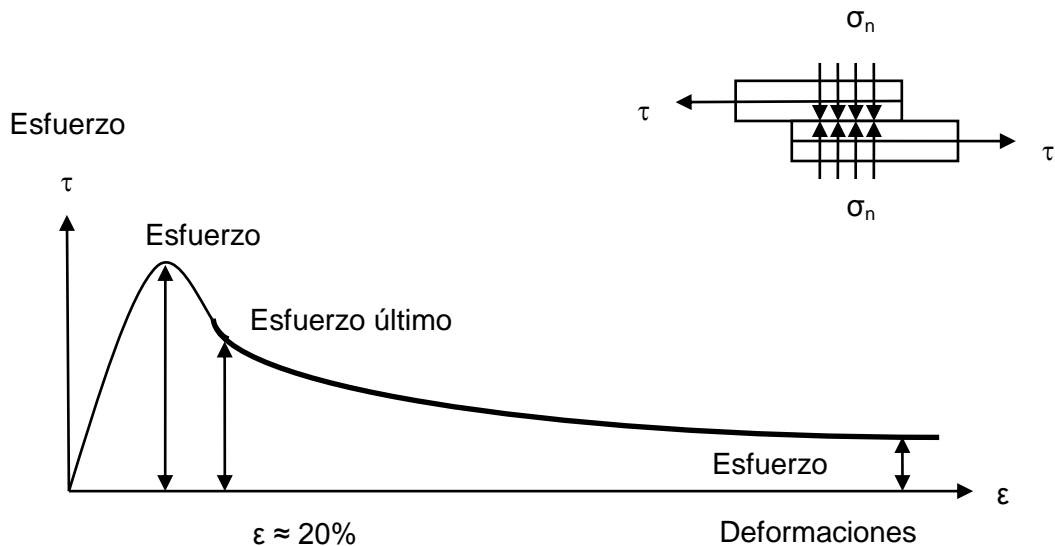


Figura 8: Esfuerzo máximo, último y residual, Whitlow R; 1994.

Veamos primero los efectos de la magnitud de la deformación. Figura 8, muestra una curva típica de esfuerzo cortante/deformación unitaria para el corte de un elemento prismático del terreno. Cuando se corta el elemento a esfuerzo normal constante ( $\sigma_n$ ), el esfuerzo cortante antes que nada aumenta rápidamente mientras que la deformación unitaria aumenta con lentitud. Cuando cede el suelo, la deformación aumenta en forma considerable mientras que el esfuerzo cortante se nivela y a continuación comienza a decrecer. El valor máximo del esfuerzo cortante en el punto de flexibilidad se llama *esfuerzo máximo* y representa el valor límite que corresponde al valor del esfuerzo normal. El esfuerzo cortante continúa decreciendo hasta que se nivela de nuevo a un valor menor, que se llama *esfuerzo último*. **El esfuerzo último representa la resistencia al cortante del material en su volumen crítico.** En la mayor parte de los casos, se alcanzará el valor último a deformaciones unitarias de entre 10 y 20 por ciento.

A deformaciones unitarias mucho mayores, por ejemplo, en las superficies activas de deslizamiento en suelos arcillosos, el esfuerzo cortante límite decrece aún más y cuando los desplazamientos son mayores que un metro, se puede reducir a un valor bajo como el 10 por ciento del esfuerzo máximo. A ese valor muy bajo del esfuerzo con deformación grande se le llama *esfuerzo residual*. Los valores del esfuerzo residual se relacionan con el reordenamiento gradual de las partículas de arcilla en las superficies largas de deslizamientos y quizá también con los efectos de pulimiento o espejo de falla.

- Envoltente de resistencia.

Una *envoltente de resistencia* es una representación de una condición límite particular ( $\tau / \phi'_n$ ). Los puntos bajo la envoltente representan posibles relaciones de esfuerzo anteriores a la flexibilidad, mientras los que están sobre la envoltente representan la relación de esfuerzos en la flexibilidad. No pueden existir puntos reales por encima de la envoltente.



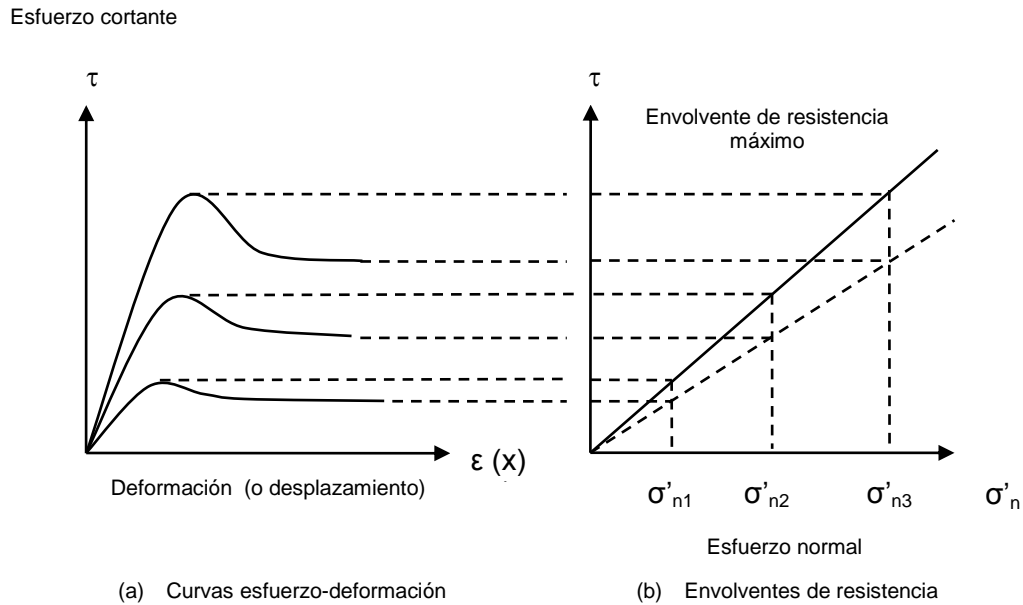


Figura 9: Envolturas de resistencia máxima y residual, Whitlow R; 1994.

La Figura 9, muestra las gráficas esfuerzo/deformación unitaria que resultan de pruebas de corte directo en tres especímenes con drenado del mismo suelo denso o pre consolidado a esfuerzos normales  $\sigma'_{n1} < \sigma'_{n2} < \sigma'_{n3}$ . Cuando se intercambian los valores de los esfuerzos, máximo ( $\tau_f / \sigma'_n$ ) y último ( $\tau_c / \sigma'_n$ ) de esfuerzo cortante empleando la misma escala, hasta intersectar las ordenadas a los largo del eje de esfuerzos normales Figura 9, se obtienen las envolturas correspondientes trazando la recta de mejor ajuste a los puntos graficados. El ángulo entre la envolvente y el eje de esfuerzos normales se llama *ángulo de resistencia al corte* ( $\varphi'$ ) y se puede considerar como buena estimación del ángulo de fricción especificado en la ecuación del modelo:

$$\tau_{\text{límite}} = N \tan \varphi'$$

Ecuación 5: Esfuerzo cortante límite respecto del ángulo efectivo.

Es necesario agregar un subíndice a  $\varphi'$ , para especificar la condición tratada:

$\varphi'_f$  = ángulo máximo de resistencia al corte.

$\varphi'_{\text{últ}}$  = ángulo último de resistencia al corte.

$\varphi'_c$  = ángulo crítico de resistencia al corte (se puede tomar como  $= \varphi'_{\text{últ}}$ ).

$\varphi'_r$  = ángulo residual de resistencia la corte.

- Resistencia al corte sin drenado y cohesión.

Las gráficas que se mostraron arriba se relacionan con las condiciones de carga con drenado, es decir, no se induce un aumento en la presión de poro. Bajo condiciones sin drenado, los suelos saturados tendrán aparentemente un esfuerzo cortante límite constante para todos los valores del esfuerzo normal, porque, según la ecuación  $\Delta\sigma'_n = \Delta\sigma_n - \Delta u$ . Así, un aumento en el esfuerzo normal total ocasiona un aumento semejante en la presión de poro y por lo tanto el esfuerzo efectivo normal permanece constante. Una serie de pruebas sin drenado en especímenes saturados del mismo suelo, efectuada bajo esfuerzos normales diferentes dará como resultado una envolvente de resistencia similar a la de la Figura 10.



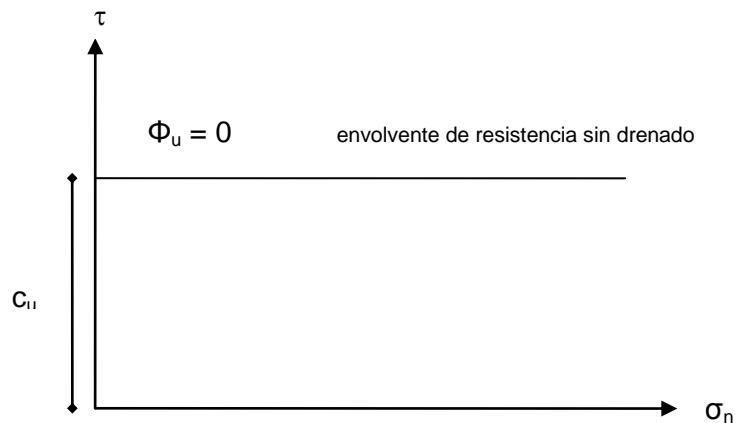


Figura 10: Envolvente de resistencia al corte sin drenado, Whitlow R; 1994.

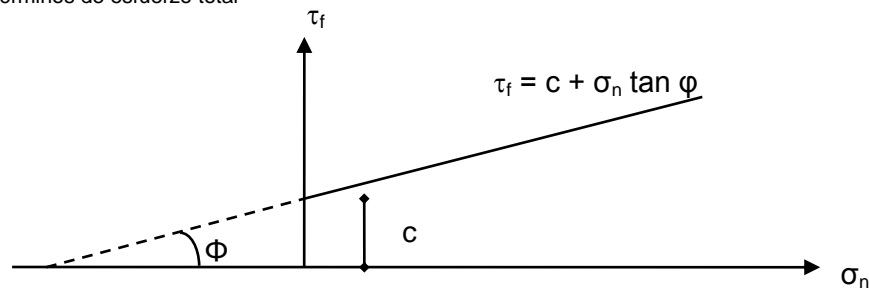
El ángulo aparente de resistencia al cortante ( $\phi_u$ ) es cero y en la envolvente de resistencia intersecta el eje de esfuerzo cortante en un valor que se llama *resistencia al corte sin drenado* o bien *cohesión sin drenado* ( $c_u$ ) del suelo. Esta resistencia del suelo saturado aparentemente es constante. Sin embargo, se deben notar dos condiciones importantes relacionadas con a cualquier valor observado de  $c_u$ . Primero, el valor es relevante solo para una masa de suelo sin drenado y segundo, que el valor corresponde a determinado contenido de humedad y volumen específico. Se obtendría un valor distinto de resistencia al corte sin drenado a un contenido diferente de humedad o diferente volumen específico.

La palabra *cohesión* puede dar ideas erróneas y con frecuencia se entiende mal. La opinión anterior acerca de la naturaleza de esta fuerza aparente que sujeta a los granos de suelo entre si se basaba en la adhesión entre las partículas como consecuencia de las condiciones electrostáticas de las superficies de los minerales arcillosos. En el caso de la carga sin drenado, la cohesión aparente está relacionada con los efectos de la presión de poro. Las pruebas de resistencia con drenado, llevadas a cabo en arcillas pre consolidadas muestran una ordenada al origen de la cohesión ( $c'$ ) que parece sugerir que puede existir una verdadera fuerza de cohesión entre las partículas sólidas del suelo Figura 11. Sin embargo, es muy poco probable lo anterior, porque las pruebas con drenado en especímenes del mismo suelo bajo condiciones de consolidación normal producen claramente una ordenada al origen  $c' = 0$ . Es mucho más probable que un valor obtenido para  $c' > 0$  sea el resultado del trabajo adicional que se efectúa contra un aumento de volumen, en el caso de las muestras pre consolidadas. Para las arcillas remoldeadas, incluyendo arcillas en las cercanías de superficies de deslizamientos con gran deformación (condiciones residuales), se debe de tomar el valor de  $c'$  como igual a cero.

$c_u$  = resistencia al cortante, sin drenado (o cohesión sin drenado).  
 $c'$  = cohesión aparente (referida al esfuerzo efectivo).



(a) En términos de esfuerzo total



(b) En términos de esfuerzo efectivo

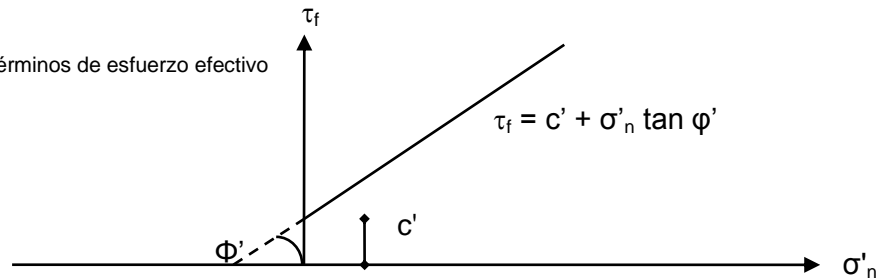


Figura 11: Ecuación de Coulomb y envolvente de falla, Whitlow R; 1994.

- Falla al esfuerzo cortante y sus parámetros.

Coulomb fue el primero en sugerir, en 1776, tanto una ecuación simple como la teoría que relaciona la resistencia al corte de un suelo, con el esfuerzo de compresión aplicado. Supuso que la resistencia cohesiva es constante para un suelo dado e independiente del esfuerzo de compresión aplicado, pero que la resistencia a la fricción varía en forma directa con la magnitud del esfuerzo normal desarrollado en el plano de deslizamiento. En esta forma, es posible escribir la ecuación de una línea recta como sigue:

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \varphi$$

Ecuación 6: Esfuerzo cortante a lo largo de plano de deslizamiento.

Donde

 $\tau_f$  = esfuerzo cortante a lo largo del plano de deslizamiento.

c = cohesión aparente.

 $\sigma_n$  = esfuerzo normal que actúa en el plano de deslizamiento. $\varphi$  = ángulo de fricción interna.

En la Figura 11, se ilustra una representación gráfica de la ecuación de Coulomb. Puede apreciarse que el valor de la *cohesión* (c) está representado por la *intersección* en el eje del esfuerzo cortante y que la tangente del ángulo de fricción interna ( $\varphi$ ) es de hecho la *pendiente* de la recta.

En la actualidad, generalmente se acepta que la resistencia cortante del suelo está relacionada con el *esfuerzo efectivo*. Por consiguiente, la expresión modificada se transforma Figura 11, en:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \varphi'$$

Ecuación 7: Definición de esfuerzo cortante efectivo.



Donde

$c'$  = cohesión aparente con respecto al esfuerzo efectivo.

$\sigma'_n = \sigma - u$  = esfuerzo normal efectivo en el plano de deslizamiento.

$u$  = presión de poro en el plano de deslizamiento.

$\phi'$  = ángulo de fricción interna con respecto al esfuerzo efectivo.

Los parámetros de la resistencia al corte  $c'$  y  $\phi'$  serán para un suelo determinado, siempre y cuando la relación de vacíos, la densidad y la presión de poro, también permanezcan constantes para diferentes valores del esfuerzo normal. No puede ser éste el caso, ni en el campo ni durante las pruebas de laboratorio, porque bajo carga con drenado cambiara el volumen y bajo carga sin drenado cambiara la presión de poro. Por lo tanto es necesario referir los valores medidos al tipo de prueba y condiciones bajo las cuales se midieron.

22

- Medición de la resistencia al corte y parámetros prácticos.

El objetivo de las pruebas de resistencia al corte consiste en establecer valores empíricos de los parámetros de dicha resistencia. Las condiciones de drenaje durante la prueba son de gran importancia y tienen efecto considerable sobre los valores medio. Por consiguiente, resulta crítico que los valores medidos para la cohesión o el ángulo de fricción se refieran a las condiciones de prueba. Las pruebas de corte se llevan a cabo en dos etapas principales que implican los siguientes casos de drenado.

*Sin drenaje:* este tipo de pruebas que a veces se llaman pruebas rápidas sin drenado no se permite el drenaje del agua en los poros, por lo que cualquier aumento del esfuerzo total produce el consiguiente aumento en la presión de poro. En el caso de suelos completamente saturados (coeficiente de presión de poro  $B = 1$ ), el aumento de la presión de poro será igual al incremento del esfuerzo total; por consiguiente, no se produce un aumento del esfuerzo efectivo:

Si  $\Delta u = \Delta \sigma_n$ ; entonces  $\Delta \sigma' = 0$ , lo que da la Figura 11:  $\tau_f = c_u$ .

Donde  $c_u$  = cohesión sin drenar (resistencia al cortante sin drenar).

Ya que no se toma en cuenta la presión de poro, la resistencia sin drenado que se mide así, solo se refiere al esfuerzo total y es confiable solamente cuando el espécimen de prueba está saturado; es decir, para un suelo saturado  $\phi_u = 0$ . El valor de  $c_u$  depende también al esfuerzo último (estado crítico); ya que no se desarrolla un esfuerzo máximo mayor.

*Pruebas con consolidación sin drenar:* en este procedimiento el espécimen de prueba se deja consolidar primero bajo condiciones de esfuerzo isotrópico constante y drenado completo, después de lo cual se aumenta la carga axial sin permitir drenado completo, después de lo cual se aumenta la carga axial sin permitir drenado. La etapa inicial de consolidación lleva al suelo a un estado prescrito de volumen y de presión de poro, a partir del cual se pueden medir con exactitud los siguientes cambios en volumen o en la presión de poro.

Las pruebas con consolidación sin drenar se emplean para obtener los parámetros  $c'$  y  $\phi'$  del esfuerzo efectivo y para obtener las resistencias al corte sin drenado, se deben identificar como  $c_{cu}$  y  $\phi_{cu}$ .

*Pruebas con drenado:* en la pruebas con consolidación con drenaje, el espécimen se somete primero a una consolidación en condiciones de esfuerzo



constante isotrópico y drenaje total. Cuando se completa la etapa de consolidación, se incrementa la carga axial a un ritmo suficientemente lento para que no presente un incremento en la presión de poro. El incremento en el esfuerzo efectivo es entonces igual al incremento del esfuerzo total ( $\Delta\sigma' = \Delta\sigma$ ).

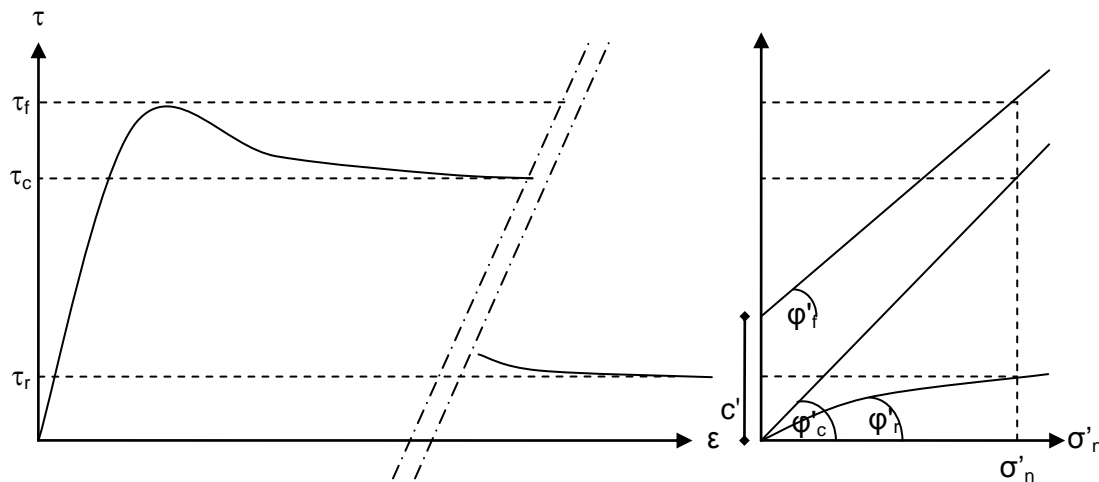


Figura 12: Resistencias, máximas, última y residual, Whitlow R; 1994.

Los esfuerzos máximos se desarrollan en suelos densos o muy consolidados, dando lugar a la envolvente de falla.

$$\tau_f = c' = \sigma'_n \tan \phi'_f$$

Ecuación 8: Esfuerzo cortante respecto del ángulo máximo.

En la cual  $\phi'_f$  = ángulo máximo de fricción.

Para suelos con consolidación normal le envolvente de falla basada en el esfuerzo efectivo último por el origen, es decir,  $c' = 0$ , de modo que:

$$\tau_f = \sigma' \tan \phi'_c$$

Ecuación 9: Esfuerzo cortante respecto del ángulo crítico.

En el cual  $\phi'_c$  = ángulo crítico de fricción.

Para condiciones residuales que implican grandes deformaciones, la envolvente de falla se curva ligeramente a bajos esfuerzos normales y  $c'_r$  tiende a cero. El ángulo residual de fricción ( $\phi'_r$ ) depende, por lo tanto, del esfuerzo, pero con frecuencia se emplea la siguiente ecuación:

$$\tau_f = \sigma'_n \tan \phi'_r$$

Ecuación 10: Esfuerzo cortante respecto del ángulo residual.

La Figura 12, muestra tres envolventes de resistencia (de falla) en relación con una curva esfuerzo/deformación.



- Tipos de pruebas de corte.

Existen diversas pruebas de corte, tanto para el laboratorio como aplicaciones *in situ*. En la lista que se da más adelante se mencionan estas pruebas y en las secciones posteriores se describen las de mayor importancia. Todas ellas tienen una característica común que consiste en el uso de muestras tanto en el caso de pruebas *in situ* como cuando las muestras se llevan al laboratorio; en especial cuando se requieren muestras inalteradas, en las que se debe preservar la estructura *in situ*, el contenido de humedad y la densidad.

### 2.1.2.2. Prueba de corte directo.

Este ensayo recibe el nombre de prueba de corte directo, puesto que se miden directamente los esfuerzos normal y de corte en el plano de falla. Primero se corta un prisma rectangular de una muestra de suelo (o según se requieran), que se introduce con presión en una caja metálica dividida en dos mitades horizontalmente Figura 13. En el aparato de tipo estándar la caja es de 60 x 60 mm, pero para suelos de granos gruesos y quizás arcillas agrietadas se usa una versión más grande.

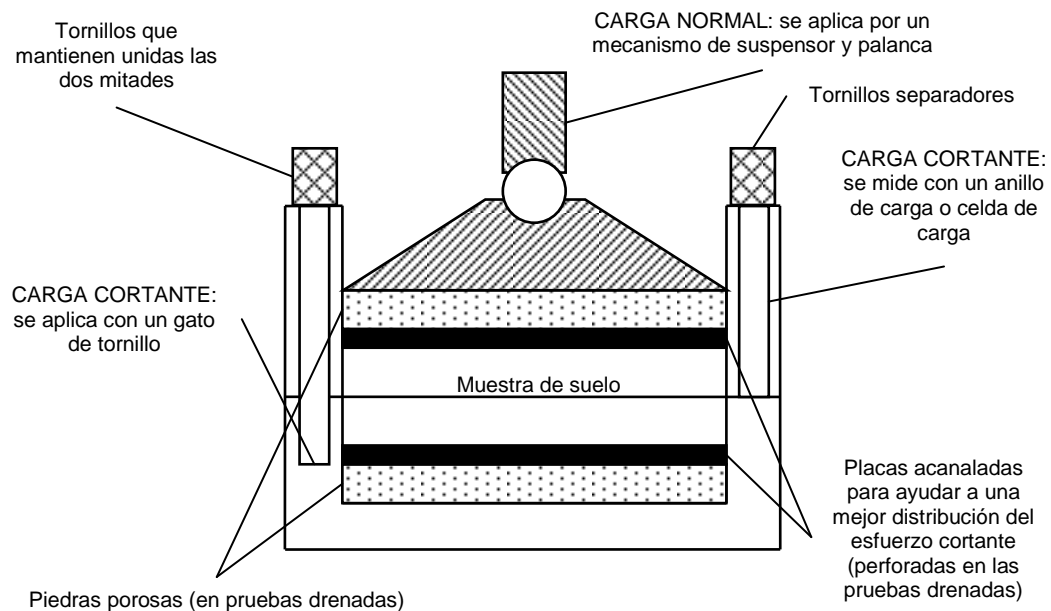


Figura 13: Caja de corte directo, Whitlow R; 1994.

Manteniendo unidas las dos mitades de la caja, el espécimen del suelo se coloca en forma de emparedado entre dos placas metálicas acanaladas y dos piedras porosas. Sobre la parte superior de la caja se coloca una almohadilla de presión y la caja misma se coloca en una caja externa (que también sirve de baño de agua), que corre horizontalmente e rodamientos de rodillos. Después se aplica una carga vertical sobre el suelo, usando un suspensor estático de pesas. Después de extraer los tornillos que mantienen unidas las dos mitades de la caja, el suelo se somete a la acción del corte mediante una fuerza horizontal aplicada con un gato de tornillo a una velocidad de deformación constante. La magnitud de la fuerza cortante se mide mediante un anillo de carga o un transductor de carga.

Este mismo procedimiento se repite en otros cuatro o cinco especímenes tomados de la misma muestra de suelo. Se calculan y se grafican los valores del esfuerzo normal y del esfuerzo cortante en el plano horizontal de falla; en los aparatos



modernos se logra lo anterior mediante un graficador x-y o una microcomputadora. Las envolventes de resistencia al cortante que corresponden a los esfuerzos máximo y último se ajustan de forma de líneas de mejor correlación que pasan por los puntos  $\tau/\sigma_n$  que se graficaron.

- Resistencia al corte y características de deformación.

La relación entre la resistencia al corte de un suelo y sus características de deformación dependen de manera primordial de la forma en que varía el volumen durante el proceso de corte. En el caso de las arenas, el grado de trabazón entre las partículas es mayor en la medida en que el suelo tiene un mayor grado de compactación. Se requiere una expansión o dilatación inicial para romper esta trabazón de partículas en los puntos de contacto intergranular. En esta forma, el esfuerzo cortante primero se elevará con gran rapidez hasta un nivel máximo para un valor correspondiente bastante bajo, de deformación por corte, con su consecuente aumento de volumen Figura 14. En este nuevo volumen, el grado de trabazón se reduce; por consiguiente, a medida que el desplazamiento continúa el esfuerzo cortante decrece y finalmente se nivela en su valor último.

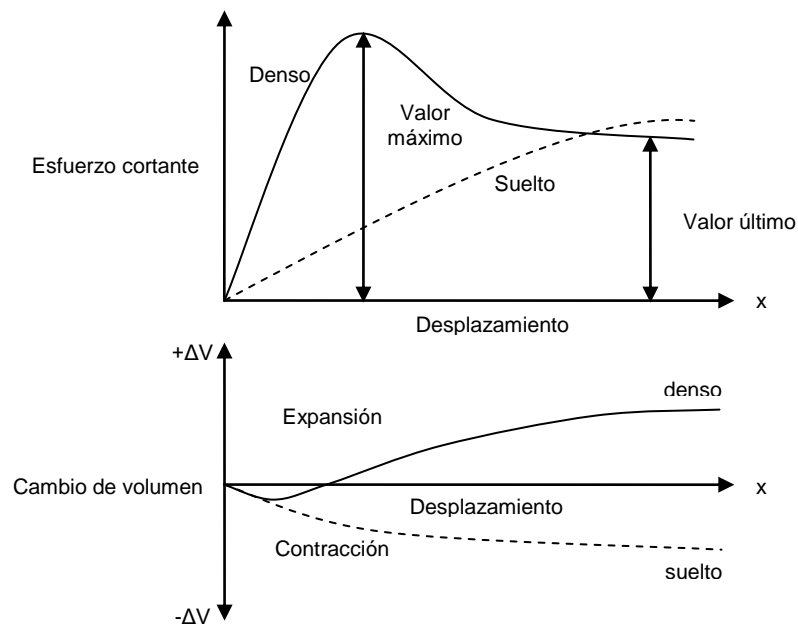


Figura 14: Comportamiento del esfuerzo cortante en suelos densos y sueltos, Whitlow R; 1994.

Este comportamiento de una arena densa contrasta con el de una arena suelta, puesto que esta última se verifica un aumento uniforme del esfuerzo cortante a medida que se incrementa el desplazamiento Figura 14. El volumen disminuye y el suelo se contrae a un estado crítico. Está claro que la diferencia entre los valores máximo y último dependen del volumen original más suelto se contraerá. Además, el esfuerzo máximo es función del estado de empacamiento y del volumen original.

En el caso de arenas muy sueltas, el volumen es mucho mayor que el valor crítico y por lo tanto una pequeña cantidad de desplazamiento estará acompañada de un cambio apreciable de volumen. Es probable que esos suelos se compacten con facilidad bajo cargas o vibraciones relativamente pequeñas, originando contracción y asentamiento.



El ángulo natural bajo el cual se mantiene una pila de arena seca o grava sin soporte se llama *ángulo de reposo* y es equivalente a  $\phi'_{\text{suelto}}$ , o al valor último  $\phi'_c$ . Sin embargo, se debe de hacer notar que si el suelo está húmedo, la succión de poro que resulta aumentará el esfuerzo efectivo entre los granos y con ello será mayor el ángulo de la pendiente, como por ejemplo en un castillo de arena a la orilla del mar.

- Ventajas y desventajas de la prueba de corte directo.

Tal como se mencionó, en la prueba de corte directo, se miden directamente los esfuerzos cortante y normal en el plano de la falla. Sin embargo, la *prueba* de corte de uso más común es la de *compresión triaxial*, que es una *prueba indirecta*. A continuación se resumen las ventajas y desventajas del método de corte directo en comparación con el método triaxial:

- Ventajas
  - a) Se miden directamente tanto el esfuerzo cortante como el esfuerzo normal en el plano de la falla; los parámetros de la resistencia al corte ( $c'$  y  $\phi'$ ) se definen en términos de estos esfuerzos.
  - b) Es posible mantener un esfuerzo normal absolutamente constante durante toda la prueba.
  - c) Es más fácil ensayar suelos sin cohesión, tales como gravas y arenas; las pruebas con drenaje en este tipo de suelos pueden llevarse a cabo en un tiempo bastante corto.
  - d) Es más fácil medir los cambios de volumen durante la prueba.
  - e) Usando una caja de corte directo reversible, es posible llevar a cabo pruebas que requieran grandes desplazamientos; por ejemplo, pruebas de resistencia residual en arcillas.
- Desventajas.
  - a) La distribución del esfuerzo cortante sobre el plano de falla se supone uniforme, pero de hecho no lo es.
  - b) No es posible controlar el drenaje de la muestra o medir la presión de poro en el agua dentro de la muestra. Por consiguiente, solo se pueden llevar a cabo mediciones del esfuerzo total, excepto cuando la rapidez de corte se mantiene lo suficientemente baja como para asegurar que no hay aumento en la presión de poro, por ejemplo en suelos sin cohesión.
  - c) El esfuerzo normal no puede variarse fácilmente.

La prueba de corte directo nos ayuda a estudiar el comportamiento del suelo con condiciones de falla o agrietamiento, porque nos permite obtener tanto el esfuerzo cortante máximo como el residual y el esfuerzo residual es básico para entender cómo es que influye esa falla en el esfuerzo residual.

## 2.2. Estabilidad de los taludes.

Las obras de infraestructura como lo son carreteras y ferrocarriles, canales, explotaciones mineras y en general cualquier construcción que requiera una superficie plana en una zona de pendiente, o alcanzar una profundidad determinada por debajo de la superficie, precisan la excavación de taludes (desmontes si dan lugar a un solo talud a cada lado). Los taludes se construyen con la pendiente más elevada que permite la resistencia del terreno, manteniendo unas condiciones aceptables de estabilidad.



En general, los taludes en ingeniería civil alcanzan alturas máximas de 40 o 50 metros y se proyectan para ser estables a largo plazo. Sin embargo las cortas mineras pueden alcanzar profundidades de varios centenares de metros. Los taludes permanentes para la construcción de infraestructura o con fines de edificación se diseñan para ser estables a largo plazo, teniendo medidas de estabilización complementarias cuando no se tiene los recursos económicos o de otro tipo.

Los estudios geológicos y geotécnicos de taludes están dirigidos al diseño de taludes estables en función de las condiciones requeridas (corto, mediano o largo plazo, relación costo-seguridad, grado de riesgo, etc.), así como a la estabilización de taludes inestables.

Los tipos de movimiento se clasifican en base a los tipos de materiales involucrados, distinguiéndose principalmente entre materiales rocosos, derrubios y suelos y al mecanismo y tipo de rotura, considerando otros aspectos como el contenido de agua en el terreno, la velocidad y magnitud del movimiento.

- Deslizamientos.

Los deslizamientos son movimientos de masas de suelo o roca que deslizan, moviéndose relativamente respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura netas al superarse la resistencia al corte de estas superficies; la masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido; la velocidad puede ser muy variable, pero suelen ser procesos rápidos y alcanzan grandes volúmenes. Pueden producirse deslizamientos en derrubios (por ejemplo en los coluviones de las laderas rocosas muy alteradas y fracturadas, a favor del contacto con el sustrato, o en laderas rocosas muy alteradas y fracturadas a favor del contacto con la roca sana), que generalmente dan lugar a flujos de derrubios, ya que suelen ocurrir en condiciones de saturación del material. El termino derrubio se refiere a un material suelto, sin consolidar, con una proporción significativa de material grueso (Varnes, 1988).



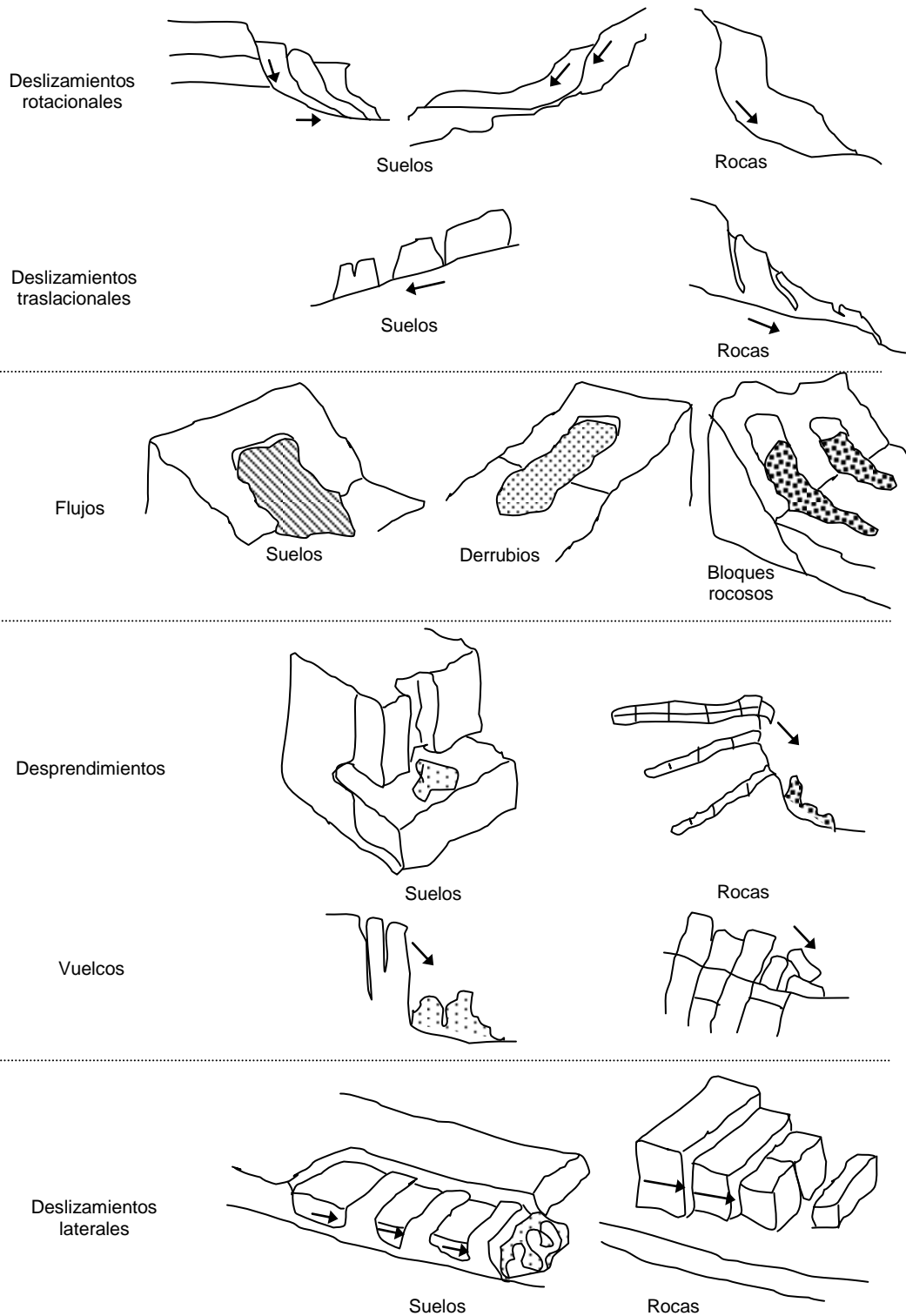


Figura 15: Tipos de deslizamiento o falla en talud, González L; 2004.

Los **deslizamientos rotacionales** son más frecuentes en **suelos cohesivos homogéneos**. La rotura superficial o profunda tiene lugar a favor de superficies ligeramente curvas o en forma de cuchara. Una vez iniciada la inestabilidad, la masa empieza a rotar, pudiendo dividirse en varios bloques que deslizan entre si y dan lugar a escalones con la superficie basculada hacia la ladera y a grietas de tracción estriadas. Sus dimensiones más frecuentes varían entre varias docenas y centenares de metros, tanto en longitud como de anchura y pueden ser superficiales o profundos



(el límite puede establecerse en torno a los 10m). La parte inferior de la masa deslizada se acumula al pie de la ladera formando un depósito tipo lóbulo con grietas de tracción transversales. Dependiendo del **tipo de suelo** y del **contenido de agua**, se pueden **generar flujos**.

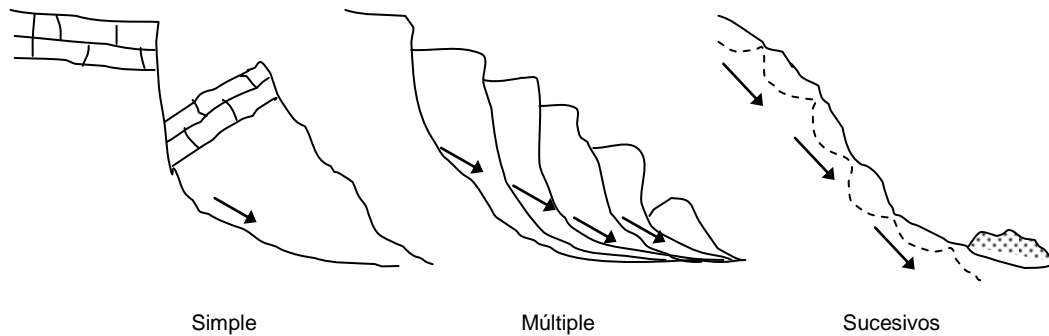


Figura 16: Tipos de deslizamiento rotacional, González L; 2004.

En la anterior Figura 16, se presentan los diferentes modelos de deslizamiento curvos o rotacionales, los de tipo sucesivo se dan en arcillas duras fisuradas con pendientes cercanas a su ángulo de equilibrio y en arcillas blandas muy sensitivas, donde el primer deslizamiento da lugar a una acumulación de arcilla remoldeada, que fluye y deja sin sustento al material superior de la ladera, provocándose sucesivas roturas. Son roturas poco profundas pero de gran continuidad lateral.

En los deslizamientos traslacionales la rotura tiene lugar a favor de superficies planas de debilidad preexistentes (superficies de estratificación, contacto entre diferentes tipos de materiales, superficie estructural, etc.), en ocasiones, el plano de rotura es una fina capa de material arcilloso entre estratos de mayor competencia. No suelen ser muy profundos, aunque sí muy extensos y alcanzan grandes distancias. Pueden darse en suelos y en rocas y las masas que deslizan en ocasiones son bloques rectangulares previamente independizados por discontinuidades o por grietas de tracción.

- Flujos.

Los flujos o coladas son movimientos de masas de suelo (flujos de barro o tierra), derrubios (coladas de derrubios o debris flow) o bloques rocosos con abundante presencia de agua, donde el material está disgregado y se comporta como un fluido, sufriendo una deformación continua.

Además existen los desprendimientos, avalanchas rocosas, desplazamientos laterales con las precipitaciones y condiciones climáticas que puedan influir en cada caso, así como de los cambios de nivel de agua, procesos erosivos, terremotos, volcanismo y acciones antrópicas. Pero que no tocaremos puesto que son influyentes solo para rocas y macizos rocosos.

Para el caso de los suelos arcillosos, el tipo de deslizamiento rotacional es el que se presentan más comúnmente en taludes, aunque también se presentan los flujos simples, múltiples o sucesivos, pero estos no son tan comunes,



son más bien específicos, donde las condiciones de humedad rebasan las condiciones del suelo comunes.

La fragilidad es una de las mayores características de los suelos naturales en su rango de sobreconsolidación y de rocas débiles, además debido a la geometría del problema, generalmente el esfuerzo cortante no es uniforme en un talud y en particular a lo largo de la superficie de falla potencial.

Si el esfuerzo cortante se encuentra en el esfuerzo cortante pico o máximo como le llamaremos, del material, esta es una falla local. Si el suelo presenta algo de comportamiento de deformación-suavizada, los elementos de la falla del suelo podrán soportar un decrecimiento en el esfuerzo cortante y un incremento en la deformación, como veremos en el capítulo siguiente.

El corte de Selborne, es mostrado en la siguiente Figura 17, con las siguientes características geométricas, 9m de altura, corte de talud 2:1, en una arcilla sobreconsolidada, claramente se muestra en la figura como se instrumentó con inclinómetros en la zona de recarga, en la que la presión de poro se incremento, la falla ocurrió el 16 de Julio de 1968 (día 196 en la escala usada por Cooper et al., 1998), a lo largo de la superficie de falla (línea punteada), se muestra en la figura y en la observaciones correspondientes, hecha al centro y largo de la línea de deslizamiento, las primeras lecturas se hicieron después de colocar los inclinómetros y algunas de las indicaciones de la progresión de la falla son:

- a) Todos los inclinómetros muestran una deformación progresiva en la masa de suelo, con cizallamiento local en algún momento. Esto es bastante claro para el inclinómetro I.06, que muestra deformaciones continuas en el día 88, iniciación de la localización del desplazamiento en el día 175 y clara localización en el día 186.
- b) Después de la excavación, apareció un cizallamiento al pie de corte donde el factor de seguridad general fue mayor que 1.26, evidencia localizada en el inclinómetro I.08 en el día 171, a una profundidad aproximada de 2m.
- c) Entre los 88 y 96 días se muestra un debilitamiento continuo de profundidad de 2m entre I.06 y I.04, mostrando así la parte alta y baja de la superficie final de deslizamiento.
- d) La localización de lecturas fue discernible en todos los inclinómetros excepto en el I.05, con factor de seguridad de 1.04 a los 175 días.
- e) La última lectura muestra localización a lo largo de la superficie de falla y la falla ocurrió 10 días después, además de mostrar otra superficie de deslizamiento en desarrollo, aproximadamente 5m por debajo de la primera.



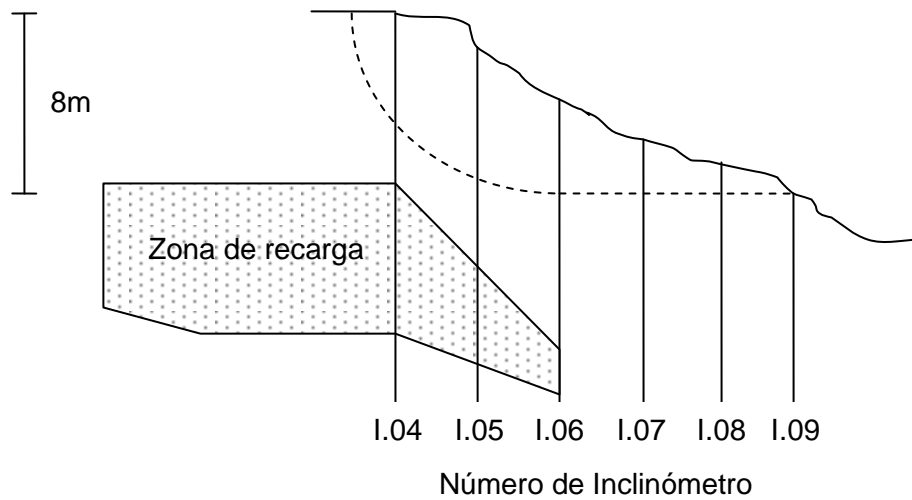


Figura 17: Corte Selborne, Smith G; 1998.

Para el conocimiento de este autor es la primera vez que se observa en una excavación, como se desarrolla una falla generalizada progresiva en la masa de suelo arcilloso. Haciendo un modelo numérico de la progresión de la falla es una única forma de entender la complejidad del proceso.

Para que todo el proceso de superficie de deslizamiento ocurra, primero se tiene que dar un debilitamiento de la zona del talud, para que la falla ocurra este debe de presentar una formación continua de fallas o superficies de deslizamiento a través de la masa de suelo.

- Zona debilitada, zona de corte y superficie de deslizamiento.

Como se dijo anteriormente, la falla o superficie de deslizamiento se desarrolla en una zona debilitada del talud. Observaciones muestran una estructura intermedia, rodeando la superficie de deslizamiento, llamada zona de corte, que puede verse claramente en la siguiente Figura 18.



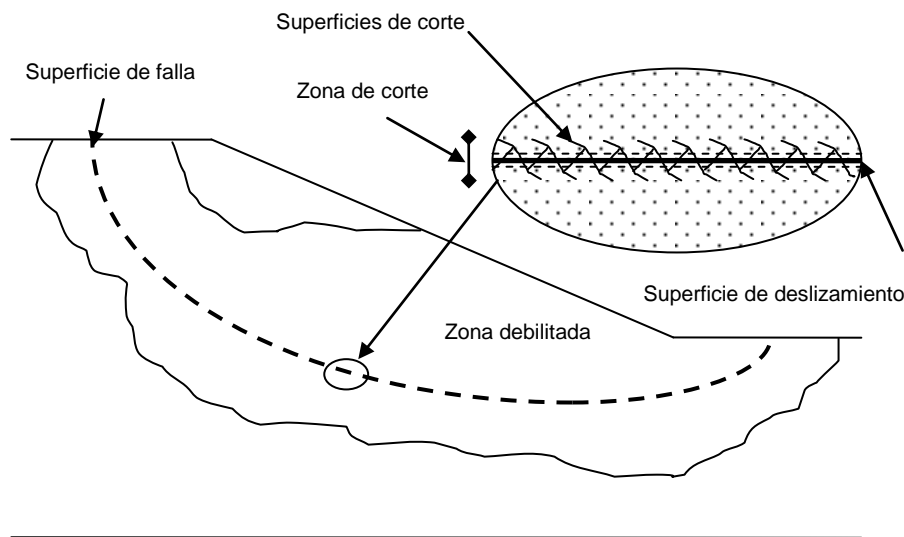


Figura 18: Zona debilitada, zona de corte y superficie de deslizamiento, Smith G; 1998.

Riedel (1929), describe este proceso en un espécimen de arcilla en una prueba de corte, el mecanismo de ruptura se caracteriza por la formación inicial de separaciones simples de superficies de corte, llamadas cortes Riedel (R), además de un grupo de discontinuidades, cortes por empuje, son formadas en casi simetría con respecto de los cortes R. finalmente el desplazamiento de discontinuidades están formadas en la dirección del corte impuesto, lo que lleva a un escenario final en donde estos enlaces forman un único desplazamiento discontinuo, principal.

- Grieta de tensión.

Existen dos técnicas para eliminar los efectos de tensión para el cálculo de estabilidad de taludes.

- Una grieta de tensión (tensión crack) puede servir para estabilizar los cálculos de un talud.
- Las envolventes de falla de Mohr pueden ser ajustadas tanto para que no haya esfuerzo de corte cuando el esfuerzo normal sea negativo.

La grieta de tensión es introducida dentro de los cálculos de estabilidad de talud para determinar la superficie de deslizamiento en el borde del corte a una profundidad adecuada por debajo de la superficie de suelo. La profundidad de la tensión puede ser estimada de la ecuación 11, usando parámetros de esfuerzo cortante, resulta la ecuación 12.

$$z_t = 2c / \gamma \tan(45 - \Phi/2)$$

Ecuación 11: Profundidad grieta de tensión.

$$d_{\text{crack}} = 2cd / \gamma z \tan(45 - \Phi_d/2)$$

Ecuación 12: Profundidad de la grieta en función del esfuerzo cortante.

Las variables  $c_d$  y  $\Phi_d$  dependen del factor de seguridad, valores que pueden ser estimados con suficiente precisión, para calcular la profundidad de la grieta antes de calcular el factor de seguridad. Cuando una grieta vertical es inducida, la grieta puede no extenderse significativamente más allá de la profundidad de tensión. El hecho de



introducir una grieta de tensión sirve para eliminar los problemas numéricos de estabilidad e inapropiados esfuerzos negativos.

El esfuerzo cero cuando hay tensión: en lugar de introducir una grieta de tensión, sobre el esfuerzo cortante puede ser ajustada de manera que el esfuerzo cortante, sea igual a cero cuando haya tensión. Esto puede ser acompañado usando una falla no lineal de Mohr. Pueden existir problemas numéricos en experimentos de prueba y error, esta fuerza de corte puede oscilar entre cero y algún valor finito en sucesivas iteraciones.

### 2.3. Esfuerzo residual.

En un estudio realizado por A. W. Skempton (1964), observó que los valores del esfuerzo al corte de superficies de deslizamiento establecidas desde hace mucho tiempo, tendían a ser considerablemente menores que los esfuerzos máximos correspondientes determinados en el laboratorio. Para obtener estos esfuerzos residuales, existen tres pruebas de laboratorio que nos permiten obtener estos esfuerzos, además, de los esfuerzos máximos y últimos de una muestra de arcilla.

- Pruebas de esfuerzo residual.
  - a) Prueba en la máquina de corte directo o triaxiales sobre superficies de deslizamiento natural: se obtienen muestras de campo que se encuentren precisamente en las superficies de deslizamiento, para ser probadas en la máquina de corte directo o en una cámara triaxial, básicamente los problemas que se presentan son el muestreo de campo y la ubicación del plano de falla en la colocación de la muestra en la máquina de corte o en la cámara triaxial.
  - b) Pruebas reversibles en la máquina de corte directo: se emplea la máquina de corte directo como comúnmente se utiliza pero invirtiendo la dirección de deslizamiento relativo, un número ilimitado de veces. El desplazamiento potencial acumulativo se aumenta y la velocidad de corte debe ser lo suficientemente lenta para disipar la presión de poro y se necesita hacer unas diez inversiones, para obtener un estado de esfuerzo residual realista.
  - c) Anillo de corte directo: Hvorslev sugirió determinar el corte directo en una cámara en forma de anillo, preparando una muestra remoldeada de suelo en forma de un anillo de sección cuadrada. Se hace girar la mitad superior del anillo, mientras se mide el esfuerzo normal  $\sigma_n$ , y el esfuerzo cortante  $\tau$ , cuando se forma una superficie de falla inicial, al girar rápidamente y luego se disminuye gradualmente la velocidad y se mantiene la rotación hasta que desarrolle el estado de esfuerzo residual, además, se puede variar el esfuerzo normal para obtener varios puntos de la envolvente  $\tau_r / \sigma_n$ .

Deben de haber existido casos de deslizamientos en taludes de arcilla que han aportado un mecanismo de revisión de este procedimiento. Obviamente cuando un talud se desliza su factor de seguridad fue de 1.0 y conociendo el material involucrado en el plano de deslizamiento, es posible deducir el valor promedio del esfuerzo cortante en este plano de deslizamiento.

En la típica relación de esfuerzo-deformación de una prueba de corte directo, en arcilla con drenado, la prueba normal nos dice que se detiene la prueba cuando se ha desarrollado el esfuerzo pico máximo y si se continua la prueba sin ser detenida, lo que se obtiene es un incremento en la deformación ( $\epsilon_h$ ) y un decremento en el esfuerzo cortante a lo que este nivel de decremento se le llama esfuerzo o resistencia residual de la arcilla.



El valor R de esfuerzo residual, desarrollado por Skempton, nos da un valor promedio del valor de esfuerzo residual en la superficie de deslizamiento del suelo, teniendo así la ecuación:

$$R = \frac{sf - si}{sf - sr}$$

Ecuación 13: Valor del esfuerzo residual según Skempton.

Donde:

sf = esfuerzo cortante máximo

sr = esfuerzo cortante residual

si = promedio del esfuerzo cortante, obtenida de un rendimiento en el promedio de esfuerzo cortante.

$$si = R*sr + (1 - R)*sf$$

R ≈ 0 para arcillas sin fisuras

R ≈ 1.0 para arcillas con deslizamiento preexistente

R entre 0 y 1.0 para arcillas fisuradas.

De aquí que podemos decir que el valor del esfuerzo residual nos indica que es el valor correspondiente a la capacidad de esfuerzo o resistencia de una arcilla al corte y nos permitirá evaluar está más adelante cuando analicemos los datos.



### 3. Metodología de ensayos en el laboratorio.

Para empezar la investigación, primero se identificó el suelo arcilloso con el que se tendrá la materia prima a trabajar, está proviene de la ciudad de Morelia, Michoacán, en la parte Noreste de la capital, en el acceso a la zona residencial “Fresnos” de Tres Marías, aproximadamente a 5.7km del Libramiento Sector Revolución entronque Av. Madero Oriente, como se puede ver en la Figura 19. Una vez identificado el material se procedió a extraer el suelo arcilloso, para obtener suficiente y poder realizar las pruebas en laboratorio.

- Macro y micro localización.

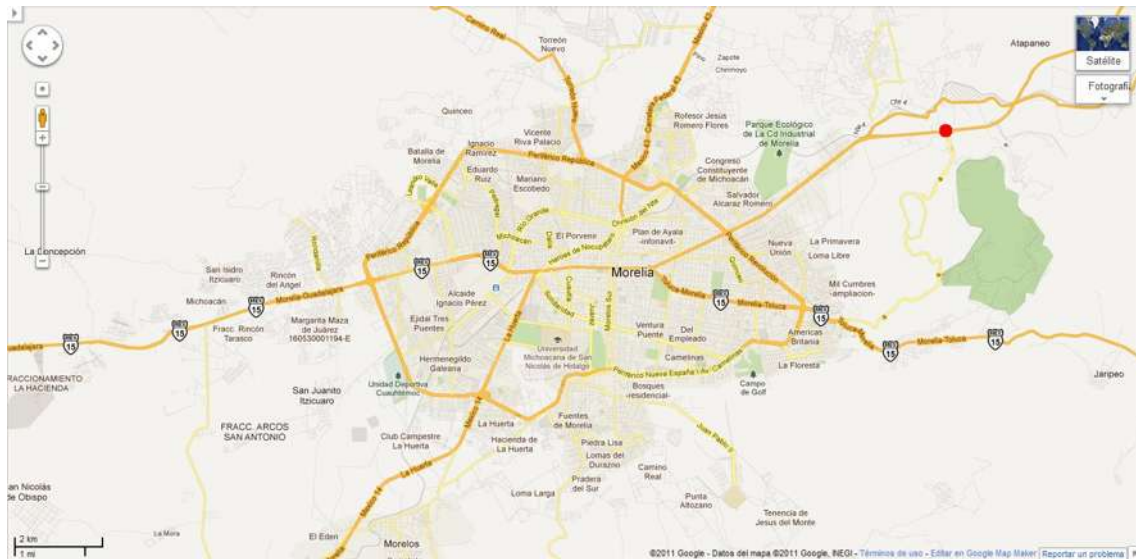


Figura 19: Macro localización Google Maps 2011.



Figura 20: Micro localización Google Maps 2011.



- Material visto en campo.



Figura 21: Material arcilloso de estudio visto en campo, dirección de oeste a este.



Figura 22: Material arcilloso de estudio visto en campo, dirección este a oeste.

### 3.1. Ensayos.

#### 3.1.1. Teoría de la clasificación de suelos.

##### 3.1.1.1. Granulometría en suelos.

En los comienzos de la investigación de las propiedades de los suelos se creyó que las propiedades mecánicas dependían directamente de la distribución de las partículas constituyentes según sus tamaños; por ello era preocupación especial de los ingenieros la búsqueda de métodos adecuados para obtener tal distribución. Aun hoy, tal parece que todo técnico interesado en suelos debe pasar a modo de etapa de iniciación, por una época en que se siente obligado a creer que, con suficiente



experiencia, es posible deducir las propiedades mecánicas de los suelos a partir de su distribución granulométrica o descripción por tamaños; es común, sin embargo, que una no muy dilatada experiencia haga que tal sueño se desvanezca.

Solamente en suelos gruesos cuya granulometría puede determinarse por mallas, la distribución por tamaños puede revelar algo de lo referente a las propiedades físicas del material, en efecto, la experiencia indica que los suelos gruesos bien graduados, o sea con amplia gama de tamaños, tiene comportamiento ingenieril más favorable, en los suelos de granulometría muy uniforme.

Más aun en esos suelos gruesos, ha de señalarse según ya se dijo, que el comportamiento mecánico e hidráulico esta principalmente definido por la compacidad de los granos y su orientación, características que destruye, por la misma menara de realizarse, la prueba de granulometría de modo que en sus resultados finales se ha tenido que perder toda huella de aquellas propiedades tan decisivas. De esto se desprende lo muy deseable que sería poder hacer una investigación granulométrica con un método tal que representara la estructura inalterada del material; este método, sin embargo, hasta hoy no se ha encontrado y todo parece indicar que no se podrá desarrollar jamás.

En suelos finos dependen en tal grado de su estructura e historia geológica, que el conocimiento de su granulometría, resulta totalmente inútil. Sin embargo, el ingeniero interesado en suelos debe estar suficientemente familiarizado con los criterios técnicos basados en la distribución granulométrica y con los métodos más importantes para su determinación, pues estos temas ocupan aun un espacio apreciable dentro de la literatura técnica y se hace necesario al ingeniero moderno estar más informado sobre esta materia que aquellos que, sin la conveniente meditación de sus ideas, aplican normas simplistas, conducentes a conclusiones inaceptables.

Los limites de tamaño de las partículas que constituyen un suelo, ofrecen un criterio obvio para una clasificación descriptiva del mismo. Tal criterio fue usado en mecánica de suelos desde un principio e incluso antes de la etapa moderna de esta ciencia. Originalmente, el suelo se dividía únicamente en tres o cuatro fracciones debido a lo engorroso de los procedimientos disponibles de separación por tamaños. Posteriormente, con el advenimiento de la técnica del cribado, fue posible efectuar el trazo de curvas granulométricas, contando con agrupaciones de las partículas del suelo en mayor número de tamaños diferentes. Actualmente se pueden ampliar notablemente las curvas en los tamaños finos, gracias a la aplicación de técnicas de análisis de suspensiones.

Algunas clasificaciones granulométricas de los suelos según sus tamaños, son las siguientes:

a) Clasificación Internacional (basada en otra desarrollada en Suecia)

Tamaño en mm.				
Arena gruesa	Arena fina	Limo	Arcilla	Ultra-arcilla
2.0	0.2	0.02	0.002	0.0002

Tabla 1: Clasificación internacional de suelos.



b) Clasificación M.I.T. (Instituto Tecnológico de Massachusetts).

Tamaño en mm.

Arena			Limo			Arcilla		
Gruesa	Media	Fina	Grueso	Medio	Fino	Gruesa	Media	fina
2.0	0.6	0.2	0.06	0.02	0.006	0.002	0.0006	0.0002

Tabla 2: Clasificación del instituto tecnológico de Massachusetts. propuesta por G. Gilboy.

c) La siguiente clasificación, utilizada a partir de 1936 en Alemania, está basada en una proposición original de Kopecky.

MATERIAL	CARACTERÍSTICAS	TAMAÑO (mm.)
Piedra	-	Mayor de 70
Grava	Gruesa	30 a 70
	Media	5 a 30
	fina	2 a 5
Arena	Gruesa	1 a 2
	Media	0.2 a 1
	Fina	0.1 a 0.2
Polvo	Grueso	0.05 a 0.1
	Fino	0.02 a 0.05
Limo	Grueso	0.006 a 0.02
	Fino	0.002 a 0.006
Arcilla	Gruesa	0.0006 a 0.002
	Fina	0.0002 a 0.0006
Ultra-arcilla	-	0.00002 a 0.0002

Tabla 3: Clasificación de los suelos propuesta por Kopecky.

Nosotros trabajamos con arcilla, como lo veremos en el capítulo siguiente: “metodología en laboratorio” en el subcapítulo de “ensayos”, la obtención de los estados de consistencia, para su identificación y clasificación. Por lo tanto estamos hablando de un material que en sus clasificaciones: Internacional, M.I.T. y Kopecky es 0.002mm; como no nos interesa el tamaño de partícula, solo diremos que al ser arcilla la catalogamos con tamaño de partícula general de 0.002mm. (Juárez Badillo).

### 3.1.1.2. Clasificación SUCS.

Proviene del sistema de clasificación de aeropuertos propuesto originalmente en 1942 y que divide a los suelos en dos grandes fracciones: la gruesa, formada por partículas mayores que la malla de No. 200 (0.074mm), y menores que la malla de 3” (7.62cm), y la fina, formada por las partículas que pasan la malla No. 200.

La fracción gruesa se subdivide a su vez en gravas y arenas, teniendo como frontera la malla No. 4 (4.76mm). ya se indico que la mayoría de los suelos formados por partículas finas (que no sean de origen volcánico), por lo general valores de límite líquido menores que 100, ayudan a subdividir material en dos grupos, los de baja y mediana compresibilidad con límites líquidos menores de 50% y los de alta compresibilidad con límites líquidos mayores de 50%.

Por su parte A. Casagrande, ayudó a crear la carta de plasticidad con la elaboración de su gráfica de límite líquido e índice plástico.



Así tenemos finalmente que para suelos finos (únicamente lo que nos compete para este estudio), el criterio utilizado para subdividir a los suelos finos e identificarlos como: limos inorgánicos con símbolo M, arcillas inorgánicas C y limos y arcillas orgánicas O, estos suelos se subdividirán su vez, dependiendo de su límite líquido, L para baja compresibilidad y H para alta compresibilidad, en función de sus límites líquidos e índice plástico, cuando nos referimos al termino compresibilidad solo para el tramo virgen de la curva de compresibilidad. Para suelos altamente orgánicos, fibrosos como turbas y suelos pantanosos, se le asigna el símbolo Pt.

Nuestro material se encuentra en un grupo formado por CL y CH, pero el grupo de CL comprende la zona sobre la línea "A" de la carta de plasticidad, definida por  $LL < 50\%$  e  $I_p > 7\%$  y el grupo de CH (nuestro material), corresponde arriba de la línea "A" de la carta de plasticidad definida por  $LL > 50\%$ .

- Dilatancia.

En esta prueba, una pastilla con el contenido de agua necesario para que el suelo adquiriera una consistencia suave, pero no pegajosa, se agita alternativamente en la palma de la mano, golpeándola de manera llana y seca contra la otra mano, un suelo fino no plástico, adquiere con el tratamiento anterior, una apariencia de hígado, mostrando agua libre en la superficie y cuando la muestra se parienta con la mano esta pierde el agua superficial y se endurece y empieza a desmoronarse. Si el contenido de agua de la pastilla es el adecuado, un nuevo agitado hará que los fragmentos desmoronados vuelvan a constituirse.

La velocidad con la que la pastilla cambia su consistencia y con la que el agua aparece y desaparece define la intensidad de la reacción e indica el carácter de los finos del suelo.

- Tenacidad.

Esta prueba se realiza sobre el espécimen de suelo formando rollitos de unos 3mm de diámetro aproximadamente, se amasa y se vuelve a rolar varias veces, observando cómo aumenta la rigidez en medida que se acerca al límite plástico, para el grupo de CL y CH en el que nuestro material se encuentra los rollitos son de media tenacidad cerca de su límite plástico. Para entrar en más detalles acerca de la clasificación SUCS, se puede consultar la bibliografía, para mayor referencia o el caso de consultar la clasificación completa.

### 3.1.1.3. Plasticidad.

La plasticidad es una propiedad física de los objetos materiales inorgánicos y orgánicos, que básicamente comprende un rango de deformación permanente, que existe después de el rango elástico, una vez rebasado este rango (pequeño o grande), se entra al rango plástico el cual nos dice la teoría que cuando un material entra en el rango plástico este se deforma y no vuelve a recuperar esa deformación que sufrió por la aplicación de una fuerza externa y esta teoría nos ayudara a comprender el fenómeno que estudiamos, cuando un material arcilloso es sometido a corte directo con una grieta inducida en su masa.

Existen suelos que al ser remoldeados, cambiando su contenido de agua si es necesario, adoptan una consistencia característica, que desde épocas antiguas se ha denominado *plástica*. Estos suelos han sido llamados arcillas, originalmente por los hombres dedicados a la cerámica; la palabra pasó a la mecánica de suelos, en épocas más recientes con idéntico significado. La plasticidad es en este sentido, una



propiedad tan evidente que ha servido antaño para clasificar suelos en forma puramente descriptiva. Pronto se reconoció que existía una relación específica entre la plasticidad y las propiedades fisicoquímicas determinantes del comportamiento mecánico de las arcillas. En ese momento la plasticidad se convirtió en una propiedad ingenieril de interés científico estricto, dejando de ser una cualidad puramente descriptiva o de trabajabilidad en cerámica; las investigaciones posteriores han probado que la plasticidad de un suelo es debida a su contenido de partículas más finas de forma laminar.

Los experimentos realizados por Atterberg, Terzaghi y Goldschmidt han revelado que la plasticidad de los suelos se debe a la carga eléctrica de las partículas que generan campos que actúan como condensadores e influyen en las moléculas bipolares del agua, en los suelos plásticos, el espesor de estas capas de agua sólida y viscosa influida es grande y su efecto en la interacción de las partículas de suelo determinan su plasticidad. Si esta hipótesis, desarrollada sobre todo por Goldschmidt fuera correcta, otros líquidos bipolares mezclados con polvo de arcilla deberían de producir suelos plásticos, mientras que los líquidos monopolares generarían suelos exentos de tal propiedad; Goldschmidt demostró que tales hechos se revelaban claramente en el laboratorio. También se vio que las partículas equidimensionales, de pequeña relación área a volumen y por lo tanto la escasa actividad eléctrica superficial nunca constituyen suelos plásticos, independientemente de su tamaño y otros factores (experimentos de Atterberg).

Para medir la plasticidad de las arcillas se han desarrollado varios criterios de los cuales uno solo el debido a Atterberg se mencionara en lo que sigue. Atterberg hizo ver que en primer lugar la plasticidad no era una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Una arcilla muy seca puede tener contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido o inclusive las de una suspensión líquida. Entre ambos extremos, existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente. En segundo lugar, Atterberg hizo ver que la plasticidad de un suelo exige, para ser expresada en forma conveniente, la utilización de dos parámetros en lugar de uno solo como hasta su época se había creído, además, señaló esos parámetros y un modo tentativo hoy perfeccionado de evaluarlos.

Según su contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia, definidos por Atterberg.

- a) Estado líquido con las propiedades y apariencia de una suspensión.
- b) Estado semilíquido con las propiedades de un fluido viscoso.
- c) Estado plástico en que el suelo se comporta plásticamente.
- d) Estado semisólido en el que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aun disminuye de volumen al estar sujeto a secado.
- e) Estado sólido en que el volumen del suelo no varía con el secado.

Los estados anteriores son fases generales por las que pasa el suelo al irse secado y no existen criterios estrictos para distinguir sus fronteras. El establecimiento de estas ha de hacerse en forma puramente convencional. Atterberg estableció las primeras convencionales para ello, bajo el nombre general de *límites de consistencia*.

La frontera convencional entre los estados semilíquido y plástico fue llamada por Atterberg *límite líquido*, nombre que hoy se conserva y la frontera entre los estados plástico y semisólido fue llamada por Atterberg límite plástico y definida también en términos de una manipulación de laboratorio.



- Determinación actual del límite líquido

Cuando la plasticidad se convirtió en una propiedad índice fundamental, a partir de la utilización que Terzaghi y Casagrande hicieron de ella, la determinación de los límites de plasticidad se transformo en prueba de rutina en todos los laboratorios. A partir de aquí se creó la técnica basada en el uso de la copa de Casagrande, que es un recipiente de bronce o latón con un tacón solidario del mismo material; el tacón y la copa giran en torno a un eje unido a la base. Una excentricidad en el mecanismo hace que la copa caiga periódicamente, golpeándose contra la base del dispositivo, que es de hule duro o madera. La altura de caída de la copa es por especificación de 1cm, medido verticalmente desde el punto de la copa que toca la base al caer, hasta la base misma, estando la máquina bien calibrada previo a su uso. La copa es esférica, con radio interior de 54cm, espesor de 2mm y peso de  $200 \pm 20\text{gr}$  incluyendo el tacón.



Figura 23: Copa de Casagrande, [labequim.com.mx/html/APARATOSHUMBOLDT.htm](http://labequim.com.mx/html/APARATOSHUMBOLDT.htm), 2011.

Sobre la copa se coloca el suelo y se procede a hacerse una ranura trapecial con las dimensiones mostradas en la Figura 24.



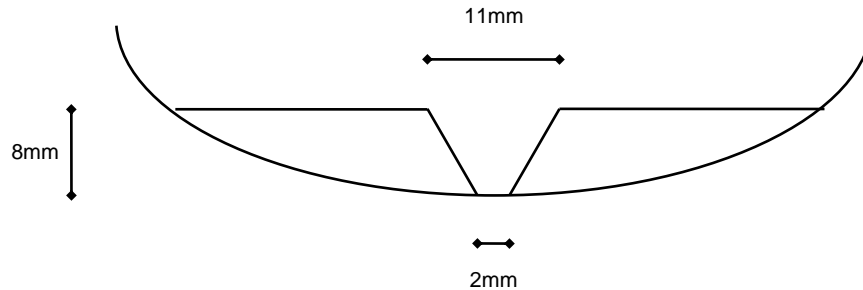


Figura 24: Dimensiones de la ranura en la copa de Casagrande, Badillo J; 2009.

Para hacer la ranura debe usarse el ranurador laminar que aparece en la Figura 23, la copa se sostiene con la mano izquierda, con el tacón hacia arriba y el ranurador se pasa a través de la muestra, manteniéndolo normal a su superficie a lo largo del meridiano que pasa por el centro del tacón con un movimiento de arriba hacia abajo.

En poco tiempo se adquiere la soltura necesaria para hacer una ranura apropiada, con una sola pasada suave del ranurador, en una arcilla bien mezclada sin partículas gruesas. En los suelos con arena o con materia orgánica no se puede formar la ranura con el ranurador, debiendo usarse la espátula utilizando el ranurador solo para verificar las dimensiones.

En ocasiones se ha usado otro tipo de ranurador, curvo con sección trapezoidal que no rebana el suelo al ser introducido en él, sino que forma la ranura desplazándolo lo cual hace que se rompa la adherencia entre el suelo y la copa, especialmente en suelos arenosos; en tal caso los golpes hacen que el suelo deslice, cerrándose más pronto la ranura por la falta de aquella adherencia, por tal causa este ranurador no es aconsejable. La prueba se ejecuta según se indica en los pasos siguientes, en un cuarto húmedo y ambiente controlado, esto para que el número de golpes muestre un incremento demasiado rápido.

A partir de extensas investigaciones sobre los resultados en la copa de Casagrande, se define como contenido de agua aquel en el que la ranura cierra a lo largo de 1.27cm, con 25 golpes. De hecho el límite líquido se determina conociendo 3 o 4 contenidos de agua diferentes en su vecindad, con los correspondientes números de golpes y trazando la curva contenido de agua contra número de golpes.

La ordenada de esa curva correspondiente a la abscisa de 25 golpes es el contenido de agua correspondiente al límite líquido. Se encontró experimentalmente que usando papel semilogarítmico (con los contenidos de agua en escala aritmética y el número de golpes en escala logarítmica), la curva anterior, llamada de fluidez es una recta cercana del límite líquido, en la Figura 25, aparece la curva y el modo de determinar el límite líquido.



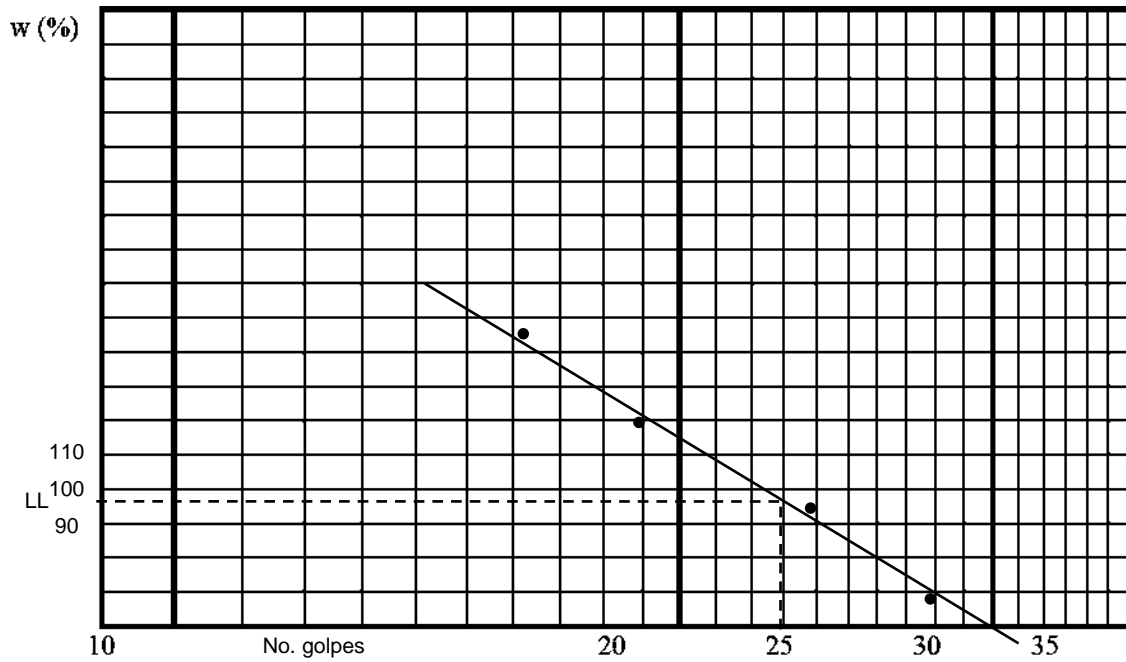


Figura 25: Determinación de límite líquido en la curva de flujo, Badillo J; 2009.

La ecuación de la curva de flujo es:

$$w = -F_w \text{Log } N + C$$

Ecuación 14: Definición de la curva de flujo.

w = contenido de agua, como porcentaje del peso seco

F<sub>w</sub> = índice de fluidez, pendiente de la curva de fluidez, igual a la variación del contenido de agua correspondiente a un ciclo de la escala logarítmica.

N = número de golpes, si N es menor de 10, aproxímese a medio golpe; por ejemplo, si en el 6º golpe se cerró la ranura 0.63cm y en el 7º se cerró 1.9cm, repórtese 6.5 golpes.

C = constante que representa la ordenada en la abscisa de 1 golpe; se calcula prolongando el trazo de la curva de fluidez.

Para construir la curva de fluidez sin salirse del intervalo en que puede considerarse recta, A. Casagrande recomienda registrar valores entre los 6 y los 35 golpes, determinando 6 puntos, tres entre 6 y 15 golpes y tres entre 23 y 32. Para consistencias correspondientes a menos de 6 golpes se hace ya muy difícil discernir el momento del cierre de la ranura y si esta causa excesiva evaporación. En pruebas de rutina basta con determinar 4 puntos de la curva de fluidez.

La fuerza que se opone a la fluencia de los lados de la ranura proviene de la ranura proviene de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo, por lo que el número de golpes requerido para cerrar la ranura es una medida de esa resistencia, al correspondiente contenido de agua. De lo anterior puede deducirse que la resistencia de todos los suelos en el límite líquido debe ser la misma. Siempre y cuando el impacto sirva solamente para deformar al suelo, como es el caso de los suelos plásticos; pero en el caso de los suelos no plásticos (arenosos), de mayor permeabilidad que las arcillas, las fuerzas de impacto producen un flujo del agua hacia la ranura, con la consecuencia de que el suelo se reblandece en las proximidades de aquella, disminuyendo su resistencia al esfuerzo cortante; por ello en los suelos, el límite líquido ya no representa un contenido de agua para el cual el suelo presente una



resistencia al corte de  $25\text{g/cm}^2$ . La hipótesis de que el número de golpes es una medida de la resistencia al corte del suelo, fue enunciada por A Casagrande y se confirma por el hecho de que una gráfica semilogarítmica de la resistencia contra el contenido de agua es recta y no solo en la vecindad del límite líquido, sino en consistencias bastantes distintas.

- Determinación actual del límite plástico.

La prueba para la determinación del límite plástico, tal como Atterberg la definió, no especifica el diámetro a que debe de llegarse al formar el cilindro de suelo requerido. Terzaghi agregó la condición de que el diámetro sea de 3mm. La formación de los rollitos se hace usualmente sobre una hoja de papel totalmente seca, para acelerar la pérdida de humedad del material; también es frecuente efectuar el rolado sobre una placa de vidrio. Cuando los rollitos llegan a los 3mm, se doblan y presionan, formando una pastilla que vuelve a rolarse, hasta que en los 3mm justo ocurra el desmoronamiento y agrietamiento; en tal momento se determinara rápidamente su contenido de agua, que es el límite plástico.

Se han hecho varios intentos para sustituir el rolado manual por la acción mecánica de algún aparato, pero sin resultados satisfactorios, debido en primer lugar a que la experiencia ha demostrado que en esta prueba la influencia del operador no es importante y en segundo, que hasta la fecha no ha podido desarrollarse ningún aparato en que la presión ejercida se ajuste a la tenacidad de los diferentes suelos; en el rolado manual el operador guiado por el tacto hace el ajuste automáticamente.

- Consideraciones de los milites de plasticidad (índice de tenacidad).

Atterberg demostró que la plasticidad de una arcilla puede describirse en términos de los parámetros: *límite líquido* y el *índice plástico*, éste numéricamente igual a la diferencia del milite líquido y el plástico.

El límite líquido, según se dijo, indica el contenido de agua para el cual el suelo tiene una cierta consistencia, con una resistencia al corte de  $25\text{g/cm}^2$ . Por el contrario, la resistencia de diferentes suelos arcillosos en el límite plástico no es constante, sino que puede variar ampliamente. En las arcillas muy plásticas, la tenacidad en el límite plástico es alta, debiéndose aplicar con las manos considerable presión para deformar los rollitos, por el contrario, las arcillas de baja plasticidad son poco tenaces en el límite plástico.

Algunos suelos finos y arenosos pueden en apariencia, ser similares a las arcillas, pero al tratar de determinar su límite plástico se nota la imposibilidad de formar los rollitos, revelándose así la falta de plasticidad del material, en estos suelos el límite líquido resulta prácticamente igual al plástico y aun menor, resultando entonces un índice plástico negativo, las determinaciones de plasticidad no conducen a ningún resultado de interés y los límites líquido y plástico carecen de sentido físico.

Cuando dos suelos plásticos tiene los mismos límites de plasticidad o el mismo índice plástico, pero diferentes curvas de flujo, el suelo cuya curva sea más tendida, es decir el de menor índice de fluidez, tendrá mayor resistencia en el límite plástico, la resistencia al esfuerzo cortante de una arcilla en el límite plástico es una medida de su tenacidad por lo cual puede decirse que la tenacidad de las arcillas de igual índice plástico crece a menor índice de fluidez. En efecto sean:

LL = límite líquido.

LP = límite plástico.



IP = índice plástico.

$F_w$  = índice de fluidez.

$s_1 = 25\text{g/cm}^2$ , resistencia al esfuerzo cortante de los suelos plásticos en el límite líquido.

$s_2$  = resistencia al esfuerzo cortante correspondiente al límite plástico, cuyo valor puede usarse para medir la tenacidad de una arcilla.

Según  $IP = LL - LP$ , poniendo en lugar de N su equivalente  $C_s$ , donde C representa la relación entre el número de golpes y la correspondiente resistencia, pueden escribirse:

$$LL = -F_w \text{Log } C_{s1} + C'$$

Ecuación 15: Definición de límite líquido.

$$LP = -F_w \text{Log } C_{s2} + C'$$

Ecuación 16: Definición de límite plástico.

Restando la primera ecuación a la segunda, se obtiene:

$$IP = LL - LP = F_w (\text{Log } C_{s2} - \text{Log } C_{s1})$$

Ecuación 17: Definición del índice plástico, respecto al número de golpes.

$$IP = F_w \text{Log } (s_2/s_1)$$

Ecuación 18: Definición del índice plástico.

De donde:

$$T_w = (IP/F_w) = \text{Log } (s_2/s_1)$$

Ecuación 19: Definición del índice de tenacidad.

Para tener una medida relativa de la tenacidad basta definir a  $T_w$  como índice de tenacidad evitando resolver en cada caso la ecuación de curva de flujo, para calcular  $s_2$ .

El índice de tenacidad conjuntamente con el de fluidez, es útil para establecer una diferenciación adicional en lo que se refiere a las características de plasticidad de las arcillas. El índice de tenacidad generalmente varía entre 1 y 3 y rara vez alcanza valores de 5 o menores que 1, un alto valor de  $T_w$ , no implica que los límites de plasticidad sean altos.

- Determinación del límite de contracción.

Como se mencionó anteriormente, el método original de Atterberg para la determinación de límite de contracción de un suelo consistía en la realización de mediciones frecuentes de la longitud y peso de un mismo prisma, hasta que ya no se observara ninguna disminución de la longitud.

Teniendo en cuenta que la gran mayoría de los suelos no representan, prácticamente, disminución de volumen durante el proceso de secado abajo del límite de contracción, Terzaghi sugirió un método más simple de determinación, que esencialmente, consiste en medir el peso y el volumen de una muestra de suelo totalmente seca, en tal momento, puede decirse que el límite de contracción sería la humedad de la muestra seca si tuviese sus vacíos llenos de agua. De esta idea y teniendo en cuenta la Figura 26, puede deducirse.



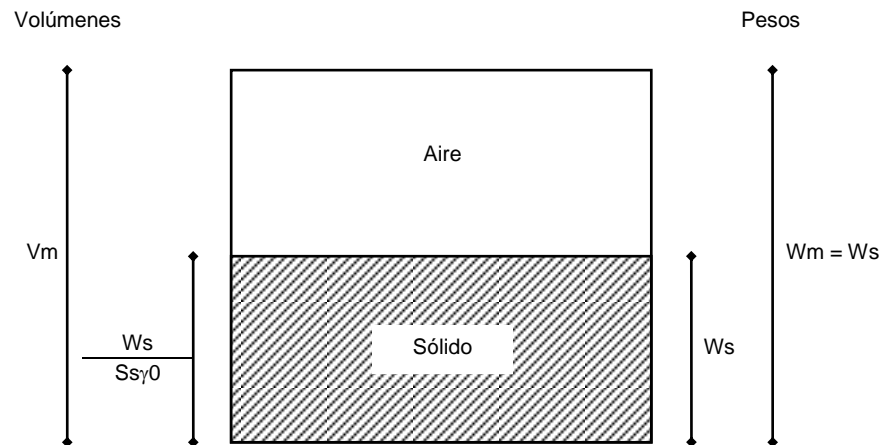


Figura 26: Obtención del límite de contracción, según Terzaghi, Badillo J; 2009.

$$LC (\%) = \left( \frac{(Vm - (Ws / Ss\gamma_0)) \gamma_0}{Ws} \right) * 100 = \left( \frac{Vm\gamma_0}{Ws} - \frac{1}{Ss} \right) * 100$$

Ecuación 20: Límite de contracción por definición.

$$LC (\%) = 100 \left( \frac{1}{Sd} - \frac{1}{Ss} \right)$$

Ecuación 21: límite de contracción, ecuación desarrollada.

Nótese que  $W_m = W_s$ , dado que la muestra está totalmente seca. La aplicación de la fórmula  $LC (\%) = 100 \left( \frac{1}{S_d} - \frac{1}{S_s} \right)$ , requiere la determinación del volumen de la muestra seca del suelo, Terzaghi desarrolló un método para ello, que desde entonces ha permanecido como clásico en todos los laboratorios.

Un recipiente de vidrio o lucita, se llena de mercurio hasta derramarse y se enrasa cuidadosamente, cubriéndolo con una placa del mismo material, provista de tres patas. A continuación, se coloca el recipiente en otro mayor, la muestra seca se deposita sobre la superficie del mercurio y se sumerge presionándola con las patas de la placa, hasta que dicha placa vuelve a quedar bien ajustada sobre el primer recipiente, las patas evitan que la muestra se ladee, manteniéndola sumergida. La cantidad de mercurio desplazada del primer recipiente, se recoge del segundo recipiente y se pesa, calculando así su volumen, si se conoce el peso específico del mercurio que para fines prácticos puede tomarse como  $13.56 \text{ gr/cm}_3$ .

En la determinación del peso límite de contracción según Terzaghi, es preciso determinar el peso específico relativo de los sólidos de la muestra por medio de una prueba independiente.

### 3.1.1.4. Peso específico relativo de los sólidos.

Primeramente se dispone a la limpieza de los matraces, en este caso serán 3, con una solución crómica, disolviendo en caliente 60gr de dicromato de potasio en 300gr de agua destilada, déjese enfriar y añada 460gr de ácido sulfúrico comercial, para enjuagar cada matraz, una vez agitada la solución dentro del matraz, se retira la



solución y se procede a limpiar los residuos de la solución, con agua destilada y posteriormente con alcohol.

Pasamos a calibrar cada matraz, poniendo agua en un recipiente con hielo para que enfrié y tenga una temperatura estable, colocamos cada matraz con agua destilada cerca de la marca de aforo y dejando reposar un par de minutos, cuando se tome la primera lectura, se enrasa a la marca de aforo con ayuda de una pipeta, se tomará la temperatura de reposo y el peso de reposo (secando los residuos de agua fuera del matraz), en un baño de agua caliente colóquese el matraz aforado y déjese unos cuantos segundos, cuando se retira del baño de agua caliente es que el agua destilada en su interior rebasa la marca del menisco y se procede a tomar la temperatura, limpiar el agua del exterior y se pesa, este procedimiento se repite hasta tener 6 lecturas de temperatura  $t$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) y 6 lecturas de peso  $W_{fw}$  (gr), con estas mediciones podemos construir nuestra curva de calibración donde  $W_{fw}$  corresponde al eje de las ordenadas y la  $t$  corresponde al eje de las abscisas, trazando una línea recta o polinómica de orden 2, para representar a los puntos de la gráfica y así completar nuestra curva de calibración.

Posteriormente se pesa entre 60 y 80gr de arcilla cribada por la malla no. 40, se coloca este material junto con agua destilada y se homogeniza el compuesto con una batidora y después se vierte en el matraz hasta el punto de aforo, se lleva al baño de agua para que se uniformice la suspensión y después se extrae el aire con una bomba de vacíos, dejando finalmente el agua y la arcilla, se seca el exterior del matraz y la boca, respetando la marca de aforo, se vacía en un recipiente que soporte el horno (previamente pesado) y se toma la temperatura, limpiando el matraz con agua destilada que este a mas misma temperatura que el compuesto del matraz y es vaciando todo ese sobrante en el mismo recipiente final, se pesa  $W_{fsw}$  y se coloca en el horno aproximadamente 12hr o mas y se pesa para obtener el  $W_s$ . Se entra con la temperatura tomada cuando se vació el compuesto del matraz al recipiente que soporta el horno, en la hoja de calibración de cada matraz, se obtiene  $W_{fw}$  calibrado y se hacen los cálculos correspondientes.

$$S_s = W_s / W_s + (W_{fw} - W_{fsw})$$

Ecuación 22: Definición del peso específico relativo de los sólidos.

### 3.1.2. Teoría de la compactación de suelos.

Se entiende por compactación de los suelos el mejoramiento artificial de sus propiedades mecánicas por medios mecánicos. Se distingue de la consolidación de los suelos en que el peso específico del material crece gradualmente bajo la acción natural de sobrecargas impuestas que provocan expulsión de agua por un proceso de difusión, ambos procesos involucran disminución de volumen, por lo que en el fondo son equivalentes.

La importancia de la compactación de los suelos estriba en el aumento de resistencia y disminución de capacidad de deformación que se obtienen al sujetar al suelo a técnicas convenientes que aumenten su peso específico seco, disminuyendo sus vacíos. Por lo general, las técnicas de compactación se aplican a rellenos artificiales, tales como cortinas de presas de tierra, diques, terraplenes para caminos y ferrocarriles, bordos de defensa, muelles, pavimentos, etc. Algunas veces se hace necesario compactar al terreno natural, como en el caso de cimentaciones sobre arenas sueltas.

Los métodos usados para la compactación de los suelos dependen del tipo de los materiales con los que se trabaje en cada caso, con base a un experimento



sencillo que los materiales puramente friccionantes como la arena se compactan eficientemente por métodos vibratorios en tanto que en los suelos plásticos el procedimiento de carga estática resulta el más ventajoso. En la práctica estas características se reflejan en los equipos disponibles para el trabajo, tales como plataformas vibratorias, rodillos lisos, neumáticos o “pata de cabra”. En las últimas épocas los equipos de campo han tenido gran desarrollo y hoy existen en gran variedad de sistemas o pesos, de manera que el ingeniero tiene posibilidad de elegir entre muchos, los implementos adecuados a cada caso particular.

La eficiencia de cualquier equipo de compactación depende de varios factores y para poder analizar la influencia particular de cada uno, se requiere de disponer de procedimientos estandarizados que reproduzcan en el laboratorio la compactación que se pueda lograr en el campo con el equipo disponible. De entre todos los factores que influyen en la compactación obtenida en un caso dado, podría decirse que dos son los más importantes: el contenido de agua del suelo, antes de iniciarse el proceso de compactación y la energía específica empleada en dicho proceso. Por energía específica se entiende la energía de compactación suministrada al suelo por unidad de volumen.

El establecimiento de una prueba simple de compactación en el laboratorio cubre, principalmente dos finalidades. Por un lado disponer de muestras de suelo compactadas teóricamente con las condiciones de trabajo de campo, con vistas a tener la seguridad de que el equipo usado está trabajando efectivamente en las condiciones previstas en el proyecto.

### 3.1.2.1. Compactación tipo Proctor.

Para determinar la energía específica de compactación en una prueba de laboratorio, se puede hacer uso de la siguiente ecuación:

$$E_e = (N n W h) / V$$

Ecuación 23: Definición de la energía específica.

En donde:

- $E_e$  = energía específica.
- $N$  = números de golpes por cada capa.
- $n$  = número de capas de suelo.
- $W$  = peso del pisón.
- $h$  = altura de caída libre del pisón
- $V$  = volumen del suelo compactado.

Datos que originalmente fueron establecidos por Proctor, como los adecuados para reproducir los pesos específicos secos que podían lograrse económicamente, (es decir, con un número moderado de pasadas) con el equipo comercialmente disponible en aquella época. Se sabe que actualmente el número de pasadas oscila entre 5 y 10 puesto que conforme se compacta, el efecto de compactación en cada pasada por la máquina después de cierto número decrece, así que económicamente llega el momento en que un número mayor de pasadas es poco eficiente y costoso.

- Prueba de compactación Proctor estándar y modificada.

Para la realización de esta prueba se requiere el siguiente equipo; molde estándar de compactación cilíndrico, con extensión, pisón estándar, guía metálica para



el pisón, regla recta metálica, balanza de laboratorio, balanza de plataforma con sensibilidad de unos 50g y de 15kg de capacidad, malla no. 4, horno de secado.

El procedimiento de prueba se ajustara a lo siguiente: primero, séquese al aire una muestra de 2.5kg de peso y retírese de ella todo material mayor a la malla no. 4, segundo, determine y registre la tara del molde Proctor teniendo colocada su placa de base, tercero, mezcle la muestra con el agua suficiente para obtener una mezcla ligeramente húmeda, que aun se desmorone cuando se suelte después de ser apretada en la mano, cuarto, divídase la muestra en el numero requerido de porciones, una por cada capa que vaya a usarse, aproximadamente iguales, que se pondrán en el cilindro, compactando cada capa con el numero de golpes requerido, dados con el correspondiente pisón, quinto, cuidadosamente quítase el extensión del molde y enrrese la parte superior del cilindro con la regla metálica, sexto, determine y registre el peso del cilindro, con la placa de base y el suelo compactado, séptimo, retire el suelo del molde y obtenga el contenido de agua de dos muestras representativas, de unos 100gr, una obtenida de un nivel cercano al superior y otra de una parte próxima al fondo, octavo, repítase el procedimiento anterior con un contenido de agua en el suelo ligeramente mayor y así sucesivamente hasta que se hayan obtenido, por lo menos, dos puntos en la grafica de compactación que se sitúen arriba de la humedad optima.

Finalmente dibújese los resultados obtenidos en una gráfica que tenga como abscisas, los diferentes contenidos de agua resultantes y como ordenadas los pesos específicos seco y de la masa. Y dibújese finalmente la curva de saturación completa.

### 3.2. Pruebas base.

Una vez identificado y extraído el material, se lleva al laboratorio de materiales "Luis Silva Rúelas" en la sección de mecánica de suelos, de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, para realizar las pruebas siguientes:

- Obtención de los estados de consistencia, para su identificación y clasificación.
- Determinación del peso específico de los sólidos.
- Determinación de Humedad mediante compactación tipo Proctor.

Estas pruebas no solo son para su identificación y clasificación, también son para la obtención del peso específico de los sólidos y de la humedad optima a la que posteriormente se remodeará por compactación tipo Proctor parao obtener posteriormente las muestras que por medio del labrado se montaran en la máquina de corte directo, para ser probadas como consolidadas no drenadas CU y consolidadas drenadas CD y obtener su resistencia a corte máxima y residual.

- Obtención de los estados de consistencia.

En base a la norma ASTM, se determinan los estados de consistencia, obteniendo primeramente el límite líquido (LL), posteriormente el límite plástico (LP) y por último el índice plástico (IP) con la ayuda de la Ecuación 18.

Triturando y cribado por la malla no 40, para obtener un material equivalente a 0.002mm.





Figura 27: Triturado del material en el mortero.



Figura 28: Cribado en la malla número 40.

Se dispuso a obtener el límite líquido tomando suficiente material arcilloso para ponerlo a saturar 24hr, esto nos ayudara a hacer una pasta de arcilla, como se puede apreciar en la Figura 29.





Figura 29: Material arcilloso, saturada durante 24horas.

Después haremos varias determinaciones en el contenido de humedad. Con la ayuda de la copa de Casagrande, para ranurar y contar el número de golpes en el que se cierra la brecha realizada con la espátula o ranurador, como lo ilustra la siguiente Figura 30, en el primer ciclo se tuvo un número de 39 golpes con un contenido de humedad de 129.75%, en el segundo ciclo el número de golpes fue de 27 con un contenido de humedad de 140.48% y en el tercer ciclo, el número de golpes fue 14 y el contenido de humedad fue 145.48%, después en la grafica de contenido de agua en % contra el número de golpes en escala semilogarítmica, determinamos el contenido de humedad (agua) en % a los 25 golpes, como podemos apreciar en la Figura 31, y tocamos la línea de tendencia, después llegamos al eje de las ordenadas y obtenemos aproximadamente **LL = 137%**. Esta determinación del número de golpes no ayuda a construir una curva de ajuste en base a nuestro material para obtener el contenido de agua a 25 golpes.



Figura 30: Cierre de la brecha de arcilla en la copa de Casagrande.



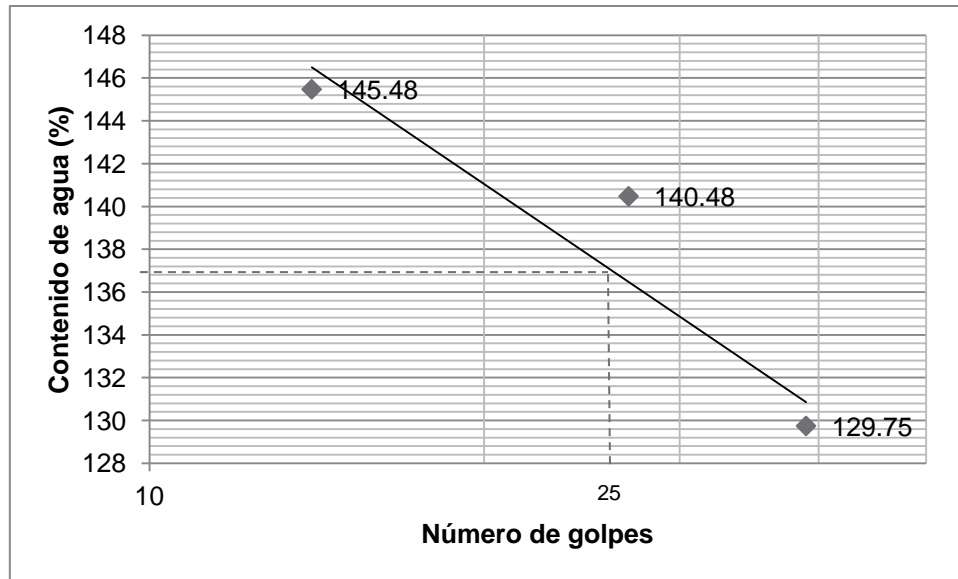


Figura 31: Contenido de agua contra número de golpes.

Ya realizada la obtención del límite líquido nos disponemos a determinar el límite plástico, para ello formamos los rollitos de arcilla en el vidrio con papel absorbente y doblarlos hasta su punto de quiebre, todos aquellos que se logren quebrar con facilidad sin mostrar elasticidad son los que pesaremos para obtener pero húmedo y seco y obtener su contenido de humedad, como podemos apreciar en la siguiente Figura 32.



Figura 32: Rollitos de arcilla para determinar el límite plástico.

Determinamos que el contenido de humedad del límite plástico es **LP = 53.63%**.

También se tuvo que determinar su contracción lineal (CL) y su contracción volumétrica (CV) y para ello se utilizaron un molde rectangular para poder medir su CL y un molde cilíndrico para determinar su CV, como se puede apreciar en las siguientes figuras: Figura 33, Figura 34.





Figura 33: Muestras para determinar la contracción lineal y volumétrica de la arcilla.



Figura 34: Muestras después del secado para determinar su contracción lineal y volumétrica.

Pasando por el horno durante poco más de 24hr para posteriormente medir la contracción lineal obtenemos **CL = 30.16%** y de la contracción volumétrica tuvimos que pasar por medición con mercurio (Hg), para medir volumen desplazado de Hg y obtenemos **CV = 20.55%**.

Ya determinados los valores de LL y LP, podemos determinar el IP que equivale a **IP = 85.41%**, y con esto podemos clasificar e identificar en la carta de plasticidad donde se ubica la arcilla que usaremos en las pruebas de corte directo.

NOTA: el punto nos arrojar una arcilla inorgánica de alta plasticidad (CH) automáticamente, pero muy en el límite de la lineal "A", colindante con la zona de limo con contenido orgánico OH, claramente apreciable en la siguiente Figura 35, además podemos revisar los cálculos, tablas y graficas en el anexo A.



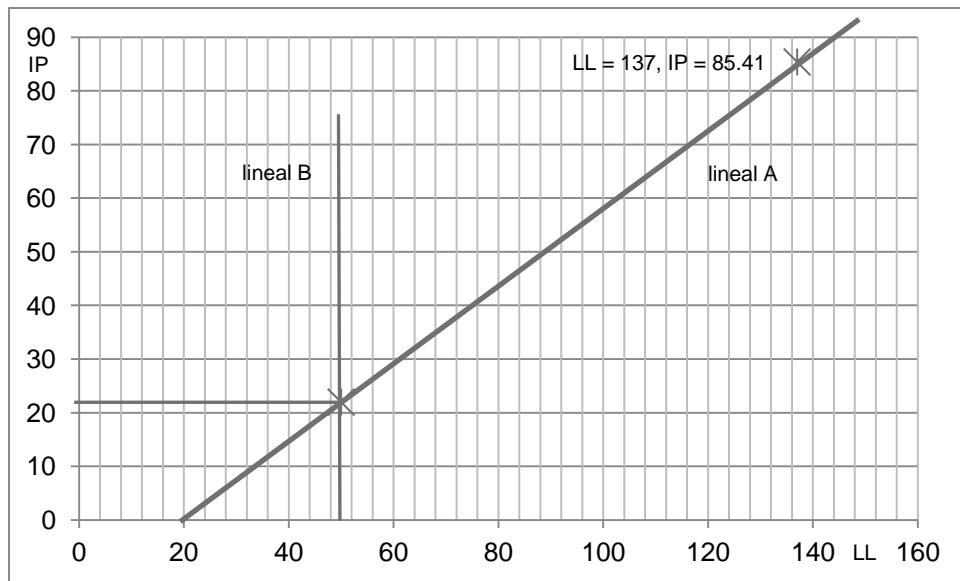


Figura 35: Carta de plasticidad.

- Determinación del peso específico de los sólidos.

Tenemos que determinar el peso específico de los sólidos apoyándonos en la norma ASTM con la cual comenzaremos a calibrar los matraces (3 matraces), una vez calibrado los matraces comenzamos con la determinación de la cual requeriremos aproximadamente de 60 u 80grs de material arcilloso cribado por la malla no 40 y se realizan tres determinaciones para obtener un promedio de **Ss = 2.745**.

- Determinación de Humedad mediante compactación tipo Proctor.

Ahora una vez que se identifico y clasifico el suelo podemos, pasar a la parte en donde determinamos la humedad optima de compactación por medio de la prueba de compactación tipo Proctor.

Empezamos por acarrear el equipo necesario, como es el molde para compactación tipo Proctor y el **pisón** del cual determinamos que su energía especifica de compactación es **Ee = 6.06 kg/cm<sup>2</sup>**, calculo en el anexo F.





Figura 36: Molde para compactación tipo Proctor.

Debemos de triturar el material lo suficiente para que al cribar pase la malla no. 4, la cual nos permitirá continuar con el procedimiento, obteniendo 2.5kg de material, como se puede apreciar en las siguientes figuras: Figura 37, Figura 38, Figura 39, previamente secado el material en el horno 24hr Figura 40: Material secado en horno para eliminar humedad., para eliminar el contenido de humedad que tenga y no altere los incrementos de agua que se le incorpore posteriormente en el desarrollo de la prueba.



Figura 37: Triturado de material arcilloso que es demasiado grande.





Figura 38: Cribado del material por la malla no. 4.



Figura 39: Pesaje de 2.5kg de material arcilloso.



Figura 40: Material secado en horno para eliminar humedad.



Una vez realizado estos pasos, se procede con 600ml e incorporamos el agua en incrementos de 60ml en cada ciclo, realizando 4 ciclos, obteniendo unos corazones representativos de cada muestra de compactación y así determinar el contenido de humedad de cada uno.

En el primer ciclo como se mencionó, comenzamos con 600ml del cual obtuvimos un contenido de humedad (agua) de 44.15%, para el segundo ciclo que fue de 660ml, se obtiene el contenido de humedad de 46.05%, para el tercer ciclo de 720ml, se obtuvo un contenido de humedad de 50.55% y para el último ciclo de 780ml, obtenemos el contenido de humedad de 52.57%, de aquí podemos graficar el contenido de humedad (agua) contra el peso específico y obtenemos la siguiente Figura 41. De la cual podemos deducir que nos hace faltan puntos suficientes para que se logre una inflexión en la curva y se forme un máximo el cual nos permita encontrar el contenido óptimo de humedad.

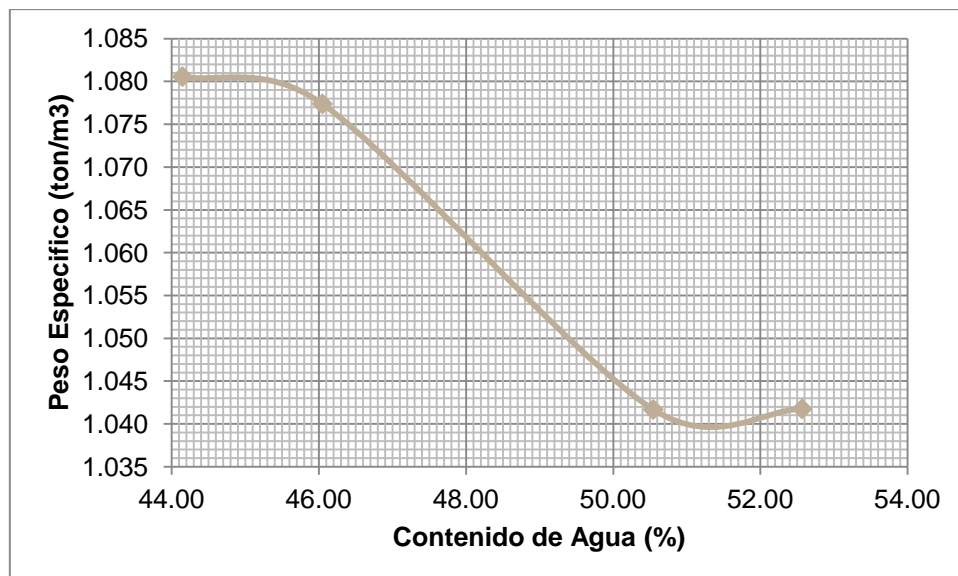


Figura 41: Peso específico contra contenido de agua de las primeras 4 determinaciones.

- Determinación de Humedad mediante compactación tipo Proctor, extensión.

Decidiendo realizar una nueva prueba de 4 ciclos y unir los puntos de estas nuevas determinaciones con los pasados y formar la inflexión de una curva que nos ayude a determinar el contenido óptimo de humedad en el máximo de la curva. Pero ahora comenzamos desde 150ml y de igual forma, con incrementos de 60ml hasta llegar a 330ml.

El primer ciclo que fue de 150ml, obtuvimos un contenido de humedad (agua) de 27.10%, para el segundo ciclo de 210ml, se obtiene un contenido de humedad de 29.35%, para el tercer ciclo de 270ml, obtuvimos un contenido de humedad de 30.26% y finalmente el cuarto y último ciclo de 330ml, se obtiene un contenido de humedad de 36.46%, y nuevamente se graficar el contenido de humedad (agua) contra el peso específico y obtenemos la siguiente Figura 42.



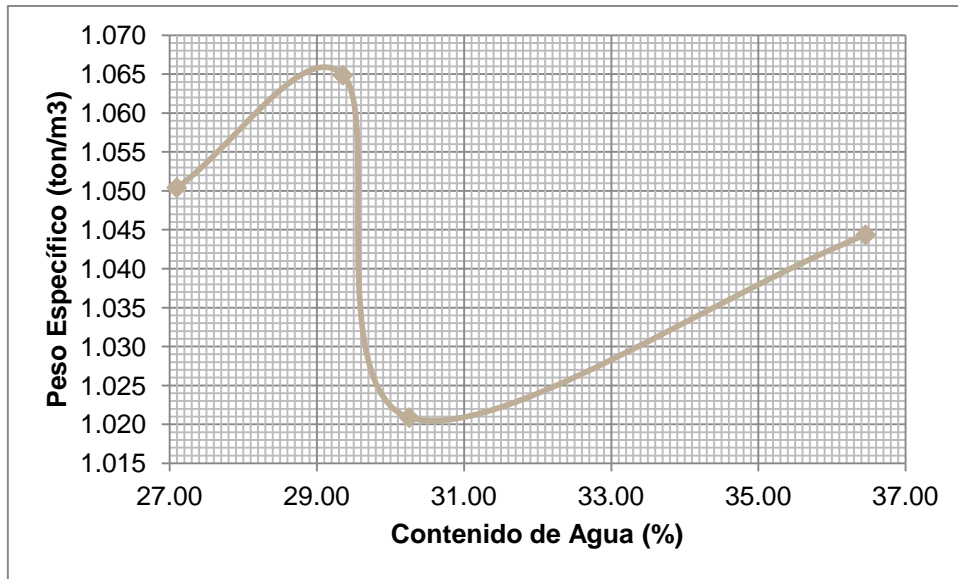


Figura 42: Peso específico contra contenido de agua de otras 4 determinaciones.

Por conveniencia solo tomamos las últimas dos determinaciones y los graficamos junto con los puntos anteriores, como se mencionó y graficamos, ver Figura 43, para poder lograr la inflexión en la curva y obtener el máximo que representa en porcentaje, la humedad óptima de nuestra arcilla, para compactar.

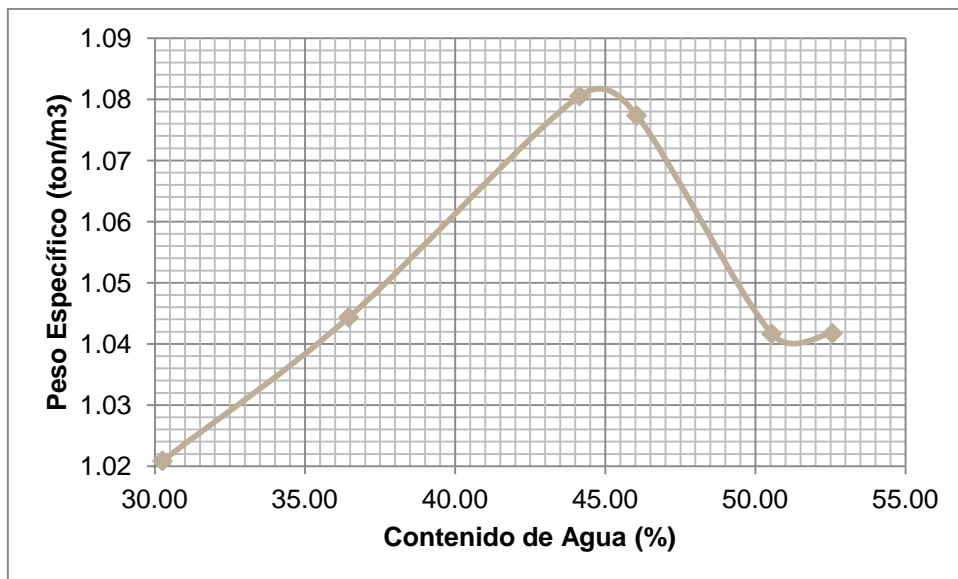


Figura 43: Peso específico contra contenido de agua con 6 determinaciones de las 8 realizadas.

De nuestra gráfica anterior podemos determinar de manera muy visual que el contenido de humedad es de 44.75%  $\approx$  45% aproximadamente, para términos prácticos. Y tanto los cálculos como las tablas y graficas se pueden consultar en el anexo B.





Figura 44: Espécimen de compactación tipo Proctor y la extracción de muestras representativas.



Figura 45: Material representativo de cada ciclo (Proctor), para determinar su humedad.

Ya que se hicieron las pruebas más elementales a nuestro material para su correcta identificación y clasificación, podemos empezar a idear como será el siguiente paso, labrar las muestras y montarlas en la máquina de corte directo, establecer el procedimiento que se requiere para poder inducir la falla sobre de nuestra muestra y probarla en la máquina de corte directo como se haría en el caso de una muestra sin inducción de falla.

### 3.2.1. Pruebas para establecer el procedimiento de inducción de falla.

Una vez que se identificó y clasificó el suelo en laboratorio, se pensó en las maneras posibles para llevar a cabo la falla en el espécimen una vez que este fuera labrado del espécimen que resulta del la compactación tipo Proctor. A continuación se hace el



recuento de las posibles alternativas para poder fallar el espécimen labrado y montado en la máquina de corte directo.

En esta primera fase se buscó el elemento que nos ayudará a producir la falla, se pensó en la cuerda de guitarra metálica, que nos proporciona dos características que son relevantes; la primera es la resistencia suficiente para poder aplicar la fuerza suficiente y así fallar el espécimen, dado que la arcilla una vez consolidada 24hr adquiere cierto nivel de dureza, en comparación a la previa consolidación, la segunda es el calibre de la cuerda ya que esta es lo suficientemente delgada para poder introducirla entre las placas y así fallar la muestra sin tener que alterar tanto el medio en el que se encuentra la muestra.

Para comenzar esta serie de pruebas, solo se pensó en aflojar los tornillos de sujeción de las placas que contienen al espécimen en la máquina de corte directo, lo suficiente para poder levantar la placa superior y así introducir la cuerda, como se puede ver a continuación en la Figura 46.



Figura 46: Placas de corte directo, sección circular.

Se buscó una manera de generar o inducir la falla en la muestra una vez montada en la máquina de corte directo y se dejó consolidar por 24 horas, el espécimen. La primer idea fue emplear una cuerda de guitarra (la primera o también llamada MI) para introducirla entre las placas y tensarla, llevando la cuerda hasta la mitad del espécimen y comprobar que es un método conveniente para el propósito de generar o inducir la falla en la muestra.

La segunda idea fue hacer lo mismo pero montando dos cuerdas entre las placas (sirviendo esta configuración para levantar las placas) y una tercer cuerda quedaría libre entre las otras dos y por detrás de la muestra, para una vez dada la consolidación usar esa tercer cuerda para cortar.

La tercera prueba se intentó hacer un hilo de cáñamo, pero la existencia de una ranura en una de las placas impidió que a la hora de introducirla esta llegara y tuviera el contacto con el espécimen y poder cortarlo, de hecho la cuerda fue la que resulto cortada.

La cuarta prueba se realizó igualmente como la primera configuración, solo que en vez de usar la cuerda MI se usó la cuerda SOL (o sea la tercera en la guitarra).



- Analizando la prueba con la cuerda MI (C1).

La muestra se consolidó por 24 horas, con **esfuerzo normal  $0.409\text{kg/cm}^2$**  (C1), como se estableció anteriormente en pruebas, posterior a ello se procedió a utilizar la cuerda como instrumento que permitiera inducir la falla, hasta la mitad del espécimen, pero no se logró, sino solo una tercera parte aproximadamente, como se muestra en la Figura 47: Muestra fallada número 1, correspondiente a C1.



Figura 47: Muestra fallada número 1, correspondiente a C1.

Además la consolidación a 24 horas se realizó con éxito, teniendo como **esfuerzo normal  $0.409\text{kg/cm}^2$** , por 24hr y 0.06 mm de deformación aproximadamente. Debo hacer notar que por error al no sacar dimensiones, pesos y seguir el procedimiento normal, no podré calcular el esfuerzo cortante máximo, así que solo obtendré la carga del anillo máxima en kg. Fuerza = 6.76kg (C1).

En pruebas en donde solo se hicieron con el fin de conocer y familiarizarse con el equipo, se había obtenido una fuerza máxima de 10.94kg. 7.02kg. y en otra que dio 2.34kg; no sé porque bajo, pero esa observación que se realizó hace pensar en implementar prueba doble, o sea, una muestra labrada y montada que se le inducirá la falla y otra a la que no se le inducirá falla alguna, con el propósito de tener un parámetro de referencia entre una y otra en condiciones similares y por condiciones similares me refiero solo en el sentido de que ambas se probaran con fuerza normal (P') de 8, subsecuentemente de 12 y 16kg.

- Analizando la prueba con la cuerda MI (C2).

De la primera prueba se dedujo que tal vez colocar dos cuerdas serviría para colocar una tercera que sería la que cortará la muestra de manera mucho más fácil, así que se procedió a colocar dos cuerdas en los extremos de la perforación central sujetas a las agarraderas de las mismas placas, donde está contenida la muestra como se aprecia en la Figura 48, en la Figura 49, se muestra como se colocará la cuerda para cortar y en la Figura 50, se muestra, finalmente realizada la prueba, (consolidada, fallada y probada a corte) se aprecia el batidillo que se hizo de la muestra por la gran exposición de agua, al tener esa separación entre placas.





Figura 48: Implementación de las cuerdas en los extremos de la sección circular.

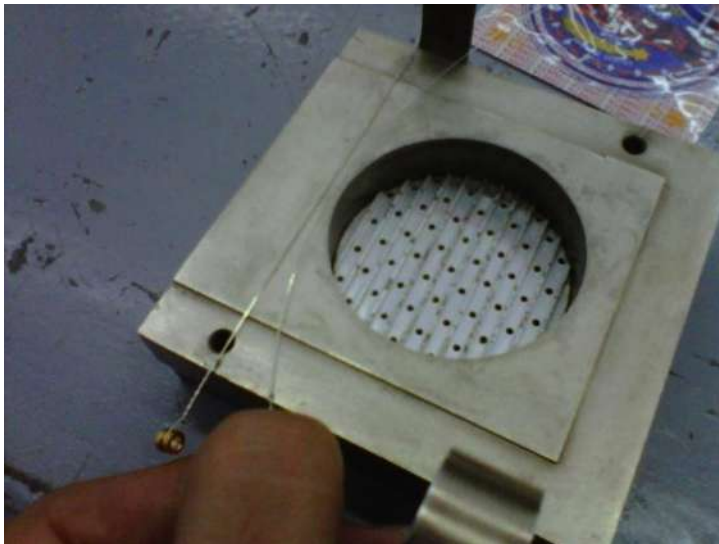


Figura 49: Muestra de la posición de cuerda que cortará la muestra en este experimento.



Figura 50: Muestra que se humedeció en demasía y estropeo la muestra, correspondiente a C2.

Dadas la evidencias, se concluyó que era la peor opción ya que también se desmonto (quitando el **esfuerzo normal 0.409kg/cm<sup>2</sup>**, con el que se consolido) de la máquina de corte directo para poder trabajar la muestra de manera más cómoda al inducirle la falla, fue la idea correcta porque finalmente se altera las condiciones de consolidación y de aplicación de una carga normal, que se supone nunca deja de estar presente.

Para el caso en el que se consolido por 24hr y se la indujo una **esfuerzo normal 0.409kg/cm<sup>2</sup>** (C2), la consolidación se llevó perfectamente, pero cuando se probó a corte y debió haber cargado, simplemente no fue así, cuando se desplazó en corte, nunca cargo y esto lo suponemos a que se produjo un reblandecimiento extremo de las partículas de arcilla y esto provoco irremediamente que la prueba no resultara satisfactoria.

- Analizando la prueba con hilo de cáñamo (C3).

Como se puede apreciar en la Figura 51: Muestra correspondiente a C3 después de la prueba de corte, placa superior., Figura 52: Placa inferior de la muestra C3, muestra como se corto la muestra de arcilla. y Figura 53: Ambas placas correspondientes a la prueba C3., se logró inducir la falla, porque finalmente se falló la muestra con la cuerda de guitarra (MI), puesto que el hilo de cáñamo se rompió de entre las ranuras que tienen las placas, mientras se disponía a fallar la muestra, nuevamente se implemento el método de aflojar los tornillos de sujeción y levantar ligeramente con los dedos, la placa superior para introducir en este caso el hilo de cáñamo que se rompió y posteriormente se falló con la cuerda (MI).



Figura 51: Muestra correspondiente a C3 después de la prueba de corte, placa superior.





Figura 52: Placa inferior de la muestra C3, muestra como se corto la muestra de arcilla.



Figura 53: Ambas placas correspondientes a la prueba C3.

De aquí concluimos que las cuerdas de fibras naturales o incluso plásticas no son adecuadas porque no se sienten cuando quedan atascadas y son los suficientemente vulnerables de que se corten en el proceso de fallar la muestra, con las cuerdas metálicas, se tienen la particularidad de sentir unos pequeños tirones cuando estás se atascan de entre las ranuras y se sobre tensan (atascan) y cuando se destensan (desatascan), es por eso que el muy peculiar comportamiento de la cuerda de guitarra metálica, es lo que finalmente nos hace adoptar como instrumento que sirva para fallar la muestra que se encuentra montada en la máquina de corte directo.

La consolidación para la tercer prueba, igualmente de 24hr de consolidación y de **esfuerzo normal  $0.409\text{kg/cm}^2$**  (C3), siempre es congruente con el resto de las consolidaciones y no resultan datos atípicos, así que analizando ahora el desplazamiento horizontal y la carga, se tiene que si cargo hasta  $7.101\text{kg}$  (C3), reflejado perfectamente en la curva que se forma normalmente en pruebas de corte directo.



- Analizando la prueba con la cuerda sol (C4).

Se realizó la consolidación por 24hr como en las demás pruebas, de ahí se procedió a inducir la falla con la cuerda de guitarra (SOL), como se muestra en la Figura 54: Muestra con inducción de la falla, con una cuerda de guitarra (SOL).



Figura 54: Muestra con inducción de la falla, con una cuerda de guitarra (SOL).

De la cual no se concluye que el hecho de que la cuerda sea mucho más gruesa y eso hiciera que se tuviera que separar las placas aun mas, esto aunado al hecho de que tiene una corrugación la cuerda, provoco que no se fallara la muestra de manera más precisa y sin tener que afectar la muestra tanto, como se logra apreciar en la Figura 54, en ningún momento se parecía a simple vista la falla como en las otras pruebas cortadas por la cuerda de guitarra metálica (MI). Esta es tal vez la apreciación más relevante de esta prueba.

En el caso de la consolidación a 24hr y con **esfuerzo normal  $0.409\text{kg/cm}^2$**  (C4), se tiene que la consolidación se realizó normalmente sin contratiempos y como con las otras pruebas la consolidación, nunca representa ser un problema, la etapa de consolidación.

Se produjo una carga de 9.088kg (C4), a pesar de que se logró inducir la falla con la cuerda con corrugaciones y que a simple vista no aparecieron las evidencias de ser fallada, una vez que se desmontará.

De todo lo anterior se concluyó que la mejor opción, es utilizar la cuerda de guitarra (MI), por tres razones muy importantes (una de ellas ya se menciona, párrafos en anteriores), y es que el hecho de ser muy delgada y por lo mismo no levantarse mucho las placas cuando se introduce la cuerda (MI), facilita el no alterar la muestra más allá de lo permisible y otra razón de mucho peso es que la ser liza y no tener corrugaciones como la cuerda de guitarra anterior (SOL), se logra fallar la muestra más eficientemente y que se refleje a simple vista, una vez que se desmonte la muestra, después de ser probada a corte directo.



- Prueba en la que se falla la totalidad de la muestra.

Lo siguiente es hacer otros ensayos, pero ahora se inducirá la falla en la totalidad de la muestra, para ver qué resultados nos arroja. A continuación se presentan los resultados de la prueba en la Figura 55: Desplazamiento horizontal contra carga, muestra completamente cortada., que se indujo la falla en toda la muestra.

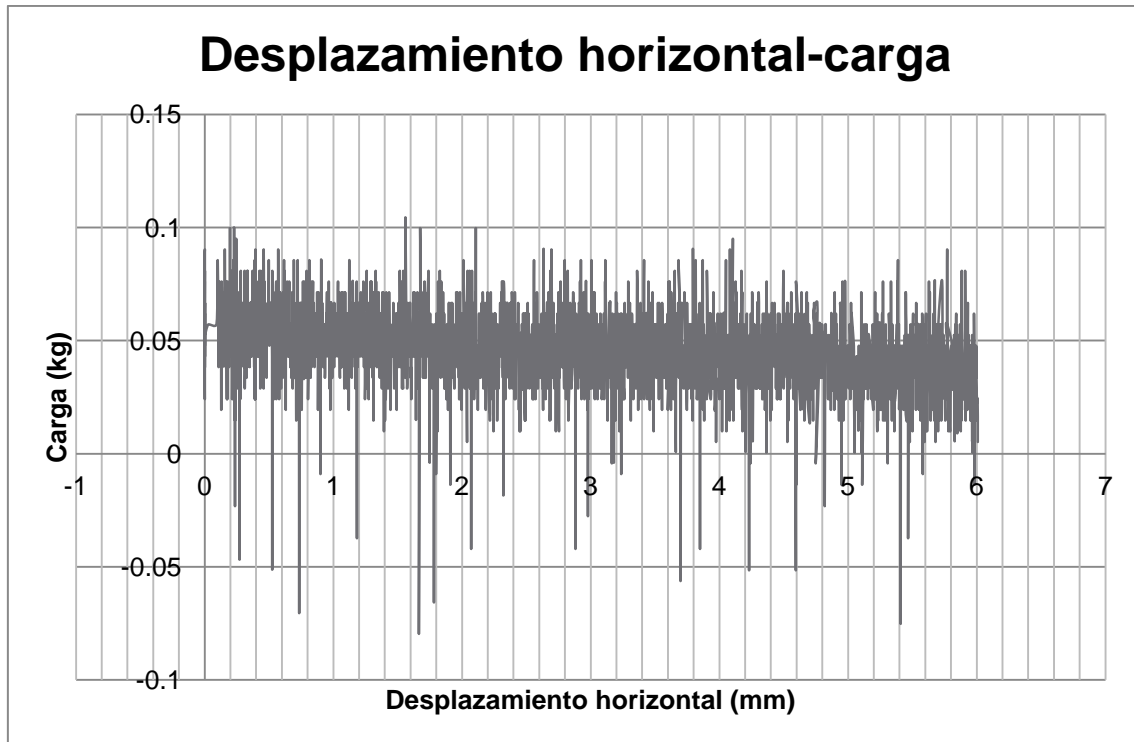


Figura 55: Desplazamiento horizontal contra carga, muestra completamente cortada.

Los resultados muestran que se presentó una resistencia al corte prácticamente nula demostrando así que se tienen un coeficiente de fricción muy bajo y una cohesión completamente nula y el hecho de tener una película muy delgada de agua que se forma en el momento de ser fallada con la cuerda de guitarra metálica (MI), influye en la muestra para descartar la suposición que se hizo antes de la prueba, en la que se pensó que existiría el suficiente coeficiente de fricción para lograr ser reflejada una carga en la muestra, pero eso nunca sucedió.

A continuación se muestran dos gráficas en la que se resume todo el trabajo hecho anteriormente, la consolidación y corte, con sus indicadores correspondientes, para saber que curva corresponde a que prueba, se tiene pues la, Figura 56 y Figura 57:  $\epsilon_h$  contra carga para pruebas C1 a C4.



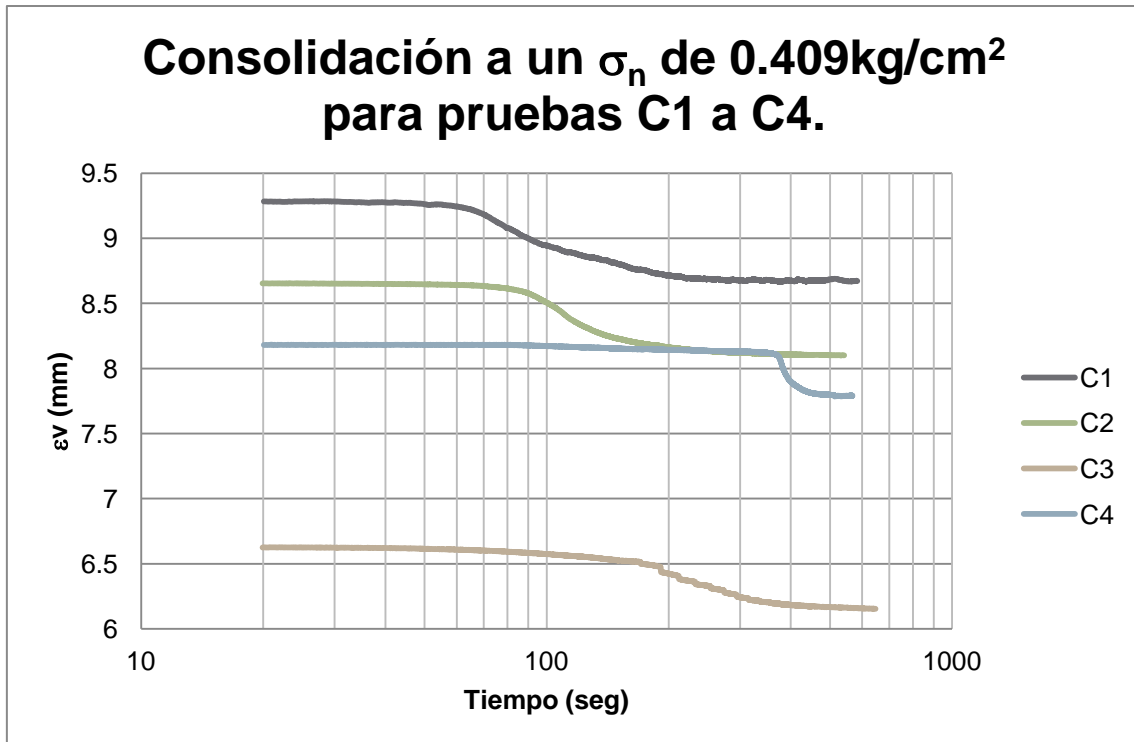


Figura 56: Consolidación de las pruebas C1 a C4.

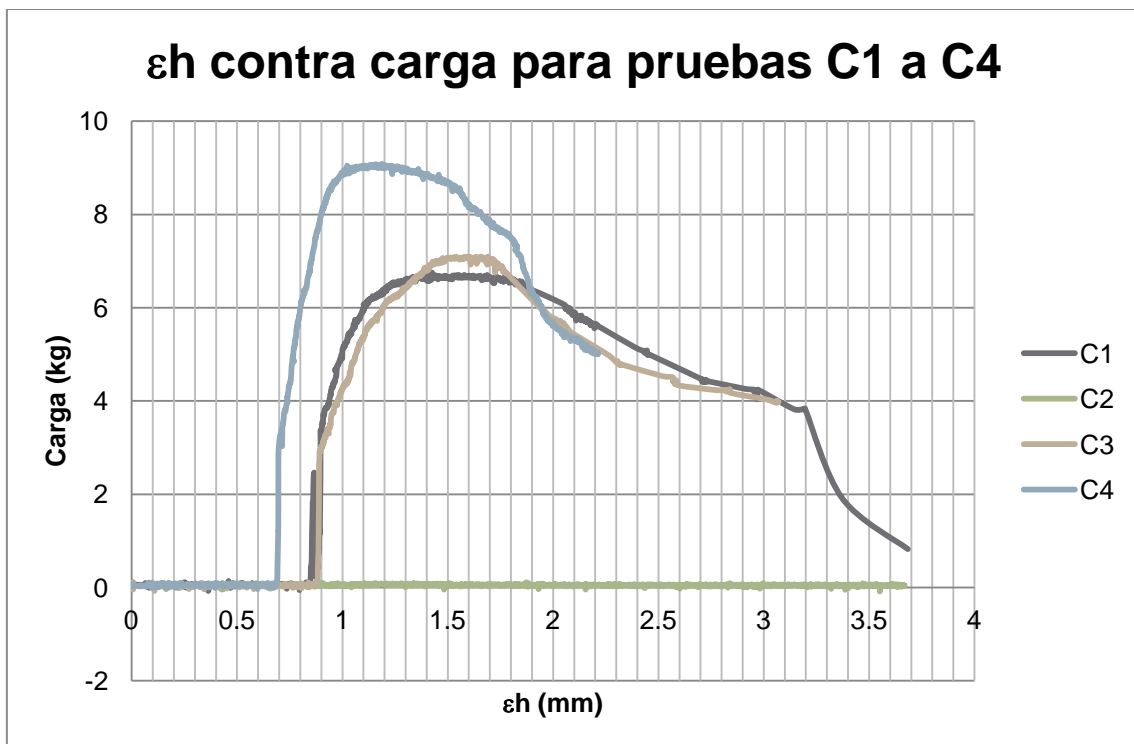


Figura 57: εh contra carga para pruebas C1 a C4.



### 3.2.2. Pruebas para mejorar el método.

Se montó un espécimen del cual al ser fallado y probado no se obtuvo carga alguna, ni una falla a simple vista (como en las anteriores muestras) que indicara la acción de ser fallada. Se implementaron unas configuraciones de como inducir la falla, que mejoraran al método anterior.

Las mejoras que se idearon para establecer el método más correcto a seguir, para fallar las muestras, consta de las siguientes características:

- a) Utilizar las dos ranuras para tornillos ya definidas en las placas para colocar los tornillos que al chocar con la placa inferior, levantarían la placa superior lo suficiente para introducir la cuerda de guitarra y no alterar demasiado la muestra.
- b) Engrasar ambas placas por las paredes internas, exactamente donde hacen contacto con la muestra y entre las placas.

Básicamente esos son los ajustes más significativos que nos permitieron hacer un mejor procedimiento, para inducir la falla en la muestra, cabe aclarar que esta implementación se hizo después de hacer observaciones de la siguiente prueba, que fue fallida en el sentido de que no cargo a pesar de seguir la metodología anterior que consistía en aflojar los tornillos y levantar la placa de manera manual, lo suficiente para introducir la cuerda, sin implementar los tornillos auxiliares, ni la grasa.

- Analizando la prueba fallida (F).

La muestra se consolido por 24 horas, con esfuerzo normal  $0.409\text{kg/cm}^2$ , como se estableció anteriormente en pruebas, posterior a ello se procedió a utilizar la cuerda como instrumento que permitiera inducir la falla, pero no se obtuvo la visualización de esta, como se muestra en la Figura 58: No existe visualización de la falla a simple vista para la prueba F.



Figura 58: No existe visualización de la falla a simple vista para la prueba F.

La consolidación a 24 horas se realizó sin errores posibles, de manera normal y como en anteriores ocasiones, obteniendo una consolidación a 24hr con una deformación de 1mm aproximadamente (F), pero con un desplazamiento horizontal nulo (F), no cargo cuando debió haberlo, lo cual representa un fallo en alguna parte del procedimiento, graficas individuales en el anexo E.



Por error (nuevamente), no se sacaron las dimensiones, ni se pesó, por lo que no se pudo calcular el esfuerzo cortante máx., así que solo obtendré la carga del anillo máx. en kg, pero el hecho de no cargar, hace que la importancia de este error sea nula, para este caso.

- Implementando la prueba con modificaciones (G).

Como se mencionó en párrafos anteriores, se implementó el colocar grasa tanto en el anillo de la placa superior como en las paredes de contacto entre las placas, como se aprecia en la Figura 59: Implementación de la grasa en las paredes de las placas para la prueba G., se indujo la falla con la cuerda y con el método ya verificado en anteriores pruebas solo que al adicionar la grasa, se procuró el no ingreso del agua hacia la muestra y facilitar la movilidad de la placa al pasar la cuerda de guitarra (MI).



Figura 59: Implementación de la grasa en las paredes de las placas para la prueba G.

Como ya se observa en la Figura 59: Implementación de la grasa en las paredes de las placas para la prueba G., se indujo la falla y se probó a corte directo, teniendo como resultado que si cargo y si se logra apreciar la falla en la muestra a simple vista, al ser desmontada de la máquina, de lo cual se deduce que el colocar grasa en las paredes de las placas es de gran ayuda, pero que la grasa en exceso y entre las placas puede ser innecesario para que no afecte cuando la muestra se corte, parcial o total o lubrique las caras de la muestra de arcilla.

Así que se optara en futuras pruebas el no adicionar grasa entre las placas, pero si se hará en la cara interior de la placa superior y solo lo suficiente para no tener un excedente de grasa y que esta se desplace a otras partes de la muestra.

La consolidación a 24hr tuvo una deformación aproximada de 0.15mm (G), y cuando se probó a corte la muestra (EC), esta cargo 5.2kg (G) aproximadamente, gráficas individuales en el anexo E.

- Prueba con tornillos auxiliares para levantar la placa superior (T).

En la Figura 60: Placas de corte de directo y sección circular con tornillos de sujeción y tornillos auxiliares., se aprecian los tornillos de sujeción a tope y los tornillos auxiliares con un desfase, ya que estos tocan la placa inferior y en la Figura 61: ejemplificación del momento en el que se eleva la placa superior al girar los tornillos



auxiliares., se aprecia el momento cuando se aflojan los tornillos de sujeción lo suficiente para girar los tornillos auxiliares y que estos al contacto con la placa inferior eleven a la placa superior, todo de manera uniforme y controlada.



Figura 60: Placas de corte de directo y sección circular con tornillos de sujeción y tornillos auxiliares.



Figura 61: ejemplificación del momento en el que se eleva la placa superior al girar los tornillos auxiliares.





Figura 62: Muestra de arcilla después de la prueba a corte con método anterior.

Por último en la Figura 62: Muestra de arcilla después de la prueba a corte con método anterior., podemos observar que el método de los tornillos funciona de manera perfecta, y que solo se colocó la grasa en la pared interior de la placa superior ya que esta es la que se va encontrar en movimiento al girar los tornillos auxiliares que levantan la placa superior y esto ayuda a que la muestra de arcilla se deslice de manera óptima, en ese movimiento.

La consolidación de esta muestra de arcilla por 24hr se obtuvieron datos atípicos y esta vez no fue congruente con el resto de las consolidaciones, pero se supone que la consolidación se lleva a cabo de manera regular aunque los datos se disparen de forma incongruente, atribuyendo esto a una irregularidad en el suministro de corriente eléctrica en el laboratorio, pero cuando se prueba a corte, se logra graficar de manera correcta y se puede apreciar que existe la carga, gráficas individuales en el anexo E.

En las gráficas de resumen, siguientes: Figura 63: Consolidación de las pruebas F-G-T., Figura 64:  $\epsilon_h$  contra carga para pruebas F-G-T., se aprecia la curva de la carga, concluyendo así, que el procedimiento será el de levantar las placas con los tornillos auxiliares, dando medio giro de los tornillos que están sujetos para aflojar las placas y después dar esa medio giro, pero en los tornillos auxiliares y así levantar las placas el espesor suficiente de la cuerda, de manera que facilite la introducción de la cuerda de guitarra entre las placas y una vez posicionada la cuerda, comenzar a fallar la muestra. Una vez cortada la muestra, se vuelven a girar los tornillos auxiliares para retirarlos de las placas, así como los tornillos de sujeción para probar la muestra a corte. Una observación hecha con anterioridad es que hacer dos muestras por cada prueba, para probar una de ellas en condiciones de control (sin falla) y otra con la falla, para ser comparadas entre sí, esto con diferentes **esfuerzos normales de  $0.409\text{kg/cm}^2$ ,  $0.614\text{kg/cm}^2$  y  $0.818\text{kg/cm}^2$** , derivando en 6 pruebas totales, para construir la envolvente de falla con 3 puntos (muestra fallada) y los otros 3 puntos crearan la envolvente de falla (de control) para tener punto de comparación.



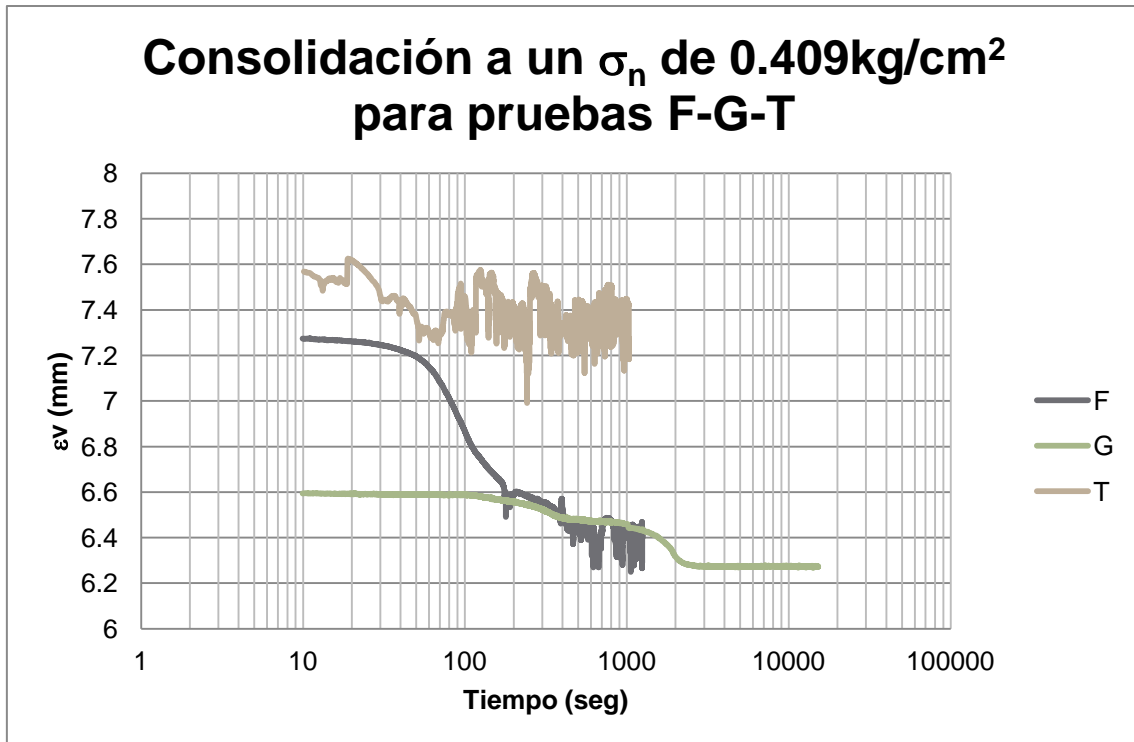


Figura 63: Consolidación de las pruebas F-G-T.

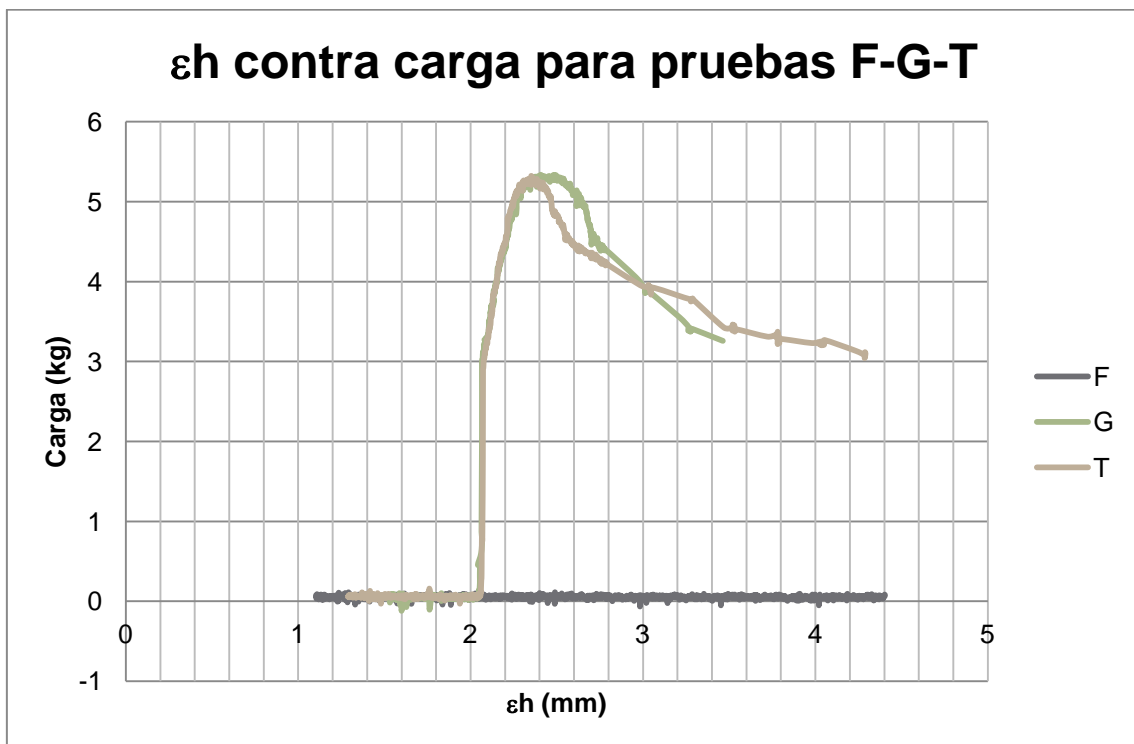


Figura 64:  $\epsilon_h$  contra carga para pruebas F-G-T.

### 3.3. Experimentación.



### 3.3.1. Procedimiento para labrar la muestra (EC).

Se realiza una compactación tipo Proctor con la humedad óptima (determinada con anterioridad), para elaborar un espécimen tipo Proctor (EP) del cual labraremos especímenes más pequeños de corte (EC), de medidas y dimensiones que correspondan con las de la máquina de corte directo.

El material para poder hacer el labrado a mano de forma artesanal (prácticamente), es una de las placas contenedoras de la muestra, con diámetro  $\phi = 4.99\text{cm}$ , con ayuda de una pieza delgada y dura, con el fin de marcar el diámetro ejerciendo cierta presión con la pieza y la placa sirviendo de guía, al ser marcada la muestra de suelo en su superficie, nos muestra claramente cuál es el área que hay que respetar y cuál va a ser eliminada por un cuchillo y un exacto.

El cuchillo, nos servirá para remover la mayor parte de la arcilla que se encuentra circundante a nuestra área de interés y el exacto nos permite de manera mucho más precisa hacer los cortes y dar forma correcta al espécimen a labrar, que tendrá una forma cilíndrica, de dimensiones aproximadas a un **diámetro  $\phi = 4.99\text{cm}$**  y una **altura  $h = 2.5\text{cm}$** .

Se removió el exceso de arcilla y midió una altura preliminar, se dispone a cortar por la parte inferior que aun está unida al EP, con una técnica muy similar a la utilizada cuando se corta un árbol con una hacha, con el fin de no lastimar la muestra EC, ya logrado separar el EC al EP, se dispone hacer cortes, con el exacto sobre el canto del espécimen, para lograr afinar y dejar una superficie uniforme con respecto a la placa de referencia de la máquina de corte directo. Hay que tener cuidado de no hacer cortes mayores a los necesarios de lo contrario, eliminaremos volumen de mas al EC, una vez que se logra una superficie relativamente uniforme, se hacen cortes en forma de ralladura dejando virutas de arcilla muy similares a las de madera cuando se corta con cepillo para dejar una superficie plana (de arriba hacia abajo con poca fuerza y rápida acción), al espécimen, para lograr definir la curvatura cilíndrica que permita ingresar la muestra en las placas.

Ya logrado el acabado superficial sobre el canto del EC, ahora nos disponemos a nivelar las superficies superior e inferior de la muestra EC, para que estén niveladas y cuando se monte en la máquina de corte con todos los suplementos, no cause problemas. Esto se logra poniendo la muestra en la placa y dejando desfasada una parte suficiente para ser cortada con el exacto y que concuerde con la superficie de la placa, tanto en la superficie superior como en la inferior.

Una vez labrada la muestra, lista para ser montada, se cubre con papel celofán para que durante el manejo de la muestra EC no pierda ninguna propiedad, se procede a determinar su diámetro real de la muestra (tomando 4 lecturas), con ayuda del Vernier, además, de obtener su diámetro real de la muestra se determina su altura real de la muestra (igualmente tomando 4 lecturas), y finalmente se pesa, todo esto instantes antes de ser montada en la máquina de corte directo.

### 3.3.2. Procedimiento para montar, consolidar y probar a corte (EC).

Una vez realizado lo necesario para tener la muestra EC (espécimen de corte) que se dispondrá a montar en la máquina de corte directo. Se tiene que preparar la maquina y



el instrumental necesario que a continuación se mencionará en una descripción de paso a paso cómo montar, consolidar y probar a corte la muestra (EC), para una prueba consolidada drenada (CD) y posteriormente se realizara una prueba consolidada no drenada (CU) y se analizaran ambos casos.

Se tiene que encender la computadora e iniciar el programa LABview con el sub programa que se desarrollo específicamente para la consolidación a 24hr, teniendo algunos puntos a destacar en este programa que se puede apreciar en la siguiente Figura 65: Subprograma en LABview para captura de datos en consolidación en maquina de corte directo.. En la parte izquierda de la figura, vemos una graficación en tiempo real de, el tiempo en segundos (en escala logarítmica, en el eje de las abscisas) y la deformación vertical en milímetros (en el eje de las ordenadas) que nos permite visualizar de manera muy fácil y cómoda como se desempeñan los datos capturados conforme se desarrolla la consolidación durante su periodo de 24hr, en la parte derecha superior se aprecia la tabla en la que se imputan los valores capturados cada periodo de tiempo, tanto la deformación vertical (mm), como el tiempo transcurrido en (seg), como el numero de lecturas.

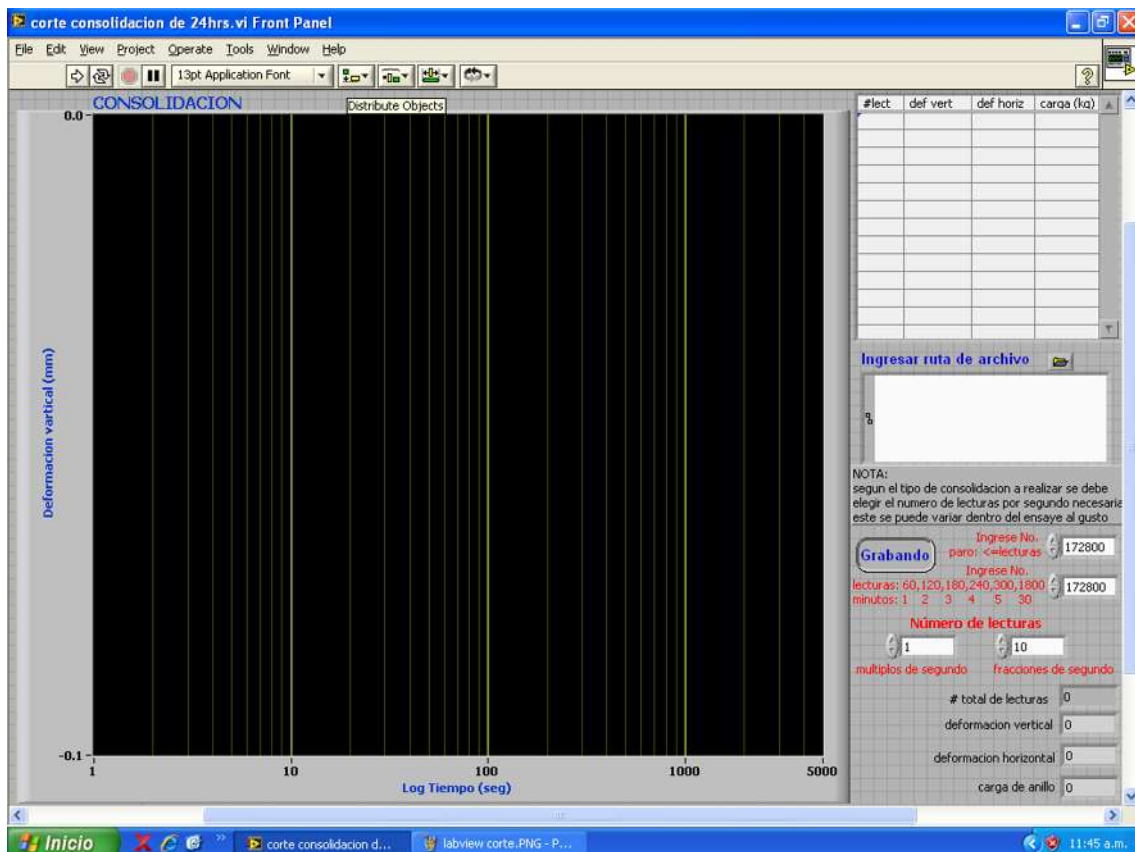


Figura 65: Subprograma en LABview para captura de datos en consolidación en maquina de corte directo.

Posteriormente en la misma parte derecha media, se encuentra la casilla que corresponde a la dirección del archivo en la computadora, en la parte derecha inferior se muestran el botón de grabado, dos casillas en donde podemos variar el tiempo que dura la prueba (en segundos), dos casillas mas etiquetadas con el titulo de *número de lecturas* para manipular la captura del numero de lecturas tomadas dentro de los segundos, ejemplo: la casilla izquierda: *múltiplos de segundo*, equivale a que podremos tomar un número menor de lecturas por cada segundo transcurrido y la casilla derecha: *fracciones de segundo*, equivale a poder tomar un mayor número de



lecturas por cada segundo transcurrido y las cuatro casillas finales solo son indicadores máximos de ciertos valores, que pueden verse claramente en la figura.

En lo que la computadora termina de cargar y estar completamente lista para comenzar a funcionar capturando datos, previamente conectado vía USB la tarjeta de captura de datos se conecta a la toma de corriente, esta misma, la tarjeta con la que se cuenta para capturar estos datos es la siguiente NI USB-6008 National Instruments Figura 66: Tarjeta que captura los datos de los sensores en la máquina de corte directo USB NI.



Figura 66: Tarjeta que captura los datos de los sensores en la máquina de corte directo USB NI.

Verificamos antes correr el programa con el botón de granado activado y con dirección de archivo ingresada, el que muestre señales de actividad en la gráfica de tiempo real del sub programa, manipulando los sensores de movimiento, para la consolidación, como se muestra en la siguiente Figura 67: Sensor de movimiento para la consolidación.

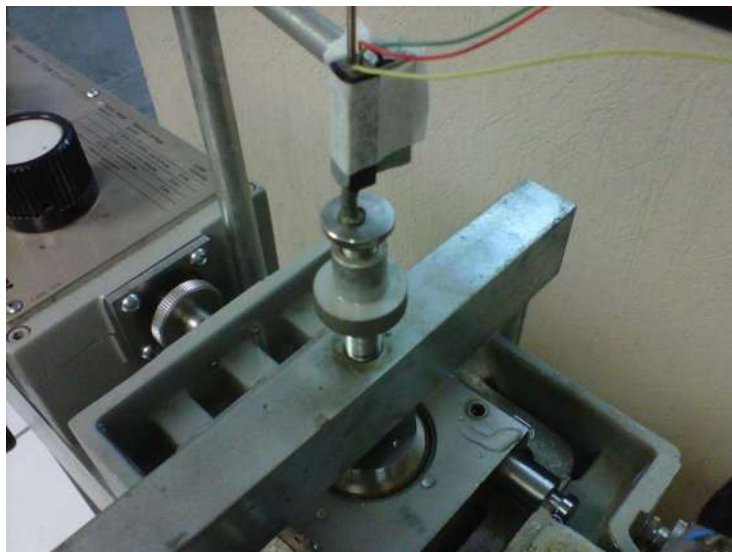


Figura 67: Sensor de movimiento para la consolidación.

Tener agua destilada suficiente para saturar la bandeja que contiene a las placas de corte, que contiene la muestra de suelo.



Reunido todos estos elementos se procede a colocar la grasa en la pared interior de la placa superior, como se mencionó antes solo lo suficiente para cubrir las paredes sin tener excesos, se unen las placas y se colocan los tornillos de sujeción y posterior a ellos los auxiliares, se colocan ambas placas en la bandeja y se coloca la base, piedra porosa y la plaquita ranurada (que amordaza a la muestra por las ranuras), teniendo la precaución de colocar las ranuras de forma perpendicular al sentido en que corre la bandeja. Se retira el celofán de la muestra de arcilla, previamente labrada (pesada y medida), se coloca en la orificio principal de las placas y luego se coloca otra plaquita ranurada, también, con las ranuras de forma perpendicular al sentido en que se desplaza la bandeja, luego la piedra porosa y por último el cabezal con la forma que recibe al mecanismo de peso vertical, para llevarla a la consolidación.

Se ajusta la palanca que sujeta al sensor de movimiento para que quede lo más exacto posible, teniendo contacto con el tornillo ajustable que tiene el mecanismo de peso vertical, como se muestra en la Figura 67: Sensor de movimiento para la consolidación.. Posteriormente se dispone a verter el agua destilada en la bandeja, para de forma seguida colocar el peso de 8kg en el mecanismo de peso vertical en el justo momento en el que se inicia la captura de datos, para que sea lo más exacto el momento en que suceden las acciones.

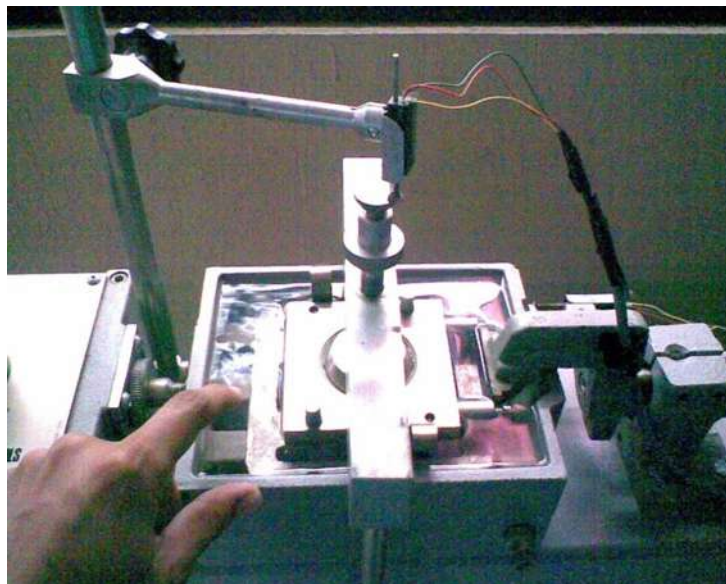


Figura 68: Bandeja llena de agua destilada.

Una vez realizado este procedimiento, nos disponemos a dejarla 24hr, para su correcta consolidación. Haciendo una captura de pantalla de cómo se desarrolla la prueba en tiempo real, se aprecia de manera muy fácil y evidente como es el correcto funcionamiento de este sub programa en el momento de la captura de datos.



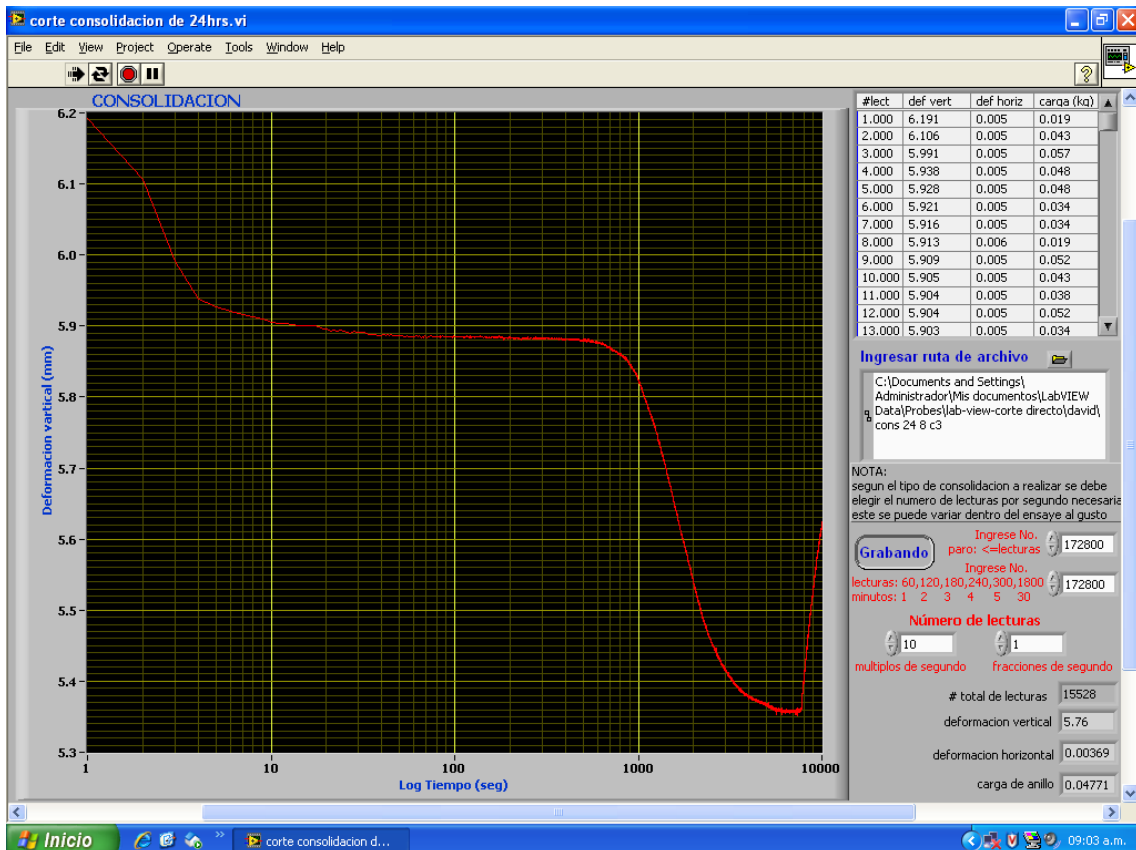


Figura 69: Captura de pantalla del subprograma en el momento de la consolidación en tiempo real.

Terminada la prueba de consolidación por 24hr, se determina el valor de  $t_{50}$ , para poder determinar la velocidad final ( $V_f$ ) con la que se entran a una lista de velocidades, para ajustar la máquina de corte a la velocidad a la que la bandeja se desplazara durante el corte de la muestra de suelo. Realizando los cálculos que se pueden verificar en el anexo G, tenemos  $t_{50} = 2.13min$  y una  $V_f = 0.047mm/min$ . Teniendo las tablas de la maquina e ingresando con el valor calculado de la velocidad final, podemos ajustar la velocidad de la máquina de corte directo, como se puede ver en la siguiente Figura 70: Tablero de controles de la máquina de corte directo., en la que se muestra el tablero de controles donde se ajusta en base a la velocidad final y de las tablas de la máquina de corte directo.



Figura 70: Tablero de controles de la máquina de corte directo.



1485	282	0,045913	317	0,050362
1592	283	0,046041	318	0,050489
1719	284	0,046168	319	0,050616
1846	285	0,046295	320	0,050743
1973	286	0,046422	321	0,050871
2100	287	0,046549	322	0,050998
2227	288	0,046676	323	0,051125
2355	289	0,046803	324	0,051252
2482	290	0,046930	325	0,051379
2609	291	0,047057	326	0,051506
2736	292	0,047185	327	0,051633
2863	293	0,047312	328	0,051760
2990	294	0,047439	329	0,051887
3117	295	0,047566	330	0,052014
3244	296	0,047693	331	0,052142
3371	297	0,047820	332	0,052269
3498	298	0,047947	333	0,052396

Figura 71: Tabla de ajuste para obtener el valor del contador, respecto al t50.

Teniendo el valor de  $V_f = 0.047\text{mm/min}$ , ingresamos en la gráficas, como se muestra en la Figura 71, buscando el valor equivalente y nos dará el valor a ingresar en el contador de la máquina, que para este caso nos indica **326** y lo ingresamos, después ajustamos la velocidad de engranaje que nos indica la parte superior de las tablas que equivale a **2 (media)**, como se muestra en la siguiente Figura 72.

LA CONVERSIONE VELOCITÀ/CONTATORE CONVERSION CHART					
SELETTORE VELOCITÀ / SPEED SELECTOR		2-MEDIUM			
CONTATORE COUNTER - V	VELOCITÀ SPEED mm / min.	CONTATORE COUNTER - V	VELOCITÀ SPEED mm / min.	CONTATORE COUNTER - V	VELOCITÀ SPEED mm / min.
39940	270	0,044388	305	0,048837	340
40067	271	0,044515	306	0,048964	341
40194	272	0,044642	307	0,049091	342
40321	273	0,044770	308	0,049218	343
40448	274	0,044897	309	0,049345	344
40575	275	0,045024	310	0,049472	345
40702	276	0,045151	311	0,049599	346
40829	277	0,045278	312	0,049727	347
40956	278	0,045405	313	0,049854	348

Figura 72: Velocidad de engranaje indicado en la tabla de ajuste.

Ya una vez configurada la velocidad en la máquina de corte directo, se conecta esta misma a la toma de corriente eléctrica, posteriormente se abre el sub programa de corte directo en el programa LABview, para comprobar actividad en los sensores de movimiento, pero ahora, solo serán los que corresponden a la bandeja, Figura 73: Sensor de movimiento en la bandeja para determinar la  $\phi h$ . y al anillo de carga, Figura 74: Sensor de movimiento para determinar la carga.



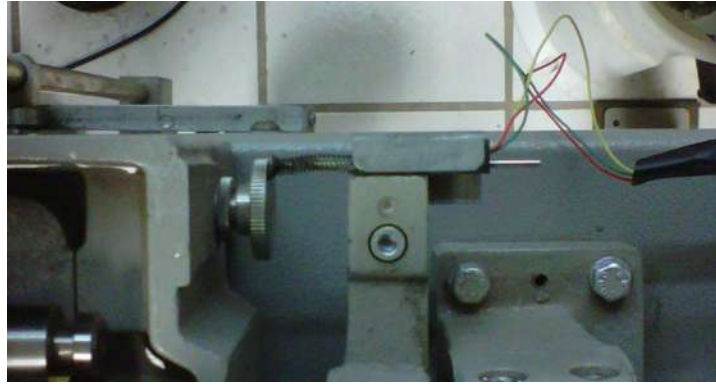


Figura 73: Sensor de movimiento en la bandeja para determinar la eh.

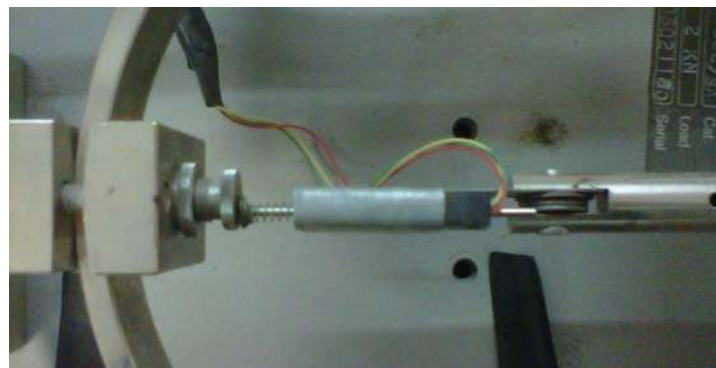


Figura 74: Sensor de movimiento para determinar la carga.

Una vez que muestren señal y que todo el equipo esté listo, nos dispondremos a fallar la muestra (en el caso de no fallarla por razones de tener nuestra muestra de control, solo nos remitiremos a obviar el siguiente procedimiento), describiendo el procedimiento que se realizó y se ajustó a lo largo de las pruebas pasadas que ayudaron a desarrollar este método.

Se giran media vuelta los tornillos de sujeción lo más exacto posible, después se giran los tornillos auxiliares la media vuelta que se giraron los tornillos de sujeción, con el propósito de levantar la placa superior lo suficiente para introducir la cuerda de guitarra metálica (MI), una vez que se introduce la cuerda entre las placas y esta a sensible movimiento toca la muestra, nos dispondremos a tensarla y jalara el extremos derecho a la vez que la tensamos en dirección del movimiento de la bandeja, mismo movimiento se repite en el lado izquierdo de la cuerda, tantas veces como sea posible y que nos permita fallar la muestra teniendo una aproximación de decir que se falla aproximadamente a la mitad, esto de decir que se llega a la mitad de la muestra es muy subjetivo, pero lo que en realidad se pretende es fallarla aproximadamente 1/3 parte de la muestra, ya que no se puede corroborar de ninguna forma cuanto se ha fallado en esta acción.

Una vez realizado la inducción de falla simplemente se retira la cuerda por uno de sus extremos y nos disponemos a retirar los tornillos de sujeción y los auxiliares (sin un orden en específico ya que no altera ninguna condición el orden de estos), ya configurada y fallada la muestra, hacemos clic en el botón de grabar del sub programa de corte Figura 75: Subprograma en LABview para captura de datos en el corte directo., y en el mismo momento en que iniciemos la prueba de corte dando ON en el control de la máquina de corte, lo hacemos al mismo tiempo en el sub programa, para que inicien al mismo tiempo lo más exactamente posible. Dejando que se produzca un desplazamiento equivalente a 5 mm.



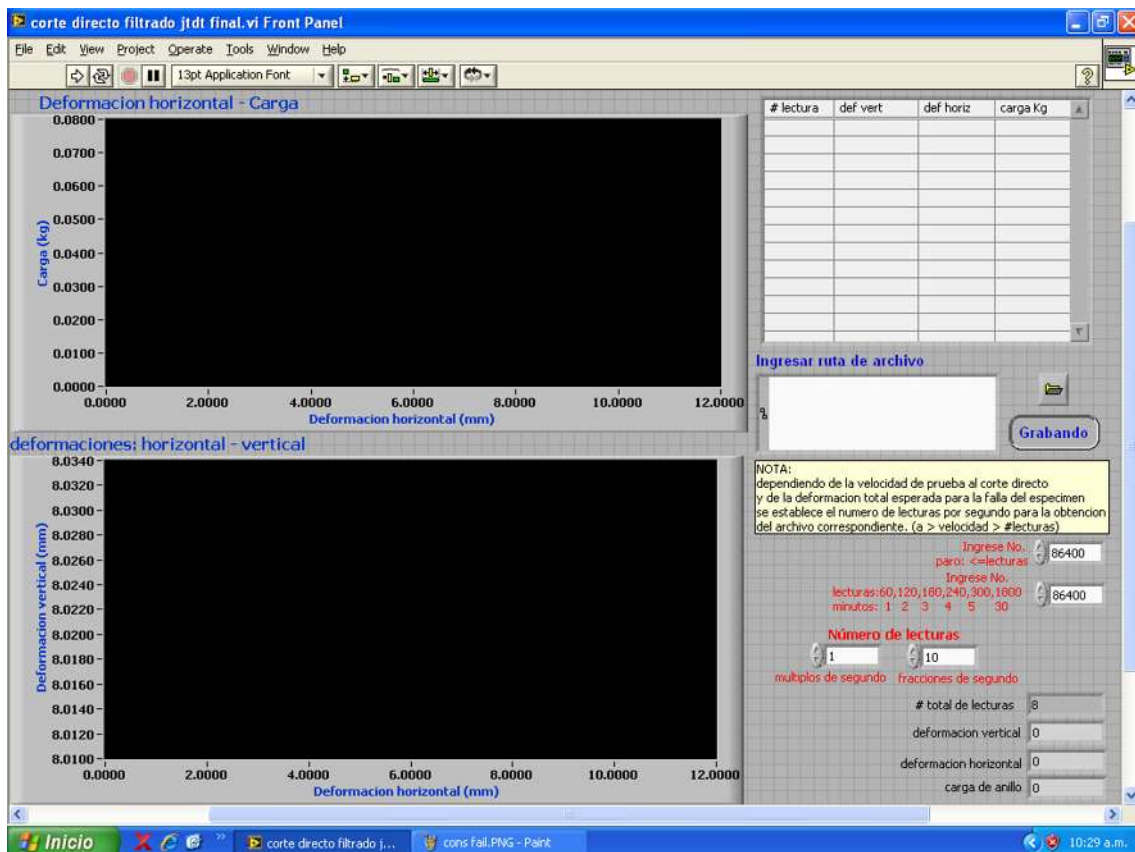


Figura 75: Subprograma en LABview para captura de datos en el corte directo.

En la Figura 75: Subprograma en LABview para captura de datos en el corte directo., anterior tenemos del lado izquierdo superior la gráfica en tiempo real de la deformación horizontal (mm), contra la carga del anillo (kg), en la misma parte izquierda pero inferior, esta la gráfica en tiempo real de la deformación horizontal (mm) contra la deformación vertical (mm), en la parte superior derecha tenemos la tabla de los valores que se guardan en la hoja de cálculo (número de lecturas, deformación vertical, deformación horizontal, carga, etc.), en la parte media derecha tenemos el botón de grabar y la casilla para ingresar la dirección donde se guardara el archivo en la computadora, debajo de el botón grabar esta el tiempo en segundos de lo que durara grabando el sub programa, en la parte derecha inferior tenemos dos casillas indicadas como número de lecturas, en la izquierda tenemos múltiplos de segundo y en la derecha fracciones de segundo, a menor número de múltiplos de segundo nos dan un menor número de lecturas por segundo y por el contrario los múltiplos un mayor número de lecturas por segundo.

O sea, como se aprecia en la imagen tenemos 1 múltiplo de segundo por 10 fracciones de segundo, por lo que tendremos mayor numero de lecturas por segundo, pero para efecto práctico de la prueba cambiamos a 10 múltiplos de segundo y a 1 fracción de segundo para tener menos lecturas por segundo en la prueba que se toma entre 40 y 50 min, por lo que no requerimos demasiadas lecturas. Este mismo procedimiento se realiza de igual forma para la muestra de control que no se falla con la cuerda, exceptuando el giro de las placas y la falla con la cuerda.

Dejamos que la máquina se desplace 5 mm, para realizar la prueba de manera acorde a los establecido y una vez terminada, se para la máquina en OFF, se detiene la grabación en el sub programa y se desmonta la muestra para ser pesada y fotografiada.



### 3.4. Resultados.

Para la correcta manipulación de datos, nos dispondremos a realizar tablas en una hoja de cálculo, donde trabajaremos datos como pesos, dimensiones, áreas, volúmenes, etc. Primero se construye una hoja de cálculo que contenga todos los datos básicos, como es peso y dimensiones de cada muestra, que posteriormente se requerirán en cálculos para determinar el esfuerzo máximo a corte de la muestra.

Muestras	Diametro φ (cm)	Altura h (cm)	Area A (cm <sup>2</sup> )	Volumen V (cm <sup>3</sup> )	Peso húmedo ini Whi (gr)	Peso húmedo fi Whf (gr)	Peso húmedo fi Wch (gr)	Peso húmedo fi Wch (gr)	Peso húmedo fi Ws+Wch (gr)	Peso húmedo fi Ws (gr)	Humedad de labnidad de prueba HI (%)	Humedad de labnidad de prueba Hp (%)
I												
1												
2												
3												
4												
total												
I.I												
1												
2												
3												
4												
total												

Figura 76: Tabla de datos básicos como pesos y dimensiones de cada muestra.

De la Figura 76: Tabla de datos básicos como pesos y dimensiones de cada muestra., anterior podemos observar que en la primera columna tenemos el número de muestras (número romano) y su correspondiente número de lecturas (número arábigo), en la segunda columna tenemos el diámetro en centímetros, que obtenemos de medir con un Vernier el diámetro de la muestra de arcilla que se labro para la prueba, en la tercera columna tenemos altura en centímetros igualmente lecturas tomadas con el Vernier a la muestra de arcilla, teniendo estas 4 lecturas se hace un promedio y posteriormente en la cuarta columna calculamos el área en centímetros cuadrados del espécimen y una vez teniendo al área y el promedio de alturas determinamos en una quinta columna el volumen en centímetros cúbicos.

Además, se pesa el espécimen recién labrado y se anota, además de anotar el peso de la charola que utilizaremos a los largo de las pruebas para restar la misma cuando pesemos la muestra después de la prueba de corte, así como secar en horno por 24hr y determinar su peso seco, con el fin de determinar su porcentaje de humedad antes de la prueba y después de la prueba, apreciadas en las últimas columnas de la figura anterior.

El espécimen que corresponde a la muestra I (romano) es la muestra que se fallara y se probara a corte, el espécimen que corresponde a la muestra I.I (romano) es la que no falláramos y será la muestra de control (referencia) y así construir dos envoltentes de falla, una corresponde a las muestra falladas y otra a las de control, con el fin de tener un parámetro que nos ayude a hacer mejor análisis de nuestras pruebas, ya que no necesariamente se requiere de estas muestras de control, pero que se convino y se hicieron para tener una visión más amplia y clara de los resultados que por primera vez se tienen en este tipo de investigación. Evidentemente se realizaron 3 pruebas con falla y 3 pruebas de referencia, asignando así el **número I y I.I a la prueba con un esfuerzo normal de 0.409kg/cm<sup>2</sup>** (en consolidación y corte), el **número II y II.I para la prueba con un esfuerzo normal de 0.614kg/cm<sup>2</sup>** (en consolidación y corte) y por último el **número III y III.I para la prueba con un esfuerzo normal de 0.818kg/cm<sup>2</sup>** (en consolidación y corte).

Cuando analizamos los datos obtenidos de la prueba de consolidación por 24hr en la máquina de corte directo, hay que aclarar que los valores son guardados en un archivo por columnas que puede ser abierto en un programa de hoja de cálculo, pero que posterior a ello se tiene que guardar en un archivo de hoja de cálculo nativo para



su manipulación, como se aprecia en la siguiente Figura 77: Muestra del archivo generado en LABview, muestra la captura de datos., nos disponemos a modificar el archivo para su manipulación como el poder etiquetar cada columna y graficar la consolidación, que corresponde en el eje de las ordenadas la deformación vertical y en el eje de las abscisas, el tiempo en segundos y escala logarítmica, en la Figura 78: Muestra del archivo modificado para consolidación., se aprecia cómo se modifico el archivo, en la primer columna corresponde al tiempo en segundos y la tercer columna corresponde a la deformación vertical en milímetros.

```

LabVIEW Measurement
Writer_Versi      0.92
Reader_Vers       1
Separator         Tab
Multi_Head       No
X_Columns         One
Time_Pref         Absolute
Operator          Administrador
Date              06/06/2011
Time              15:50.5
***End_of_Header***

Channels          4
Samples           1      1      1      1
Date              06/06/2011 06/06/2011 06/06/2011 06/06/2011
Time              15:50.7  15:50.7  15:50.7  15:50.7
X_Dimension      Time      Time      Time      Time
X0                0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
Delta_X           1        1        1        1
***End_of_Header***
X_Value           Untitled  Untitled 1  Untitled 2  Untitled 3  Comment
0                 1      8.240494  0.004124  0.057173
0.21875           2      8.191061  0.004883  0.03825
0.375             3      8.183937  0.004395  0.028788
0.46875           4      8.179151  0.004829  0.052442
0.5625            5      8.174909  0.004069  0.071365
    
```

Figura 77: Muestra del archivo generado en LABview, muestra la captura de datos.



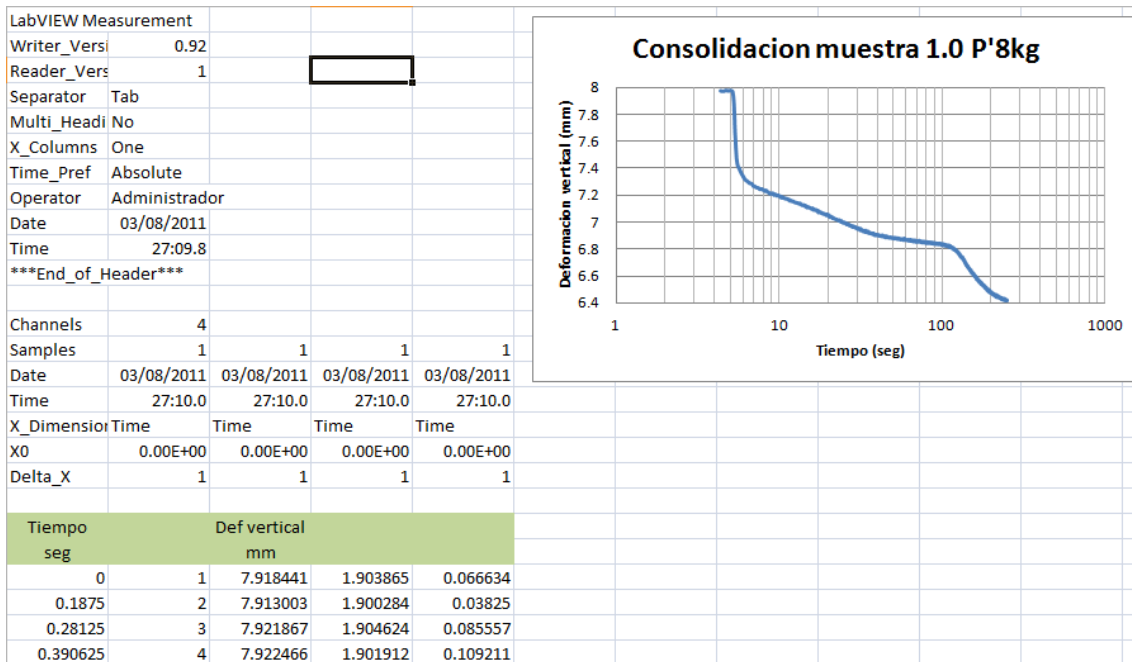


Figura 78: Muestra del archivo modificado para consolidación.

Continuando con la manipulación de datos, tenemos al archivo generado de la prueba de corte directo que se muestra en la siguiente Figura 79: Muestra del archivo modificado para prueba de corte., donde en la primera columna tenemos el tiempo (t) en segundos en la segunda columna tenemos el número de lecturas (lec), en la tercera columna tenemos la deformación vertical ( $\epsilon_v$ ) en milímetros, en la cuarta columna tenemos la deformación horizontal ( $\epsilon_h$ ) en milímetros, en la quinta columna tenemos la carga del anillo en kilogramos, como datos base, o sea, los datos que obtenemos del archivo original por columnas del LABview.

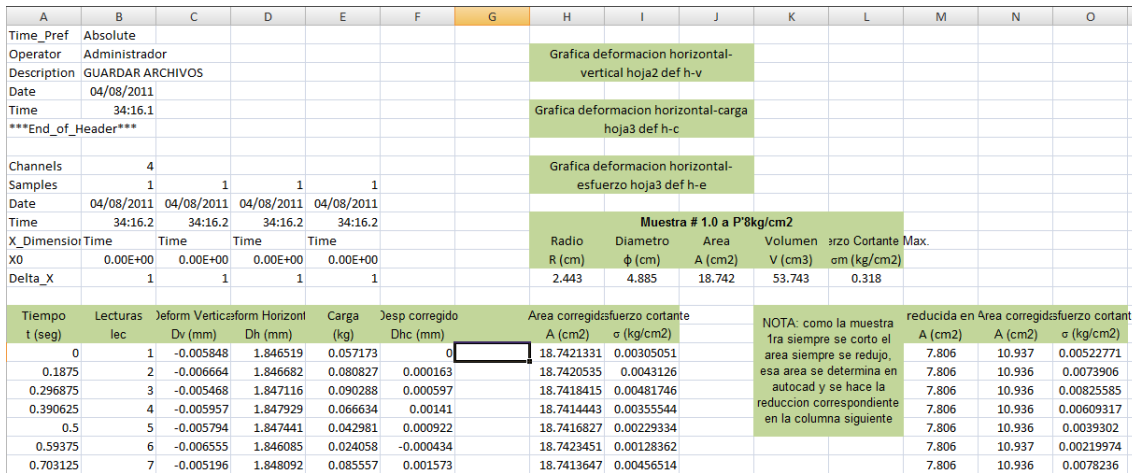


Figura 79: Muestra del archivo modificado para prueba de corte.

Hay que hacer una corrección por desplazamiento ( $\epsilon_{hc}$ ) de ahí que tomamos la primer columna del  $\epsilon_h$  y le restamos la misma, para partir de cero, en el siguiente renglón sacamos la diferencia entre la lectura del desplazamiento 2 y la del desplazamiento 1 y sumamos la corrección anterior, para tener progresivamente el  $\epsilon_{hc}$  en milímetros.

Tomando en cuenta el hecho de que las placas dejaran de estar perfectamente alineadas con respecto a su centro hueco, lo que producirá en su interior, que el área



entre las placas deje de ser circular y por lo tanto para la muestra de arcilla de igual manera dejara de ser circular y se convertirá en un área elíptica que se irá reduciendo conforme el desplazamiento horizontal avance en el tiempo, como se puede apreciar en la siguiente Figura 80: Diferencia de áreas entre las placas, cuando se desplaza en la prueba de corte.

Es por tal motivo que hay que introducir una ecuación que nos corrija el área y que sea una ecuación que involucre una elipse, resultado la siguiente ecuación:

$$2R^2 * \arccos((\epsilon hc / 10) / \Phi) - \epsilon hc * R * \sin(\arccos((\epsilon hc / 10) / \Phi))$$

**Ecuación 24: Corrección del área circular respecto de una elipse.**

Sabiendo que se toma en cuenta el  $\epsilon hc$  respecto al tiempo, el área corregida será igualmente respecto al tiempo y así sucesivamente hasta corregir la última lectura, una vez corregida el área, podemos calcular el esfuerzo cortante en ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) tomando la carga del anillo ( $\text{kg}$ ) y dividiéndola entre el área corregida ( $\text{cm}^2$ ).

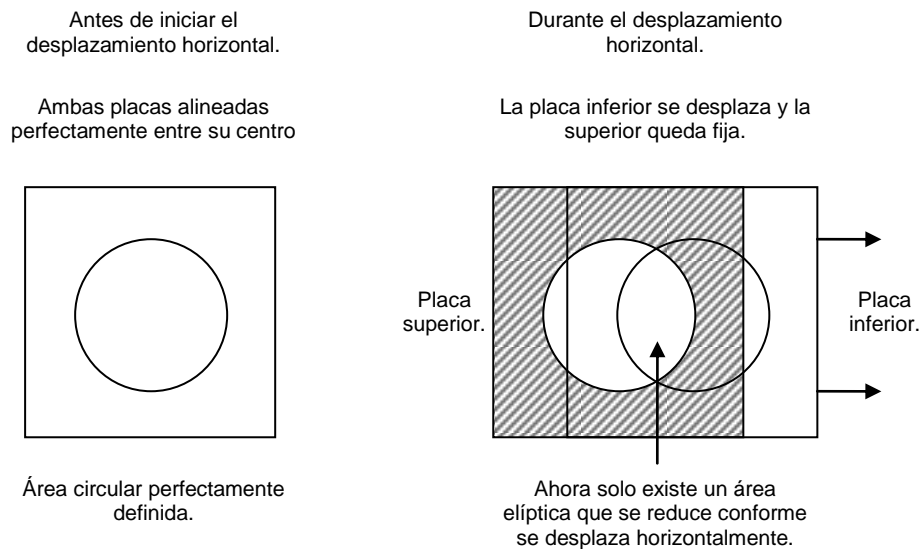
Existe otro punto muy importante a consideración de los cálculos y que corresponde al área en la que indujimos la falla, esta área es superficialmente liza con un coeficiente de fricción muy bajo (tendiendo a cero y ser despreciable), por lo tanto existe otra corrección por hacer en este apartado.

Lo primero en consideración es tomar una fotografía de la muestra, una vez terminada la prueba teniendo como prioridad dos aspectos esenciales, el primero es al tomar la foto hay que centrar el objetivo, en este caso, es que la imagen quede centrada con respecto a la muestra de arcilla y el segundo aspecto es que al tomar la foto hay que tener nivelada la cámara con respecto a una horizontal, para que no existan ángulos de cámara que distorsionen la proporción de la imagen y no altere el resultado esperado.

Las imágenes se importan en un programa tipo CAD (diseño asistido por computadora, en inglés), para escalar a un círculo de diámetro conocido y así poder determinar su área, el área que visiblemente esta fallada. Una vez teniendo al área corregida y el área fallada, hacemos otra corrección es determinar la diferencia entre estas y así obtener el área real que está desarrollando el esfuerzo.

Obtenida el área real y la carga del anillo, podemos determinar el esfuerzo, para cada lectura, como se puede apreciar en la última columna de la Figura 79: Muestra del archivo modificado para prueba de corte., una vez determinado el esfuerzo de cada lectura, nos disponemos a determinar el esfuerzo máximo, que finalmente es el dato que nos permitirá construir la envolvente de falla.





**Figura 80: Diferencia de áreas entre las placas, cuando se desplaza en la prueba de corte.**

Determinados así las 6 muestras que se establecen desde un principio, podemos construir una tabla de resultados finales que nos permitirán graficar el envolvente de falla de nuestra arcilla (CH).

En la parte superior de Figura 81: Tabla concentradora de los esfuerzos, en programa de cálculo., introducimos los valores de los esfuerzos máximos correspondientes a la muestra I y I.I, II y II.I, III y III.I, respectivamente en muestra #1 a 8kg ( $0.409\text{kg/cm}^2$ ), #2 a 12kg ( $0.614\text{kg/cm}^2$ ) y #3 a 16kg ( $0.818\text{kg/cm}^2$ ) y después en la parte media tenemos la fuerza normal y que dividimos entre el área nominal (área circular de las placas) y obtenemos el esfuerzo correspondiente para dejar la gráfica en términos de esfuerzo, y por último en la parte inferior indicamos para graficar, en el eje de las ordenadas el esfuerzo cortante máximo y en el eje de las abscisas el esfuerzo normal y obtenemos el ángulo de tendencia de los tres puntos para la envolvente de la muestra fallada y de la de control.



Muestra # 0 a 4kg	Muestra # 1 a 8kg	Muestra # 2 a 12kg	Muestra # 3 a 16kg
Esfuerzo Cortante Max. $\sigma_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante Max. $\sigma_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante Max. $\sigma_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante Max. $\sigma_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
-	0.318	0.500	0.685
control X.1	0.474	0.512	0.569
Fuerza Normal a 4kg	Fuerza Normal a 8kg	Fuerza Normal a 12kg	Fuerza Normal a 16kg
4	8	12	16
	Area Nominal cm <sup>2</sup>		
	19.556		
Esfuerzo N a 4kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo N a 8kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo N a 12kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo N a 16kg/cm <sup>2</sup>
0.205	0.409	0.614	0.818
	<b>x</b>	<b>y</b>	<b>gulo/tenden</b>
	0.205	-	$\phi$ (°)
	0.409	0.318	41.861
	0.614	0.500	0.474
	0.818	0.685	0.512
			0.569
	Grafica de la envolvente de falla esta en la hoja3		
	(esf c-n)		

Figura 81: Tabla concentradora de los esfuerzos, en programa de cálculo.

A continuación se presentaran los resultados de la primera muestra I y I.I para la prueba consolidada no drenada (CU) y posteriormente II y II.I y por ultimo III y III.I y para finalizar los respectivos a la prueba (CD).



### 3.4.1. Resultados de la prueba CU.

Para presentar estos resultados solo haremos una breve descripción y resumen de los mismos, pero que posteriormente en el anexo H, se podrán consultar con mayor detenimiento en tablas completas de resultados.

- Prueba CU para la muestra I y I.I de esfuerzo normal  $0.409\text{kg/cm}^2$ .

Como se menciona con anterioridad disponemos de tomar los datos más básicos y con ellos construir una hoja de cálculo que nos permita posteriormente utilizar estos, en el cálculo de la envolvente de falla del esfuerzo máximo, para la **muestra I** se obtuvieron los datos siguientes que posteriormente se muestran en la Tabla 4 con sus valores correspondientes, teniendo un promedio en el diámetro y un promedio en la altura, posteriormente se calcula el área, calculado después el volumen, de igual forma se pesa la muestra antes y después de la prueba para una vez que se seque al horno por 24hr determinar su peso seco y con ello obtener la humedad de la muestra antes y después de la prueba, el valor obtenido antes de la prueba es humedad de labrado y el valor después de la prueba es humedad de prueba.

$\Phi$ (cm)	h (cm)	A ( $\text{cm}^2$ )	V ( $\text{cm}^3$ )	HI (%)	Hp (%)
4.885	2.868	18.742	53.743	41.887	59.990

Tabla 4: Datos generales de la muestra I, CU.

La deformación vertical presente en la muestra I, cuando se produjo la consolidación por 24hr, es de  $\varepsilon_v = 1.6$  mm.

La prueba de corte directo nos arroja que el desplazamiento horizontal corregido que resulta de restar el primer valor a sí mismo, para comenzar de cero y el siguiente  $\varepsilon_{hc}$  es la diferencia del segundo valor  $\varepsilon_h$  y el primer valor  $\varepsilon_h$  mas el valor de anterior de  $\varepsilon_{hc}$  corregido (debería ser a los 5 mm, pero se determino innecesario llegar hasta ese desplazamiento, ya que el resultado no se ve afectado en ningún sentido y la prueba fue exitosa, siendo así se hace la suposición en los cálculos del  $t_{50}$  que si llego a la marca). Además de obtenerse la carga del anillo máxima, se calculó el  $A_c^*$  fue un corrección previa, ya que posteriormente se tuvo que hacer la reducción de área ( $A_r$ ) y una nueva corrección de área para así determinar el esfuerzo cortante máximo real.

Dhc $\varepsilon_{hc}$ (mm)	$W_{a_m}$ (kg)	$A_c^*$ ( $\text{cm}^2$ )	$\tau_m^*$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$A_r$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_c$ ( $\text{cm}^2$ )	$\tau_m$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\sigma_n$ ( $\text{kg/cm}^2$ )
2.764	3.340	18.742	0.182	7.806	10.937	<b>0.318</b>	<b>0.409</b>

Tabla 5: Datos de la prueba de corte en la muestra I, CU.

Nota: cuando se calcula el área corregida con la ecuación 20 se hace el cambio de unidades del  $\varepsilon_{hc}$  de mm a cm, para uniformizar unidades y en el caso del valor del  $A_c^*$ ,  $A_c$ , y  $\tau_m^*$  solo se tomo el primer valor como valor representativo.



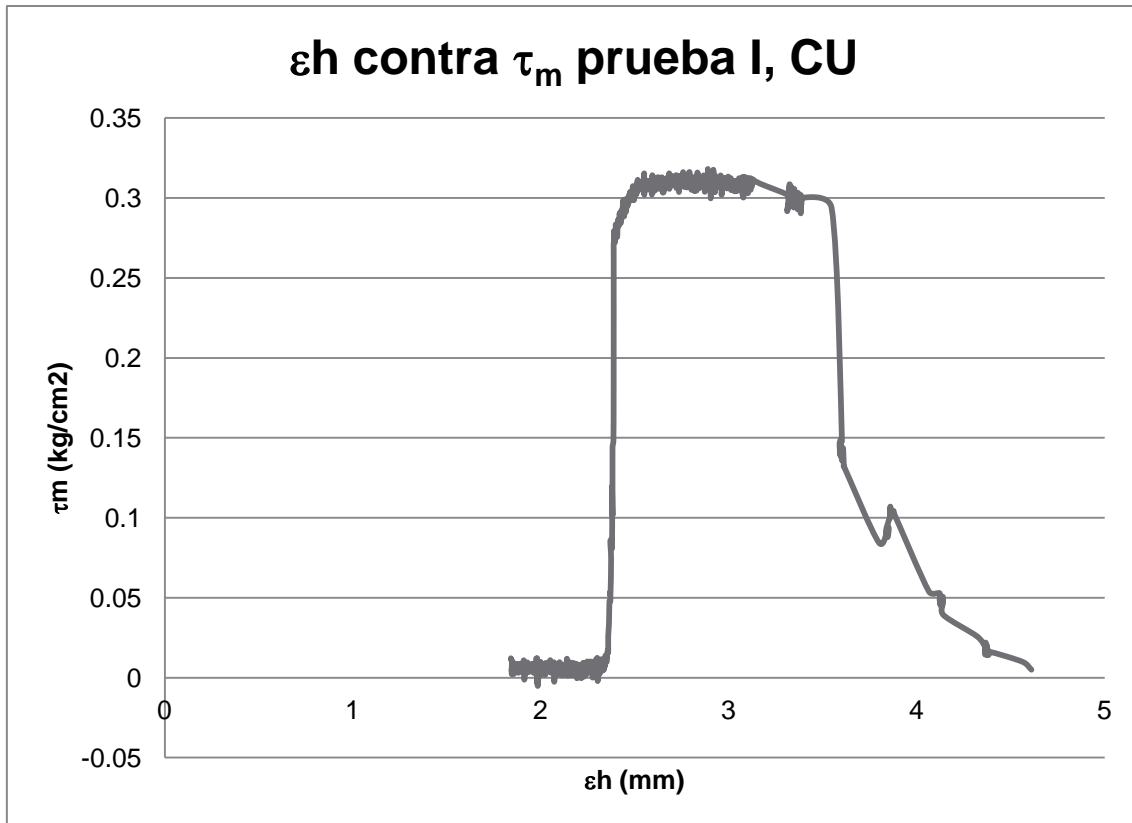


Figura 82: Esfuerzo deformación prueba I, CU.

Para la **muestra de referencia I.I** tenemos un promedio en el diámetro y un promedio en la altura, calculando el área y después el volumen, de igual forma se pesa la muestra antes y después de la prueba para una vez que se seque al horno por 24hr determinar su peso seco y con ello obtener la humedad de la muestra antes y después de la prueba, el valor obtenido antes de la prueba es humedad de labrado y humedad de prueba, en este caso las humedades se dispararon alrededor de 5 unidades porcentuales, pero que no afectan significativamente el resultado de la prueba.

Muestra	Φ (cm)	h (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	HI (%)	Hp (%)
I.I	4.870	3.320	18.627	61.842	38.134	52.420

Tabla 6: Datos generales para prueba I.I, CU.

La deformación vertical presente en la muestra I.I, cuando se produjo la consolidación por 24hr, es de  $\epsilon_v = 1.1$  mm.

La prueba de corte directo nos arroja que el desplazamiento horizontal máximo (y nuevamente, aunque debería ser a 5 mm, pero se determino irrelevante sobrepasar la marca, ya que el resultado no se ve afectado en ningún sentido y la prueba fue exitosa, siendo así se hace la suposición en los cálculos del  $t_{50}$  que si llego a la marca). Se obtiene el  $\epsilon_{hc}$ , así como la carga máxima en el anillo, la área reducida ( $A_r$ ) corresponde a  $A_r = 0$  cm<sup>2</sup> (ya que esta por ser la muestra de referencia no se indujo falla y por lo tanto no se redujo el área) y el valor del esfuerzo cortante máximo así como su esfuerzo normal.

Dhc εhc (mm)	W <sub>m</sub> (kg)	A <sub>c</sub> (cm <sup>2</sup> )	τ <sub>m</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	σ <sub>n</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )
6.025	8.596	18.627	<b>0.474</b>	<b>0.409</b>

Tabla 7: Datos de la prueba de corte en I.I, CU.



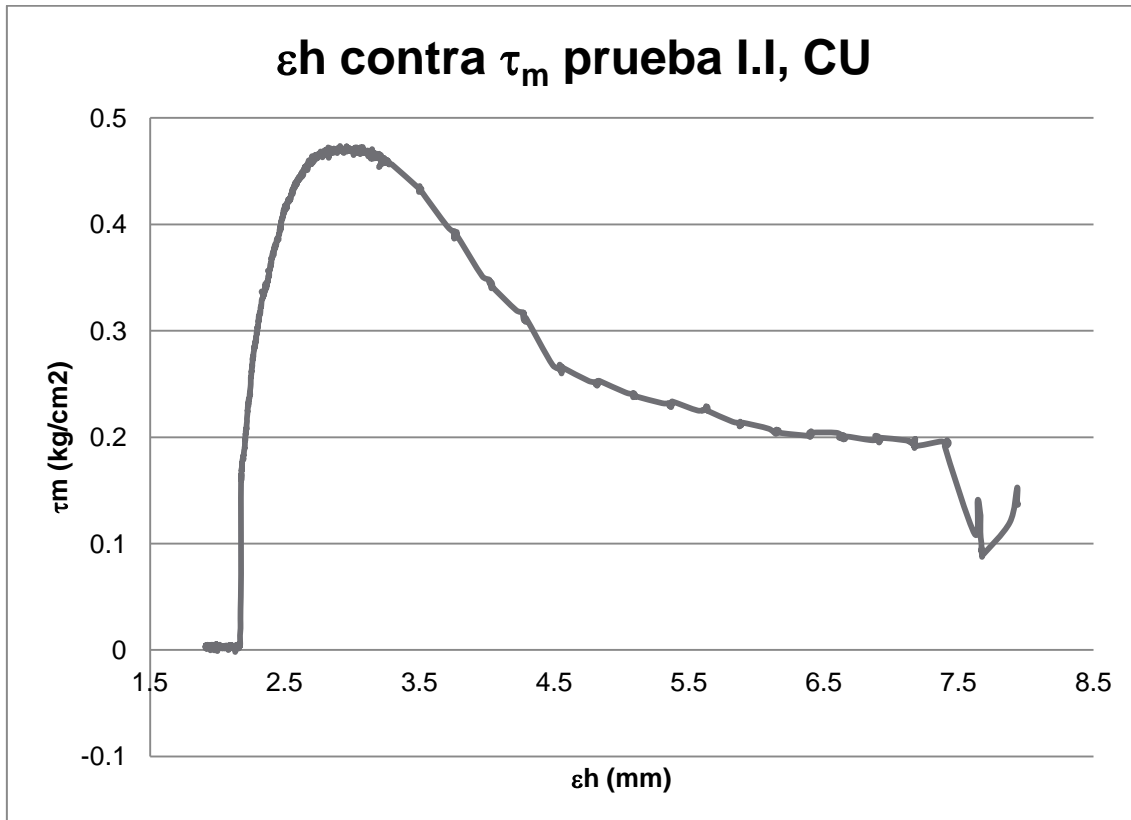


Figura 83: Esfuerzo deformación prueba I.I, CU.

- Prueba CU para la muestra II y II.I de esfuerzo normal 0.614kg/cm<sup>2</sup>.

Continuando con las pruebas ahora tomamos los datos más básicos de la segunda ronda y con ellos construiremos una hoja de cálculo que nos permita posteriormente utilizar estos, en el cálculo de la envolvente de falla del esfuerzo máximo, para la **muestra II** teniendo un promedio en el diámetro y un promedio en la altura, calculando el área y después el volumen, de igual forma se pesa la muestra antes y después de la prueba para una vez que se seque al horno por 24hr determinar su peso seco y con ello obtener la humedad de la muestra antes y después de la prueba, el valor obtenido antes de la prueba es humedad de labrado y humedad de prueba.

Φ (cm)	h (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	HI (%)	Hp (%)
4.960	3.018	19.322	58.304	41.274	54.898

Tabla 8: Datos generales prueba II, CU.

La deformación vertical presente en la muestra II, cuando se produjo la consolidación por 24hr, es de εv = 1.4 mm.

La prueba de corte directo nos arroja que el desplazamiento horizontal corregido (se termino antes de los 5 mm, con una pequeña diferencia en el desplazamiento, el resultado no se ve afectado en ningún sentido y la prueba fue exitosa, siendo así se hace la suposición en los cálculos del t<sub>50</sub> que si llego a la marca).

Dhc εhc (mm)	Wam (kg)	Ac* (cm <sup>2</sup> )	τm* (kg/cm <sup>2</sup> )	Ar (cm <sup>2</sup> )	Ac (cm <sup>2</sup> )	τm (kg/cm <sup>2</sup> )	σn (kg/cm <sup>2</sup> )
3.694	5.691	19.322	0.307	7.145	12.177	<b>0.500</b>	<b>0.614</b>

Tabla 9: Datos de la prueba de corte en II, CU.



Nota: cuando se calcula el área corregida con la ecuación 20 se hace el cambio de unidades del  $\epsilon_{hc}$  de mm a cm, para uniformizar unidades y en el caso del valor del  $A_{c^*}$ ,  $A_c$ , y  $\tau_m^*$  solo se tomo el primer valor como valor representativo.

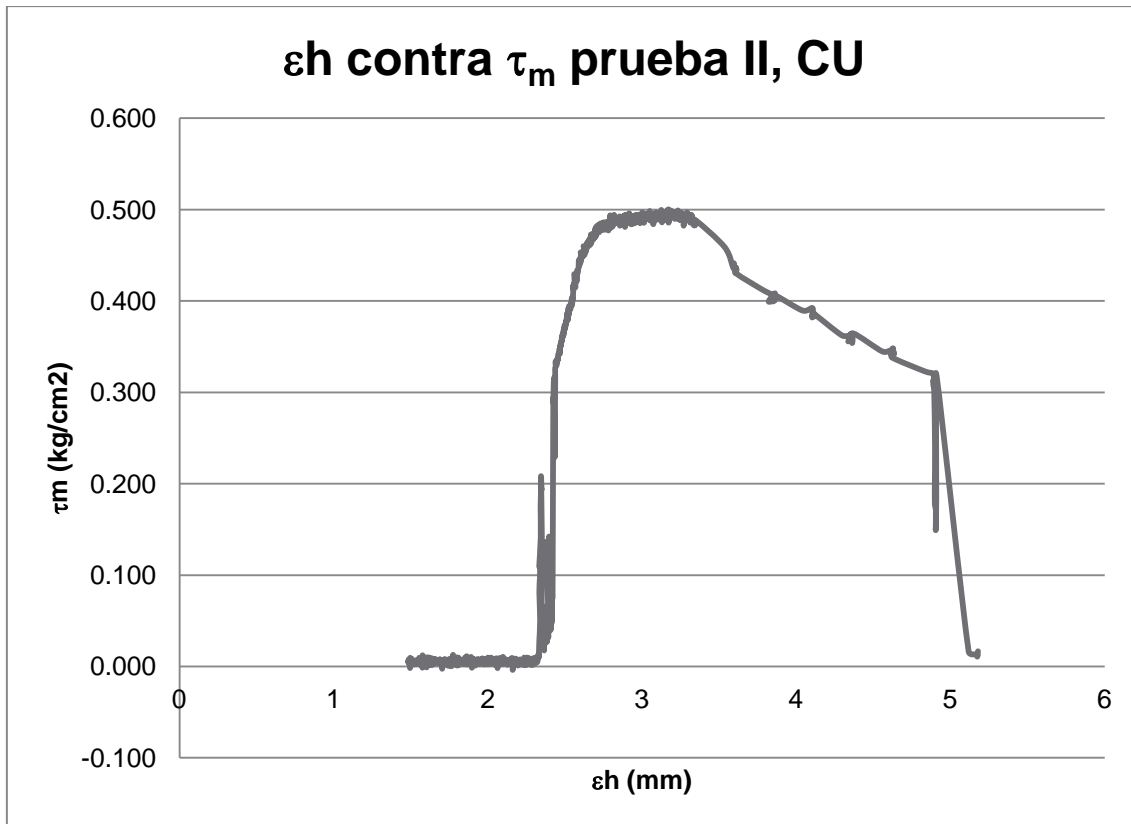


Figura 84: Esfuerzo deformación prueba II, CU.

Para la **muestra de referencia II.I** obtenemos nuevamente un promedio en el diámetro y un promedio en la altura así como el volumen, de igual forma se pesa la muestra antes y después de la prueba para una vez que se seque al horno por 24hr determinar su peso seco y con ello obtener la humedad de la muestra antes y después de la prueba, el valor obtenido antes de la prueba es humedad de labrado y humedad de prueba.

$\Phi$ (cm)	h (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	HI (%)	Hp (%)
4.973	2.903	19.420	56.365	39.818	55.650

Tabla 10: Datos generales prueba II.I, CU.

La deformación vertical presente en la muestra II.I producto de su consolidación por 24hr, es de  $\epsilon_v = 5$  mm.

Como en las pruebas anteriores obtenemos el desplazamiento horizontal corregido (fue a 5 mm, en esta ocasión si se llego a la marca). Así como la carga máxima en el anillo, al área reducida ( $A_r$ ) corresponde a  $A_r = 0$  cm<sup>2</sup> (ya que esta por ser la muestra de referencia no se indujo falla) y el valor del esfuerzo cortante máximo el esfuerzo normal.

Dhc $\epsilon_{hc}$ (mm)	$W_{a_m}$ (kg)	$A_c$ (cm <sup>2</sup> )	$\tau_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kg/cm <sup>2</sup> )
5.001	9.608	19.419	<b>0.512</b>	<b>0.614</b>

Tabla 11: Datos de la prueba de corte en II.I, CU.



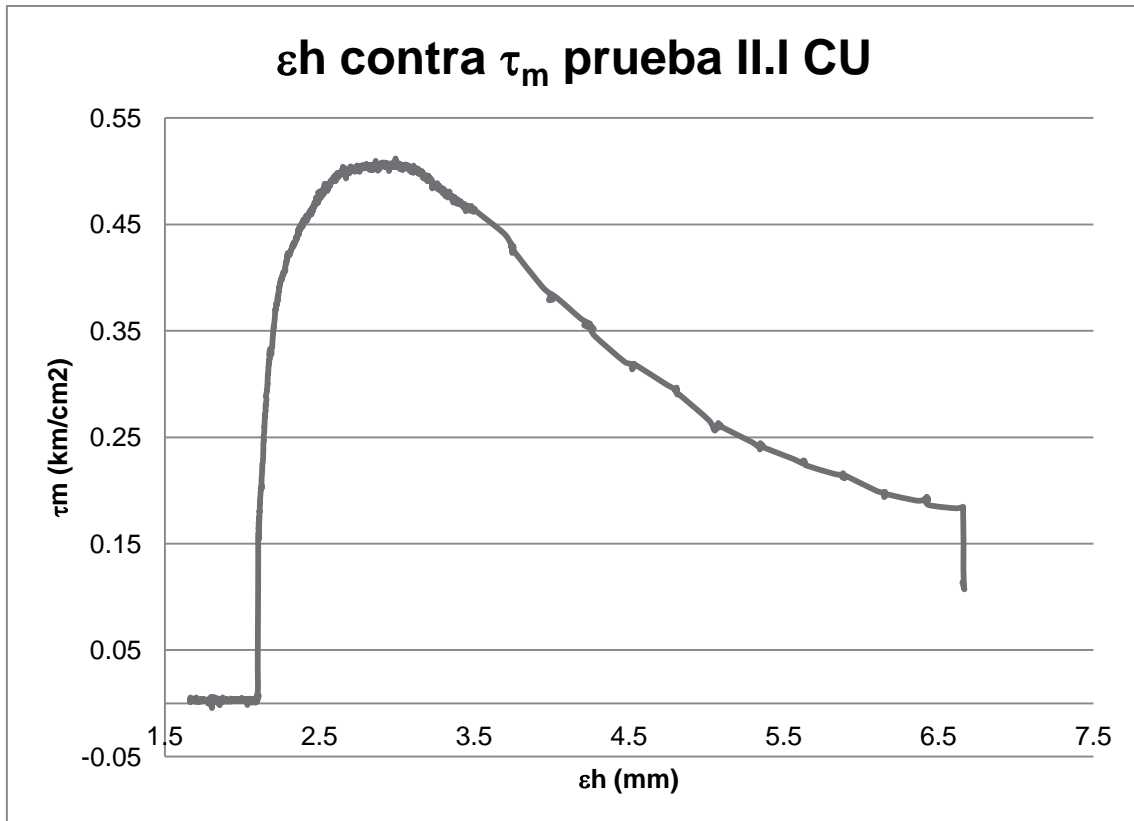


Figura 85: Esfuerzo deformación prueba II.I, CU.

- Prueba CU para la muestra III y III.I de esfuerzo normal 0.818kg/cm<sup>2</sup>.

Continuando con las pruebas ahora tomamos los datos más básicos de la segunda ronda y con ellos construiremos una hoja de cálculo que nos permita posteriormente utilizar estos, en el cálculo de la envolvente de falla del esfuerzo máximo, para la **muestra III**, promedio en el diámetro un promedio en la altura, para posteriormente calcular el área y después el volumen, de igual forma se pesa la muestra antes y después de la prueba para una vez que se seque al horno por 24hr determinar su peso seco y con ello obtener la humedad de labrado y humedad de prueba.

Φ (cm)	h (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	HI (%)	Hp (%)
4.968	2.933	19.381	56.833	42.781	56.181

Tabla 12: Datos generales prueba III, CU.

La deformación vertical presente en la muestra III, cuando se produjo la consolidación por 24hr, es de  $\epsilon_v = 1$  mm.

La prueba de corte directo nos arroja que el desplazamiento horizontal corregido (ahora es un poco mas de 5 mm, con una pequeña diferencia un poco mayor en el desplazamiento, el resultado no se ve afectado en ningún sentido y la prueba fue exitosa, siendo así se hace la suposición en los cálculos del  $t_{50}$  que si llego a la marca). Y se obtiene el resto de las variables como se aprecia en la Tabla 13.

Dhc εhc (mm)	W <sub>a<sub>m</sub></sub> (kg)	Ac* (cm <sup>2</sup> )	τ <sub>m</sub> * (kg/cm <sup>2</sup> )	Ar (cm <sup>2</sup> )	Ac (cm <sup>2</sup> )	τ <sub>m</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	σ <sub>n</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )
6.334	11.571	19.381	0.621	1.727	17.654	<b>0.685</b>	<b>0.818</b>

Tabla 13: Datos de la prueba de corte en III, CU.



Nota: cuando se calcula el área corregida con la ecuación 20 se hace el cambio de unidades del  $\epsilon_{hc}$  de mm a cm, para uniformizar unidades y en el caso del valor del  $A_c^*$ ,  $A_c$ , y  $\tau_m^*$  solo se tomo el primer valor como valor representativo.

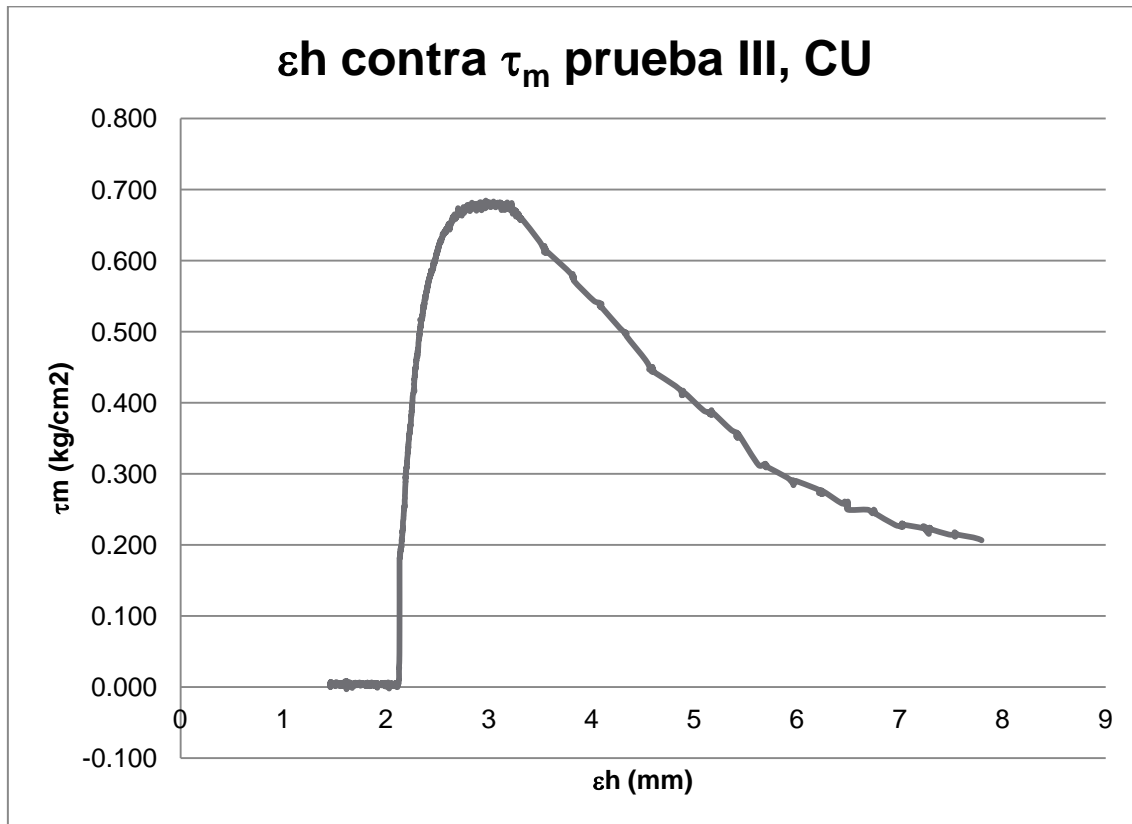


Figura 86: Esfuerzo deformación prueba III, CU.

Para la **muestra de referencia III.I** obtenemos un promedio, como en las otras pruebas un promedio del diámetro y un promedio en la altura, calculamos el área y después el volumen, además de pesar la muestra antes y después de la prueba para una vez que se seque al horno por 24hr determinar su peso seco y con ello obtener la humedad de la muestra antes y después de la prueba, el valor obtenido antes de la prueba es humedad de labrado y el valor después de la prueba es humedad de prueba.

$\Phi$ (cm)	h (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	HI (%)	Hp (%)
4.945	2.955	19.205	56.752	42.187	56.616

Tabla 14: Datos generales prueba III.I, CU.

Para la muestra III.I la deformación vertical producto de su consolidación por 24hr, es de  $\epsilon_v = 1.1$  mm.

La prueba de corte directo nos arroja que el desplazamiento horizontal corregido (aunque debería ser a 5 mm, el recorrido fue mayor al especificado, el resultado no se ve afectado en ningún sentido y la prueba fue exitosa, siendo así se hace la suposición en los cálculos del  $t_{50}$  que si llegó a la marca). Con su carga máxima en el anillo correspondiente, al área reducida ( $A_r$ ) corresponde a  $A_r = 0$  cm<sup>2</sup> (ya que esta por ser la muestra de referencia no se indujo falla) y se obtuvieron los valores correspondientes de esfuerzo cortante máximo y normal.



Dhc εhc (mm)	Wam (kg)	Ac (cm <sup>2</sup> )	τm (kg/cm <sup>2</sup> )	σn (kg/cm <sup>2</sup> )
7.373	10.436	19.205	<b>0.569</b>	<b>0.818</b>

Tabla 15: Datos de la prueba de corte en III.I, CU.

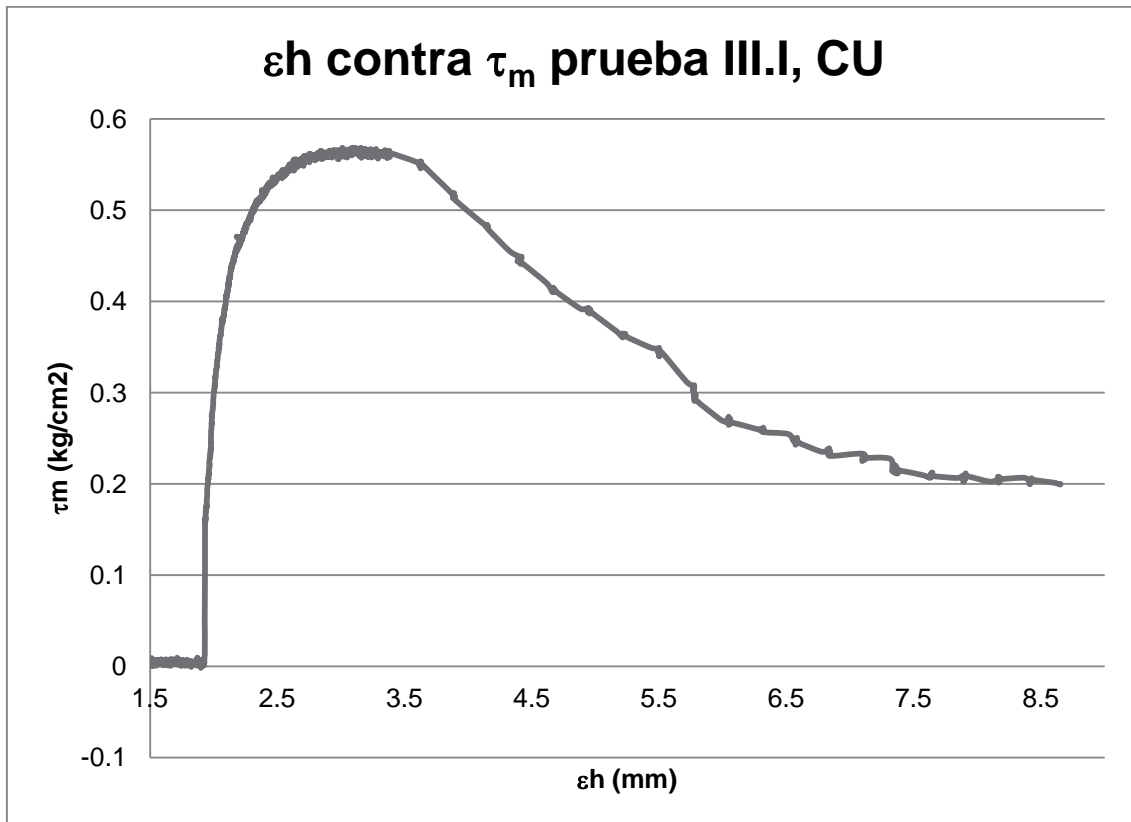


Figura 87: Esfuerzo deformación prueba III.I, CU.

Haciendo un resumen de esfuerzos cortantes máximos se obtiene las siguientes tablas: Tabla 16 y Tabla 17, con las cuales podemos graficar y obtener las envolventes de falla de los esfuerzos cortantes máximos y esfuerzos normales, como se puede ver en la Figura 88, y que se analizara en el capítulo 4.

Muestra	τm (kg/cm <sup>2</sup> )	σn (kg/cm <sup>2</sup> )
I	0.318	0.409
II	0.500	0.614
III	0.685	0.818

Tabla 16: Resumen de esfuerzos cortantes máximos en muestras con grieta, CU.

Muestra	τm (kg/cm <sup>2</sup> )	σn (kg/cm <sup>2</sup> )
I.I	0.474	0.409
II.I	0.512	0.614
III.I	0.569	0.818

Tabla 17: Resumen de esfuerzos cortantes máximos en muestras sin grieta, CU.

Ángulo φ (°) de tendencia de falla I, II y III	Ángulo φ (°) de tendencia de falla I.I, II.I y III.I
41.861	13.068

Tabla 18: Ángulos de tendencia de las envolventes de falla, CU.



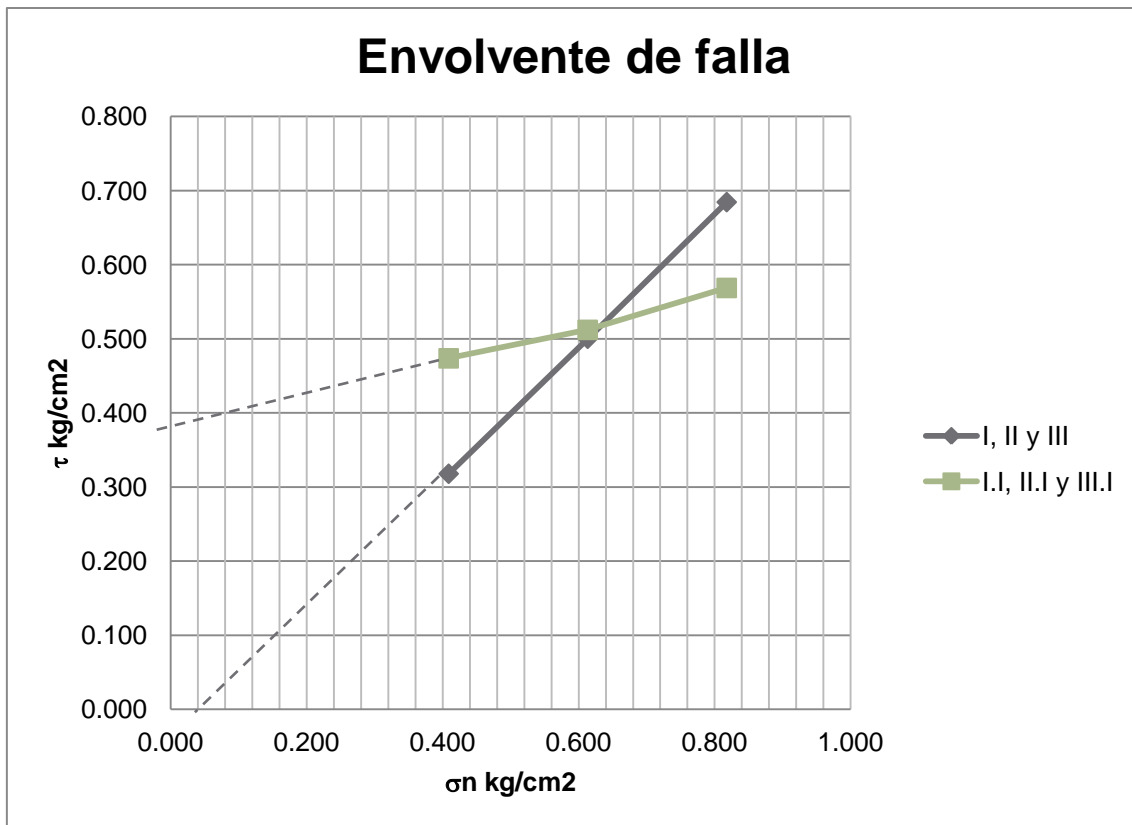


Figura 88: Envolvente de falla de esfuerzos para pruebas con grieta y sin grieta CU.



### 3.4.2. Resultados de la prueba CD.

Para presentar estos resultados solo haremos una breve descripción como en el caso anterior y resumen de los mismos, pero que posteriormente en el anexo H, se podrán consultar con mayor detenimiento en tablas completas de resultados.

- Prueba CD para la muestra I y I.I de esfuerzo normal  $0.409\text{kg/cm}^2$ .

Como se menciona con anterioridad disponemos de tomar los datos más básicos y con ellos construir una hoja de cálculo que nos permita posteriormente utilizar estos, en el cálculo de la envolvente de falla del esfuerzo máximo, para la **muestra I** teniendo un promedio en el diámetro, altura, calculando el área y el volumen y humedades de labrado y de prueba.

$\Phi$ (cm)	h (cm)	A ( $\text{cm}^2$ )	V ( $\text{cm}^3$ )	HI (%)	Hp (%)
4.923	2.903	19.031	55.237	42.456	57.448

Tabla 19: Datos generales prueba I, CD.

La deformación vertical presente en la muestra I, cuando se produjo la consolidación por 24hr, es de  $\epsilon_v = 1.2$  mm.

La prueba de corte directo nos arroja que el desplazamiento horizontal corregido (es de 5 mm, siendo así se hacen los cálculos del  $t_{50}$ ). También, se hacen los cálculos de carga máxima en el anillo, al área reducida ( $A_r$ ), esfuerzo máximo y esfuerzo normal.

Dhc $\epsilon_{hc}$ (mm)	$W_{a_m}$ (kg)	$A_{c^*}$ ( $\text{cm}^2$ )	$\tau_{m^*}$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$A_r$ ( $\text{cm}^2$ )	$A_c$ ( $\text{cm}^2$ )	$\tau_m$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\sigma_n$ ( $\text{kg/cm}^2$ )
5.075	5.156	19.031	0.277	6.246	12.785	<b>0.417</b>	<b>0.409</b>

Tabla 20: Datos de la prueba de corte en I, CD.

Nota: cuando se calcula el área corregida con la ecuación 20 se hace el cambio de unidades del  $\epsilon_{hc}$  de mm a cm, para uniformizar unidades y en el caso del valor del  $A_{c^*}$ ,  $A_c$ , y  $\tau_{m^*}$  solo se tomo el primer valor como valor representativo.



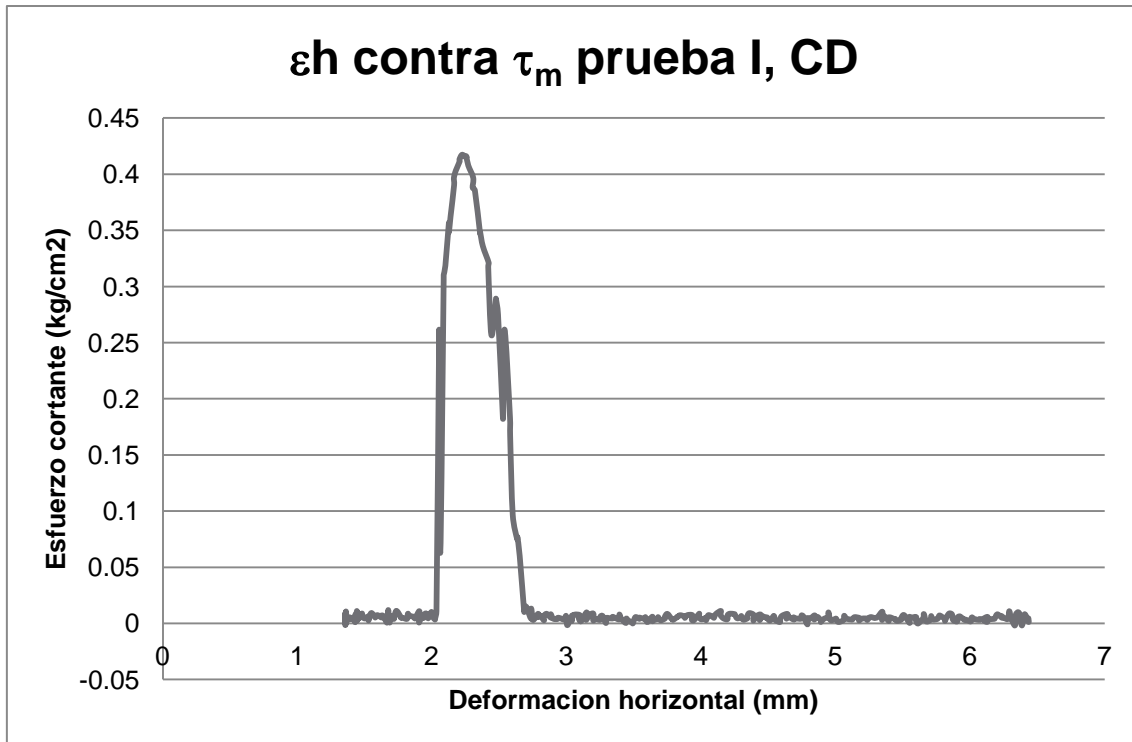


Figura 89: Esfuerzo deformación prueba I, CD.

Para la **muestra de referencia I.I** tenemos un promedio en el diámetro y un promedio en la altura, calculando el área y después el volumen, de igual forma se determina la humedad de labrado y humedad de prueba.

$\Phi$ (cm)	h (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	HI (%)	Hp (%)
4.860	3.183	18.551	59.038	41.349	56.747

Tabla 21: Datos generales prueba I.I, CD.

Y para la muestra I.I la deformación vertical producto de su consolidación por 24hr, es de  $\epsilon_v = 0.6$  mm.

La prueba de corte directo obtenemos un desplazamiento horizontal corregido (casi 5 mm, siendo así se hacen los cálculos del  $t_{50}$ ). Se calcula la carga máxima en el anillo, al área reducida ( $A_r$ ) corresponde a  $A_i = 0$  cm<sup>2</sup> (ya que esta por ser la muestra de referencia no se indujo falla) y los valores del esfuerzo máximo y esfuerzo normal.

Dhc $\epsilon_{hc}$ (mm)	$W_{a_m}$ (kg)	$A_c$ (cm <sup>2</sup> )	$\tau_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kg/cm <sup>2</sup> )
5.147	3.785	18.851	<b>0.212</b>	<b>0.409</b>

Tabla 22: Datos de la prueba de corte en I.I, CD.



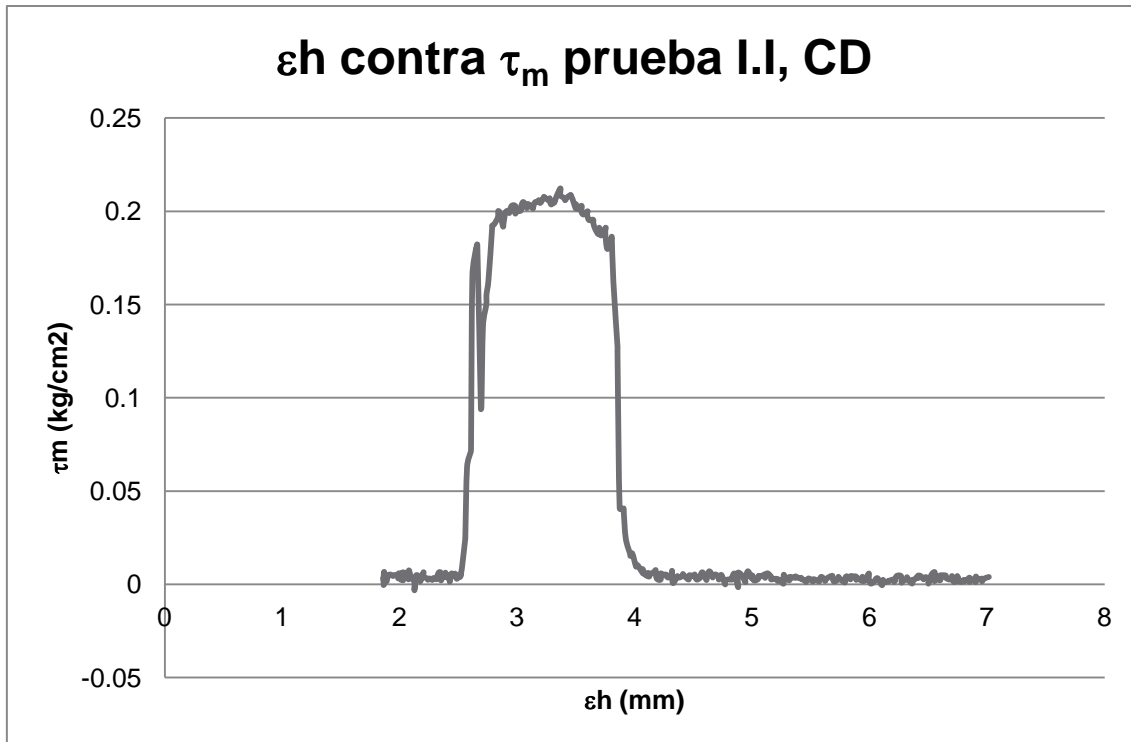


Figura 90: Esfuerzo deformación prueba I.I, CD.

- Prueba CD para la muestra II y II.I de esfuerzo normal  $0.614 \text{ kg/cm}^2$ .

Continuando con las pruebas ahora tomamos los datos más básicos de la segunda ronda y con ellos construiremos una hoja de cálculo que nos permita posteriormente utilizar estos, en el cálculo de la envolvente de falla del esfuerzo máximo, para la **muestra II** obteniendo un promedio en el diámetro así como de otros valores como se puede apreciar en la siguiente Tabla 23, además de la humedad de labrado y humedad de prueba.

$\Phi$ (cm)	h (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	HI (%)	Hp (%)
4.908	3.183	18.915	56.935	42.174	58.362

Tabla 23: Datos generales prueba II, CD.

La deformación vertical presente en la muestra II, cuando se produjo la consolidación por 24hr, es de  $\epsilon_v = 1 \text{ mm}$ .

En la prueba de corte directo tenemos un desplazamiento horizontal corregido (ahora es a 5 mm, con una pequeña diferencia en el desplazamiento, el resultado no se ve afectado en ningún sentido y la prueba fue exitosa, siendo así se hace la suposición en los cálculos del  $t_{50}$  que si llego a la marca). Obteniendo además, carga máxima en el anillo, al área reducida ( $A_r$ ), esfuerzo máximo y esfuerzo normal.

Dhc $\epsilon_{hc}$ (mm)	$W_{a_m}$ (kg)	$A_{c^*}$ (cm <sup>2</sup> )	$\tau_{m^*}$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$A_r$ (cm <sup>2</sup> )	$A_c$ (cm <sup>2</sup> )	$\tau_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kg/cm <sup>2</sup> )
4.985	4.201	18.915	0.277	6.453	12.463	<b>0.351</b>	<b>0.614</b>

Tabla 24: Datos de la prueba de corte en II, CD.

Nota: cuando se calcula el área corregida con la ecuación 20 se hace el cambio de unidades del  $\epsilon_{hc}$  de mm a cm, para uniformizar unidades y en el caso del valor del  $A_{c^*}$ ,  $A_c$ , y  $\tau_{m^*}$  solo se tomo el primer valor como valor representativo.



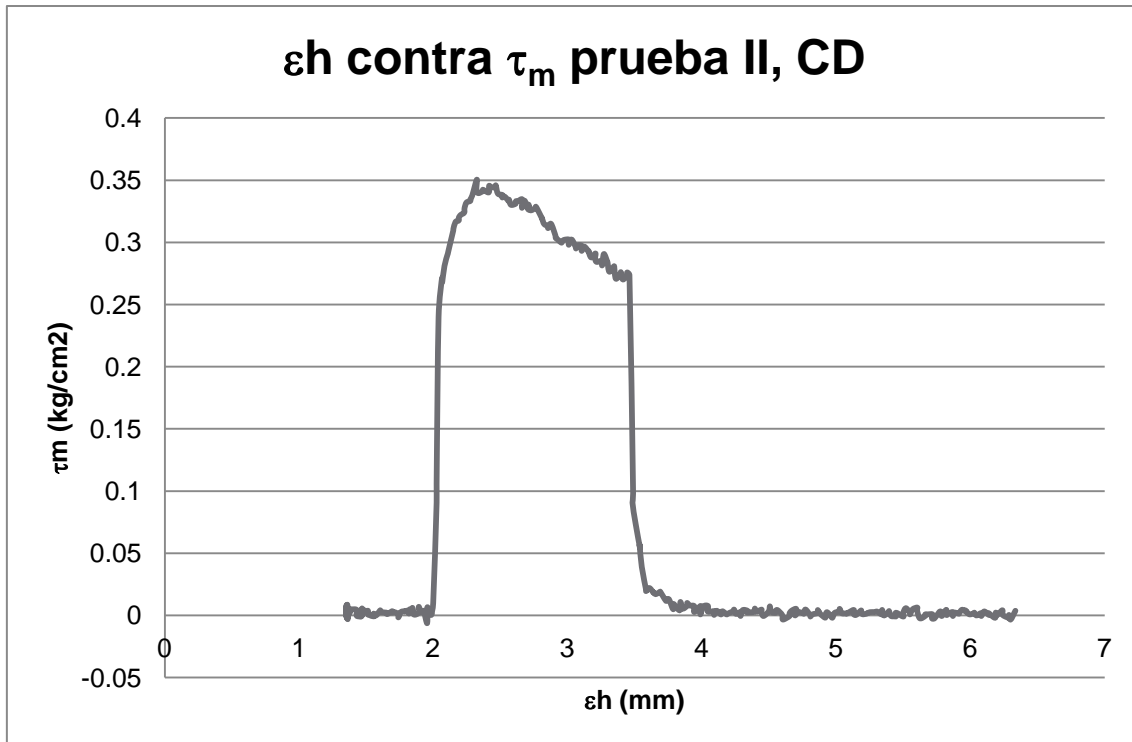


Figura 91: Esfuerzo deformación prueba II, CD.

Para la **muestra de referencia II.I** obtenemos un promedio en el diámetro, en la altura, calculamos área y volumen, humedad de labrado y humedad de prueba.

$\Phi$ (cm)	h (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	HI (%)	Hp (%)
4.940	2.835	19.167	54.337	42.220	57.117

Tabla 25: Datos generales prueba II.I, CD.

Para la muestra II.I la deformación vertical producto de su consolidación por 24hr, es de  $\epsilon_v = 0.8$  mm.

Obteniendo de la prueba de corte directo el desplazamiento horizontal corregido la carga máxima en el anillo, el área reducida ( $A_r$ ) corresponde a  $A_r = 0$  cm<sup>2</sup>, el valor del esfuerzo máximo y esfuerzo normal.

Dhc $\epsilon_{hc}$ (mm)	$W_{a_m}$ (kg)	$A_c$ (cm <sup>2</sup> )	$\tau_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kg/cm <sup>2</sup> )
5.043	4.868	19.167	<b>0.263</b>	<b>0.614</b>

Tabla 26: Datos de la prueba de corte en II.I, CD.



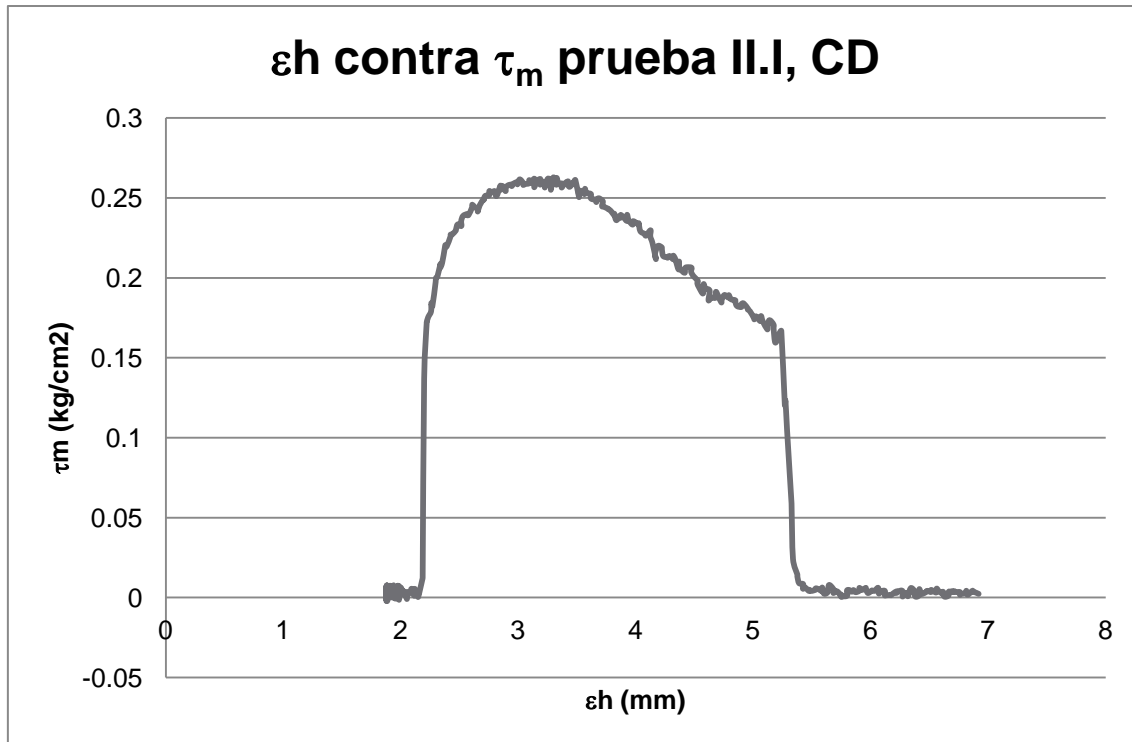


Figura 92: Esfuerzo deformación prueba II.I, CD.

- Prueba CD para la muestra III y III.I de esfuerzo normal  $0.818 \text{ kg/cm}^2$ .

Continuando con las pruebas ahora tomamos los datos más básicos de la segunda ronda y con ellos construiremos una hoja de cálculo que nos permita posteriormente utilizar estos, en el cálculo de la envolvente de falla del esfuerzo máximo, para la **muestra**.

$\Phi$ (cm)	h (cm)	A ( $\text{cm}^2$ )	V ( $\text{cm}^3$ )	HI (%)	Hp (%)
4.953	3.040	19.264	58.562	40.891	55.152

Tabla 27: Datos generales prueba III, CD.

La deformación vertical presente en la muestra III, cuando se produjo la consolidación por 24hr, es de  $\epsilon_v = 1.1$  mm.

La prueba de corte directo nos arroja que el desplazamiento corregido (debería ser a 5 mm, aunque la diferencia es mayor en el desplazamiento, el resultado no se ve afectado en ningún sentido y la prueba fue exitosa, siendo así se hace la suposición en los cálculos del  $t_{50}$  que si llego a la marca).

Dhc $\epsilon_{hc}$ (mm)	W <sub>a<sub>m</sub></sub> (kg)	Ac* ( $\text{cm}^2$ )	$\tau_m^*$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	Ar ( $\text{cm}^2$ )	Ac ( $\text{cm}^2$ )	$\tau_m$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\sigma_n$ ( $\text{kg/cm}^2$ )
6.998	10.549	19.263	0.568	3.983	15.280	<b>0.723</b>	<b>0.818</b>

Tabla 28: Datos de la prueba de corte en III, CD.

Nota: cuando se calcula el área corregida con la ecuación 20 se hace el cambio de unidades del  $\epsilon_{hc}$  de mm a cm, para uniformizar unidades y en el caso del valor del Ac\*, Ac, y  $\tau_m^*$  solo se tomo el primer valor como valor representativo.



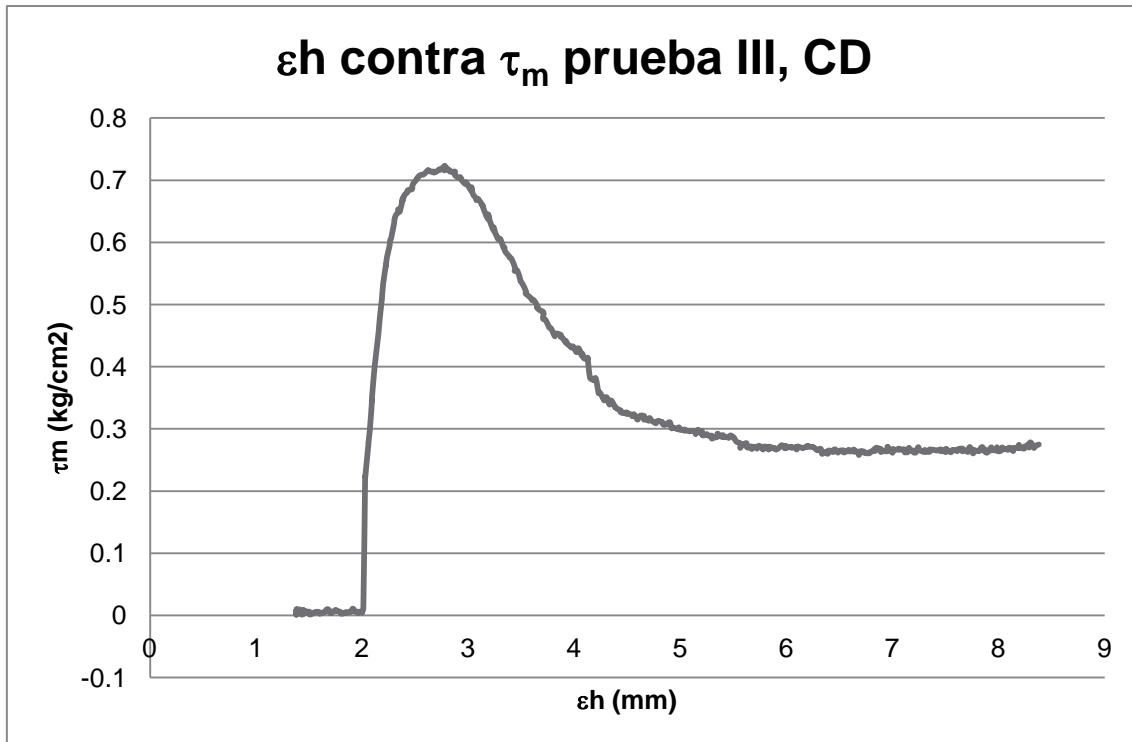


Figura 93: Esfuerzo deformación prueba III, CD.

Para la **muestra de referencia III.I**, una vez más obtenemos un promedio en el diámetro y en la altura, calculando el área y después el volumen, humedad de labrado y humedad de prueba.

Φ (cm)	h (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	HI (%)	Hp (%)
4.813	2.955	18.190	53.751	43.467	58.797

Tabla 29: Datos generales prueba III.I, CD.

La muestra III.I la deformación vertical producto de su consolidación por 24hr, es de  $\epsilon_v = 0.95$  mm.

En la prueba de corte directo obtenemos el desplazamiento horizontal corregido (debería ser a 5 mm, pero la diferencia es poca y el resultado no se ve afectado en ningún sentido y la prueba fue exitosa, siendo así se hace la suposición en los cálculos del  $t_{50}$  que si llevo a la marca).

Dhc εhc (mm)	W <sub>m</sub> (kg)	Ac (cm <sup>2</sup> )	τ <sub>m</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	σ <sub>n</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )
5.231	10.469	18.189	<b>0.592</b>	<b>0.818</b>

Tabla 30: Datos de la prueba de corte en III.I, CD.



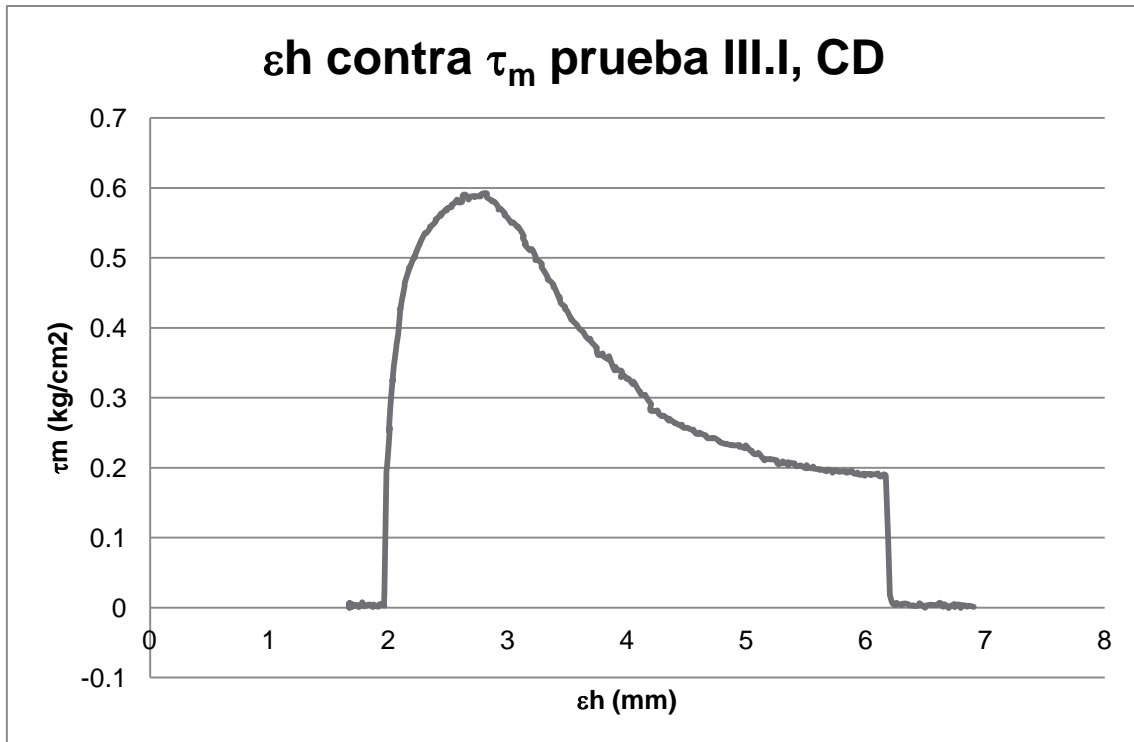


Figura 94: Esfuerzo deformación prueba III.I, CD.

Haciendo un resumen de esfuerzos cortantes máximos y normales, así como de sus ángulos de tendencia en las Tabla 31, Tabla 32 y Tabla 33 podemos graficar obtenemos la Figura 95: Envolvente de falla para esfuerzos en pruebas con grieta y sin grieta, CD., y que se analizara en el capítulo 4.

Muestra	$\tau_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kg/cm <sup>2</sup> )
I	0.417	0.409
II	0.351	0.614
III	0.723	0.818

Tabla 31: Resumen de esfuerzos cortantes máximos en pruebas con grietas, CD.

Muestra	$\tau_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kg/cm <sup>2</sup> )
I.I	0.212	0.409
II.I	0.263	0.614
III.I	0.592	0.818

Tabla 32: Resumen de esfuerzos cortantes máximos en pruebas sin grietas CD.

Ángulo $\phi$ (°) de tendencia de falla I, II y III	Ángulo $\phi$ (°) de tendencia de falla I.I, II.I y III.I
36.796	42,884

Tabla 33: Ángulos de tendencia para las envolventes de falla, CD.



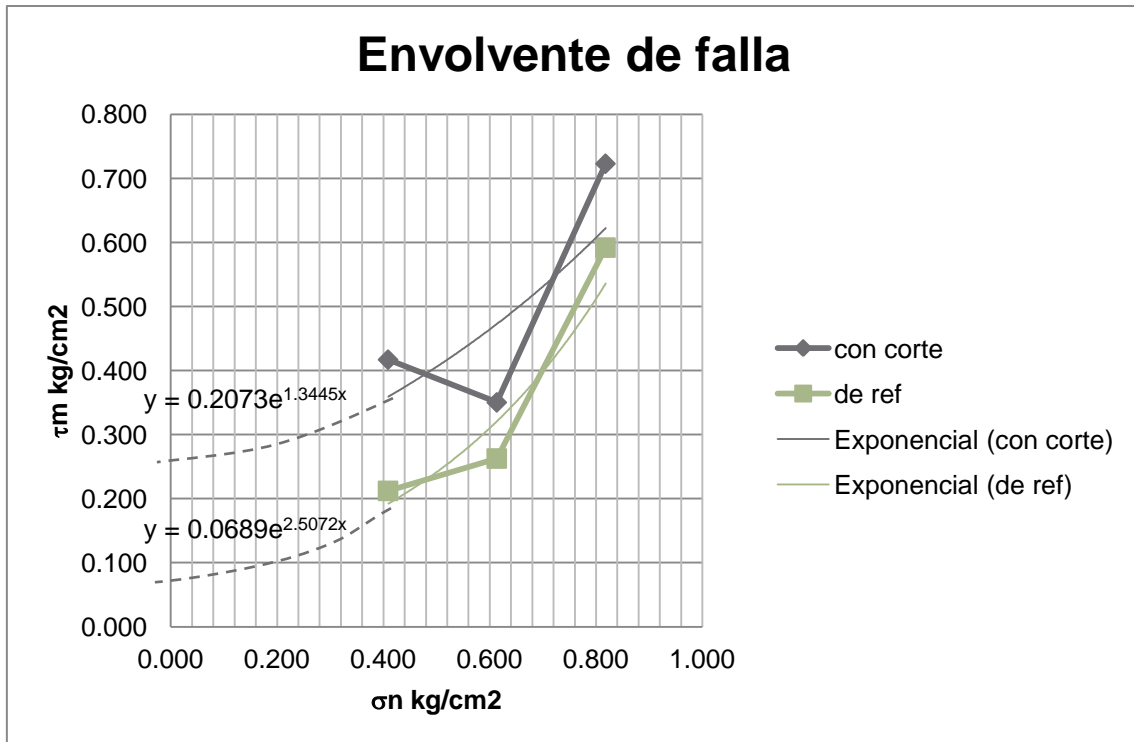


Figura 95: Envlovente de falla para esfuerzos en pruebas con grieta y sin grieta, CD.

Como se puede apreciar en los datos y en la grafica de la figura anterior, se tuvo un esfuerzo de corte máximo menor a un esfuerzo normal mayor al punto anterior, esto no es posible, ya que tanto en la literatura como en la experimentación se ha demostrado que a mayor esfuerzo normal, mayor es el esfuerzo cortante máximo, por lo tanto repetimos las pruebas para el esfuerzo normal de 0.409kg/cm<sup>2</sup> y 0.614kg/cm<sup>2</sup>, esperando tener un resultado correcto con respecto al anterior.

- Prueba CD para la muestra I de esfuerzo normal 0.409kg/cm<sup>2</sup>, repetición.

Como se menciona con anterioridad disponemos de tomar los datos más básicos y con ellos construir una hoja de cálculo que nos permita posteriormente utilizar estos, en el cálculo de la envolvente de falla del esfuerzo máximo, para la **muestra I** obteniendo un promedio en el diámetro y un promedio en la altura, calculando área y volumen, además de la humedad de labrado y humedad de prueba.

Φ (cm)	h (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	HI (%)	Hp (%)
4.813	2.955	18.190	53.751	43.467	58.797

Tabla 34: Datos generales pruebas I, CD, repetición.

La deformación vertical presente en la muestra I, cuando se produjo la consolidación por 24hr, es de εv = 1.3 mm.

De la prueba de corte directo obtenemos el desplazamiento corregido (debería ser a 5 mm, pero se determino innecesario llegar hasta ese desplazamiento, ya que el resultado no se ve afectado en ningún sentido y la prueba fue exitosa, siendo así se hace la suposición en los cálculos del t<sub>50</sub> que si llego a la marca).

Dhc εhc (mm)	Wam (kg)	Ac* (cm <sup>2</sup> )	τm* (kg/cm <sup>2</sup> )	Ar (cm <sup>2</sup> )	Ac (cm <sup>2</sup> )	τm (kg/cm <sup>2</sup> )	σn (kg/cm <sup>2</sup> )
3.986	3.094	19.205	0.165	7.435	11.770	0.273	0.409

Tabla 35: Datos de la prueba de corte en I, CD, repetición.



Nota: cuando se calcula el área corregida con la ecuación 20 se hace el cambio de unidades del  $\epsilon_{hc}$  de mm a cm, para uniformizar unidades y en el caso del valor del  $Ac^*$ ,  $Ac$ , y  $\tau_m^*$  solo se tomo el primer valor como valor representativo.

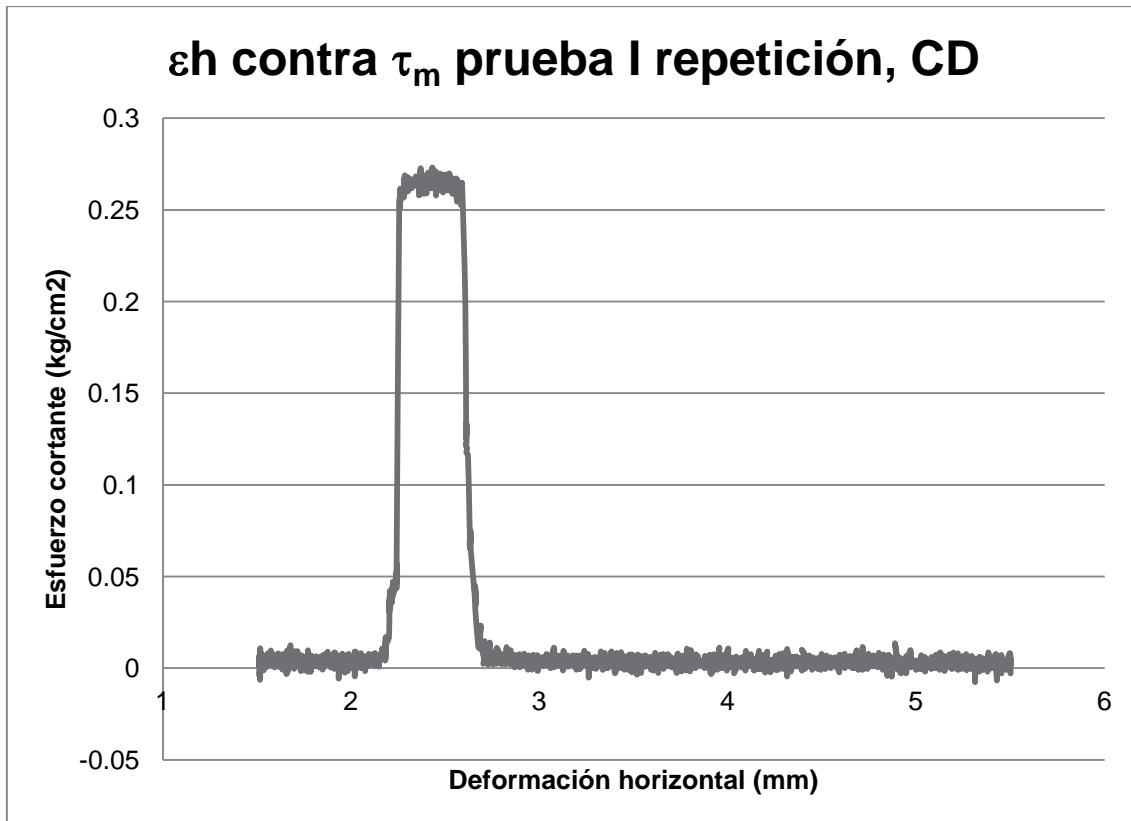


Figura 96: Esfuerzo deformación prueba I, CD, repetición.

- Prueba CD para la muestra II de esfuerzo normal  $0.614 \text{ kg/cm}^2$ , repetición.

Continuando con las pruebas ahora tomamos los datos más básicos de la segunda ronda y con ellos construiremos una hoja de cálculo que nos permita posteriormente utilizar estos, en el cálculo de la envolvente de falla del esfuerzo máximo, para la **muestra II**, obtenemos el promedio del diámetro y de la altura, calculamos el área y después el volumen, obtenemos la humedad de labrado y la humedad de prueba.

$\Phi$ (cm)	h (cm)	A ( $\text{cm}^2$ )	V ( $\text{cm}^3$ )	HI (%)	Hp (%)
4.963	2.913	19.342	56.332	44.241	58.660

Tabla 36: Datos generales prueba II, CD, repetición.

La deformación vertical presente en la muestra II, cuando se produjo la consolidación por 24hr, es de  $\epsilon_v = 2.1$  mm.

De la prueba de corte directo obtenemos el desplazamiento horizontal corregido (ahora está un poco por debajo de los 5 mm, pero no se ve afectado en ningún sentido y la prueba fue exitosa).

Dhc $\epsilon_{hc}$ (mm)	$W_{a_m}$ (kg)	$Ac^*$ ( $\text{cm}^2$ )	$\tau_m^*$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$A_r$ ( $\text{cm}^2$ )	$Ac$ ( $\text{cm}^2$ )	$\tau_m$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	$\sigma_n$ ( $\text{kg/cm}^2$ )
4.086	3.647	19.341	0.194	5.662	13.680	<b>0.277</b>	<b>0.614</b>



Tabla 37: Datos de la prueba de corte en II, CD, repetición.

Nota: cuando se calcula el área corregida con la ecuación 20 se hace el cambio de unidades del  $\epsilon_{hc}$  de mm a cm, para uniformizar unidades y en el caso del valor del  $A_c^*$ ,  $A_c$ , y  $\tau_m^*$  solo se tomo el primer valor como valor representativo.

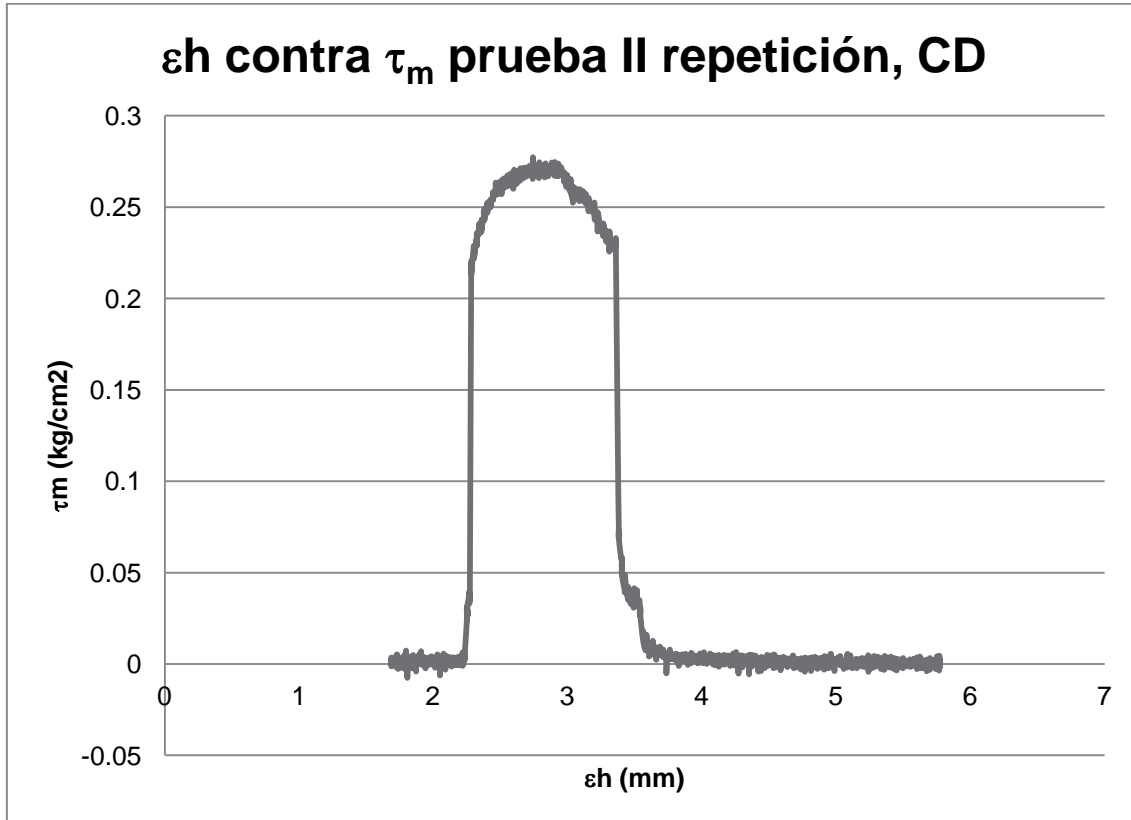


Figura 97: Esfuerzo deformación muestra II, CD, repetición.

Ahora solo hacemos resumen de la muestra I y II que se repitieron como se presenta en la siguiente Tabla 38 y Tabla 39, así como su correspondiente envolvente de falla en la Figura 98: Envolvente de falla para pruebas con grieta CD, repetición..

Muestra, repetición	$\tau_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kg/cm <sup>2</sup> )
I	0.273	0.409
II	0.277	0.614

Tabla 38: Resumen de esfuerzos cortantes máximos en pruebas agrietadas, repetición.

Ángulo $\phi$ (°) de tendencia de falla I, II repetición y III
47.743

Tabla 39: Ángulos de tendencia para envolvente de falla CD, repetición.



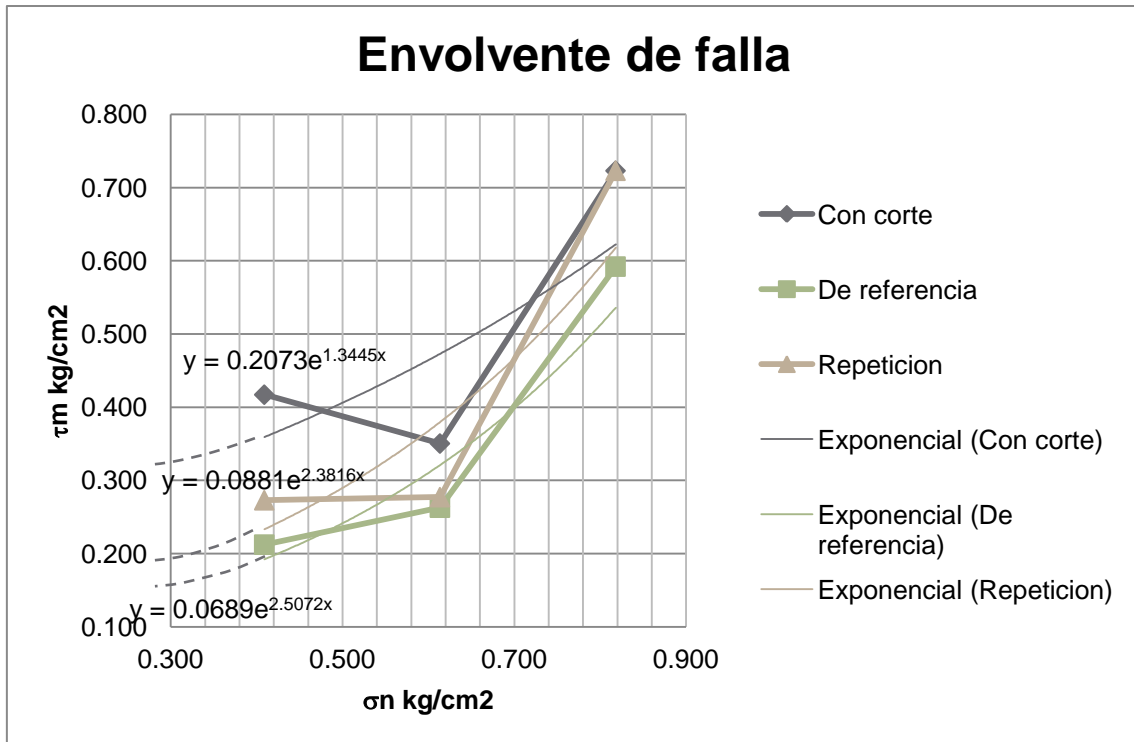


Figura 98: Envolvente de falla para pruebas con grieta CD, repetición.

Ahora se puede observar en los resultados de la grafica de la Figura 98, que se corrigió el error pero que significativamente no fue muy superior el esfuerzo cortante máximo con respecto al anterior esfuerzo cortante máximo, pero decidimos hacer un ajuste de cómo tomar los valores, esto nos llevo a tomar la decisión de solo descartar la prueba I y tomar la I repetición, como valor correcto para hacer las determinaciones en la interpretación de resultados.



## 4. Interpretación de resultados.

### 4.1. Pruebas CU.

Primeramente tenemos una resistencia cortante máxima para nuestras muestras con grieta, muestra un crecimiento de esta resistencia conforme su esfuerzo normal crece, desarrollando un ángulo en su envolvente de falla de  $\phi = 41^\circ$  aproximadamente como se aprecia en la Figura 99. La prueba al ser no drenada, la presión de poro no se logra disipar durante el corte, esto ayuda que parte del esfuerzo lo tome el agua y por lo tanto, vemos que a pesar de que la muestra se falló, se logró desarrollar suficiente esfuerzo cortante, del que se suponía debía ser menor, por el hecho de que se redujo el área como se explica en la Figura 80. También existe una congruencia en la relación de vacíos  $e$ , porque la prueba donde se desarrolló un mayor esfuerzo normal muestra una menor relación de vacíos  $e$ , quiere decir que se eliminaron una gran cantidad de oquedades en la muestra con un valor de  $e = 0.14$  de diferencia, entre la relación de vacíos inicial y final.

Como mencionamos en algún punto del subcapítulo de “mecánica de la fractura”, hay que determinar su esfuerzo residual, para analizarlo como defecto, construyendo su envolvente como se menciona en el subcapítulo “resistencia al corte y modelo de fricción”. La resistencia residual se construye a partir de la gráfica de esfuerzo-deformación. Para el caso de la prueba I y II (con grieta), la resistencia residual no se desarrolló como en la prueba III (con grieta), suponiendo que no tiene resistencia al corte cuando su esfuerzo normal es bajo y colapsa como se mencionó en el subcapítulo “mecánica de la fractura” la propagación de la grieta (en este caso es cuando nos referimos a la falla que indujimos a la muestra). Cuando se desarrolla la resistencia cortante hace que en algún punto termine por propagarse en el resto de la muestra y cuando comienza a desarrollarse la resistencia residual no se completa y colapsa por este mismo hecho (a excepción de la muestra III, en el siguiente análisis de las pruebas CD explicaremos porque), o simplemente existió un error cuando se elaboró la muestra de corte, es por eso que difícilmente podemos apreciar una envolvente de la resistencia residual parecida a la resistencia cortante máxima. Pero si hacemos la suposición de que la resistencia residual se desarrolla como debiera, podemos apreciar en su envolvente, que tendería a un comportamiento muy parecido a de la envolvente de falla, se puede apreciar esta diferencia en las envolventes en la siguiente Figura 99.

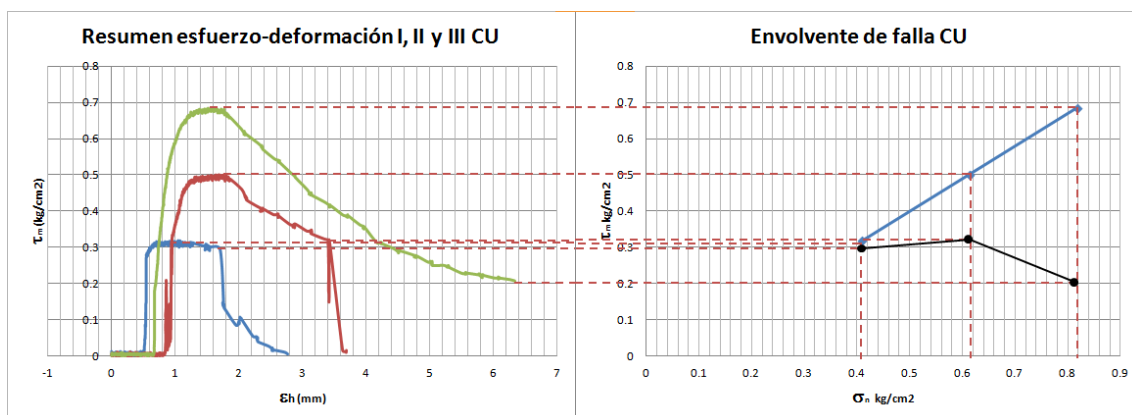


Figura 99: Esfuerzo-deformación, envolvente de falla y esfuerzo residual pruebas con grieta, CU.

Como podemos apreciar en las muestras de referencia **sin grieta** y **con grieta** (Figura 99 y Figura 100), el comportamiento de la arcilla es muy similar, pero a



diferencia de las muestras falladas, en las muestras sin grieta se aprecia muy claramente que si logra desarrollar resistencia residual, pero en algún punto estas colapsan al igual que las falladas, en este caso que **no se debería de presentar tal colapso**.

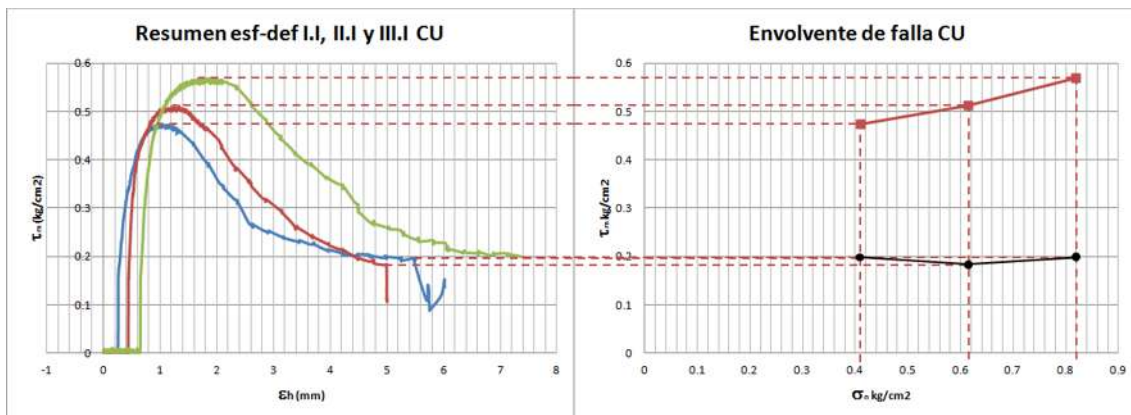


Figura 100: esfuerzo-deformación, envolvente de falla y esfuerzo residual pruebas sin grieta, CU.

En el caso de las **muestras con grieta**, también aplica la relación de a mayor es el esfuerzo normal, la resistencia cortante es mayor, pero el hecho de que se reduzca el área de la muestra cómo se explica en la Figura 80, hace que el aumento del valor de la resistencia cortante máxima, sea mucho mayor en relación a su esfuerzo normal, comparándolo con los valores de las **muestras sin grieta**, es aquí cuando pierde sentido el hecho de que tengan que ir paralelas, ya que cada tendencia de esfuerzos nos indica que, las condiciones de falla en la muestra tienen un peso mayor sobre la arcilla y por lo tanto el comportamiento es significativamente mayor, ya que su área de esfuerzo cortante es menor y por lo tanto el esfuerzo entre un número menor de partículas crece. El área que está en contacto, pero no existe cohesión entre sus partículas, supone una fricción que puede afectar en la resistencia cortante, pero como quedó demostrado en una prueba donde se indujo la falla en la totalidad del área de la muestra se ve claramente en la Figura 55, nos refleja que la fricción entre las superficies es muy baja y para nuestro caso es despreciable. Hay que tener en cuenta que la superficie fallada es una idealización y sus caras son superficialmente planas, pero que en el campo práctico seguramente no lo son y es ahí cuando decimos que por muy irregular que estas sean y lleguen a chocar entre si estas superficies irregulares, realmente no afecta significativamente a la resistencia máxima como para que esta varié, pero en el caso de la resistencia residual, puede que sí logre afectar un poco el valor máximo de la resistencia residual haciendo que sea ligeramente superior por momentos o colapse en algún punto.

El ángulo  $\varphi = 13^\circ$  aproximadamente de la envolvente de falla de la resistencia cortante máxima de las muestras sin grieta, Figura 100 y nuevamente la uniformidad (casi rectilínea), de la tendencia de los puntos, nos da a entender el agua toma parte de la resistencia cortante y que existe gran cohesión de sus partículas manteniendo así un ángulo bajo, solo para lograr esa uniformidad en la envolvente como se dijo anteriormente, pero la resistencia es menor en comparación con las muestras falladas y que el primer supuesto debería ser al contrario, ya que una mayor área sometida a un fuerza debería desarrollar una mayor resistencia, pero también tiene sentido que esa fuerza se reparta en toda esa área (mayor en comparación al de las muestras falladas) y la resistencia se reduzca. De aquí que podemos decir que a mayor área sometida a una fuerza de corte, menor será el esfuerzo aplicado y a una menor área sometida a una fuerza de corte, mayor será el esfuerzo aplicado, para el caso de una prueba en CU en una arcilla CH, y al decir que es a menor área solo nos referimos cuando existe una falla, en la masa de suelo.



Analizaremos nuestros resultados en 4 casos, caso 1: talud sin grietas, caso 2: talud desplazado, caso 3: talud con agrietamiento continuo y caso 4: talud con agrietamiento discontinuo.

- Caso 1: talud sin agrietamiento.

El primer caso corresponde a un talud en donde existe continuidad en el suelo o sea con ausencia de agrietamiento Figura 101. Para realizar el análisis de estabilidad a corto plazo, se requiere obtener una muestra inalterada del lugar para ser probada y obtener su resistencia al corte por medio de una prueba consolidada no drenada CU, la consolidación representa los diferentes esfuerzos normales a distintas profundidades, la condición de no permitir el drenaje nos dice que la falla es a corto plazo y finalmente el análisis por medio de dovelas nos permite descubrir la superficie más crítica como se ejemplifica en la siguiente Figura 101.

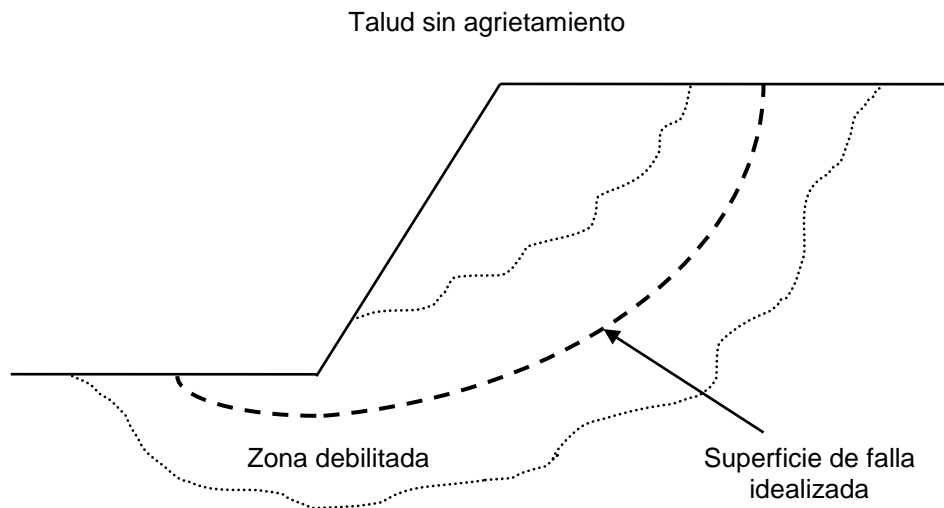


Figura 101: caso 1, CU.

Este caso lo podemos comparar con nuestros resultados I.I, II.I y III.I, correspondientes a muestra sin grieta que se muestran en la Tabla 17 y en la Figura 100: esfuerzo-deformación, envolvente de falla y esfuerzo residual pruebas sin grieta, CU, de  $c = 0.39$  y de  $\phi = 13^\circ$ . Cuando se presenta una consolidación normal y este material es sometido a un esfuerzo cortante, su volumen cambia poco porque no se permite la liberación de la presión de poro, este caso CU en campo sería el equivalente a hacer el corte y ver la respuesta del suelo a corto plazo, se logran desarrollar sus resistencias cortantes máximas con poca diferencia entre ellas respecto de sus esfuerzos normales, como podemos ver en su envolvente de falla en la Figura 100. Pero conforme se aumenta el esfuerzo normal, el esfuerzo cortante máximo no aumenta. Por otro lado en la Figura 100, **no se aprecia notablemente que se desarrolle la resistencia residual, en el desarrollo se presenta la rotura súbita de la muestra.** La primera parte de la envolvente de falla tiene como parámetros  $c = 0.16$  y un  $\phi = 5^\circ$  aproximadamente. Además de presentar una cohesión de partículas muy alta, que eso es muy bueno en un talud ya que la cohesión de las partículas de arcilla ayuda a que la estabilidad del talud se mantenga hasta que por condiciones



naturales o antrópicas, se desarrollen los agrietamientos y por esta condición pierda resistencia.

- Caso 2: talud desplazado.

El siguiente caso es completamente diferente al anterior, aquí ya no hay continuidad del suelo, porque este ya falló y se desplazó hasta su equilibrio ver Figura 102, esto quiere decir que ya se rebasó la resistencia cortante máxima. En este talud se generó una superficie de falla lo que nos indica que su resistencia al corte es menor que la resistencia cortante máxima, y su resistencia con la que trabajará será la residual, por lo tanto la envolvente de falla residual es el gobernante.

109

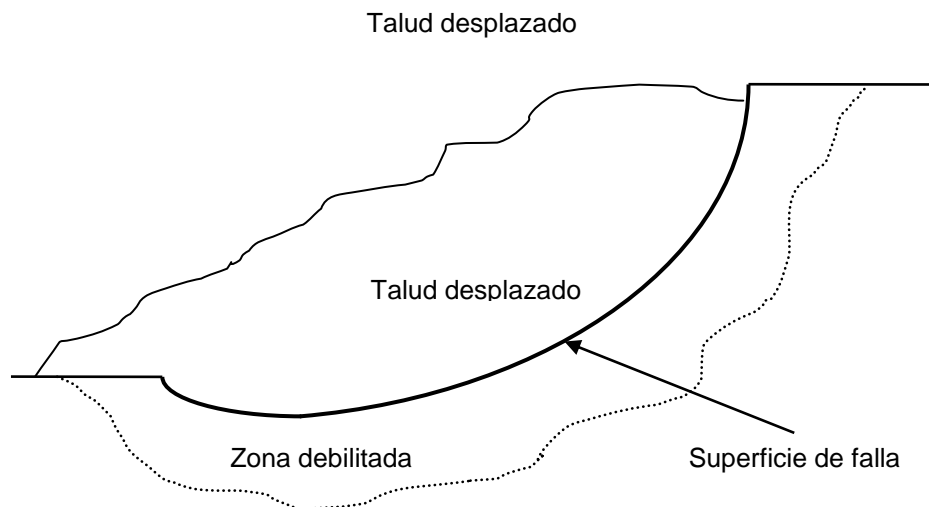


Figura 102: caso 2, CU.

En el caso 2 podemos apreciar fácilmente a simple vista que ya existe una superficie de falla y que el talud fue desplazado hasta alcanzar el equilibrio, si nosotros hacemos el supuesto de cargar la zona deslizada y aumentar el esfuerzo normal, difícilmente el suelo resistiría ya que el esfuerzo de equilibrio se superó. Comparando con nuestros resultados de la Figura 100, donde claramente podemos ver como desarrolla una envolvente de falla con una  $c = 0.16$  y un  $\varphi = 5^\circ$  y resistencias residuales cercanas a los  $0.2\text{kg/cm}^2$ .

- Caso 3: talud con agrietamiento continuo.

Para nuestro siguiente caso, nuestro suelo ya sea por estructuras heredades de suelo contra suelo o suelo contra roca ver Figura 103, al realizar la excavación en corte de un camino inmediatamente se deslizarían los bloques, colapsándose el talud, porque ya están formadas las superficies de falla en dirección del corte. No se desarrolla un esfuerzo cortante máximo, ni residual ya que las superficies de falla están completamente definidas y solo actúa la fuerza de fricción entre sus partículas.



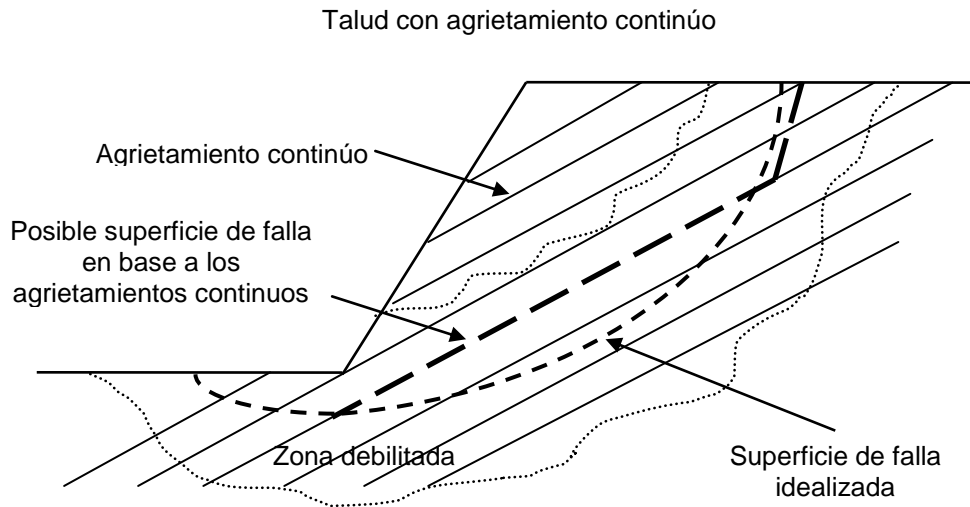


Figura 103: caso 3, CU.

Es solo cuestión realizar el corte y este fallará al instante desplazando la mayor parte del talud, será cuestión de desarrollar un esfuerzo de corte pequeño y en la suficiente y se rebasará la fuerza de fricción de sus partículas para que se desplacen mas bloques. Tal vez no tomando la forma de cuchara, sino más bien tomando dirección de los agrietamientos continuos, este caso es más representativo con la muestra en la que se generó totalmente la grieta ver Figura 55. Los resultados muestran que nunca opuso resistencia al corte en la superficie previamente generada.

- Caso 4: talud con agrietamiento discontinuo.

Nuestro último caso es el que estamos tratando en esta investigación, cuando hay un agrietamiento discontinuo en nuestro talud, este agrietamiento discontinuo se desarrollada por expansiones y contracciones del mismo, debidos a cambios de temperatura y de humedad ver Figura 104, obtener una muestra inalterada o como en nuestro caso una remodelar y generar esa grieta como lo hicimos en laboratorio. Posteriormente se prueban a corte directo, mediante la prueba CU. El análisis de estabilidad se realizaría con el método de las dovelas pero la base del círculo lo limitaría alguna de las grietas previamente establecidas, tal como vemos claramente en la Figura 104.



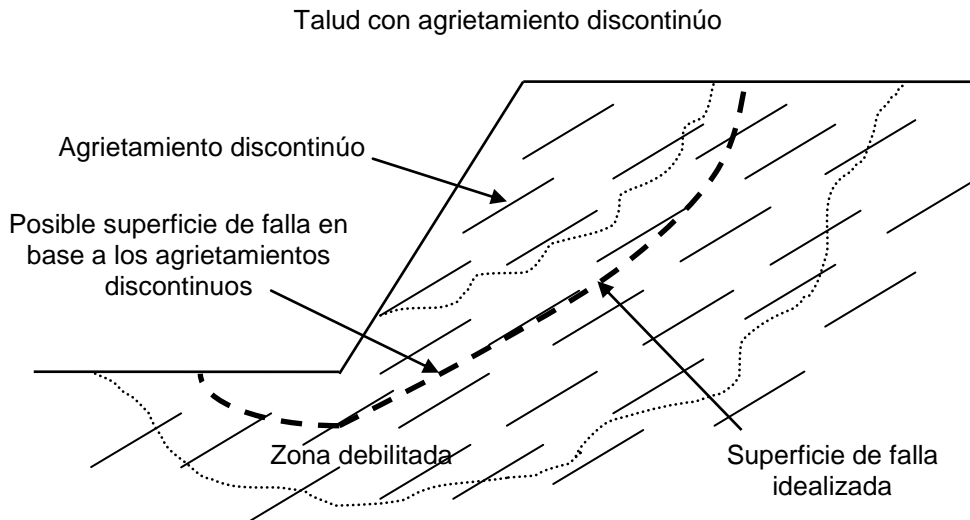


Figura 104: caso 4, CU.

En este último caso, lo podemos comparar con los resultados de las pruebas con grietas I, II y III CU ver Tabla 16 y Figura 99. Los parámetros de la envolvente de falla son  $c = 0$  y un  $\varphi = 41^\circ$ . Este agrietamiento discontinuo en el talud es totalmente susceptible de que se propague, como ya se vio en el subcapítulo “mecánica de la fractura” en los primeros párrafos. Cuando en una región muy estrecha y localizada comienza la separación de las partículas: comienza el agrietamiento por contracción y expansión, teniendo dos tipos de agrietamiento, el dúctil y el frágil, el dúctil sería el más común cuando existe la presencia de agua y el frágil es cuando hay ausencia de esta. Cuando hacemos que se desarrolle un esfuerzo en el suelo como respuesta comienzan las deformaciones, elásticas y plásticas y cuando rebasamos los límites de las deformaciones se sobreviene el agrietamiento, con esta consideración podemos decir que un vez que la existencia de grietas está dada y comienzan a desarrollarse los esfuerzos de corte, **comienza la propagación de las grietas**, hasta que se comunican unas con otras a lo largo de la masa de suelo, de ahí que se desarrolla la superficie de falla y el deslizamiento del talud. Nosotros estudiamos la parte en la que tomamos una porción de la grieta y una porción del suelo que aun presenta cohesión y revisamos con las pruebas el momento en el que se desarrolla la resistencia cortante y residual.

Una de las cosas que podemos apreciar en la Figura 99, es la pérdida de la cohesión, esto asociado en gran medida a la grieta (que inducimos) en el espécimen, esta pérdida de cohesión se refleja en un aumento en la diferencia de esfuerzos desarrollando así un ángulo mayor  $\varphi = 41^\circ$  en comparación a la prueba sin grieta en donde el ángulo es aproximadamente de  $13^\circ$ , la grieta en el espécimen es también asociando a la caída de la resistencia residual y que solo a un esfuerzo normal mayor (profundidad mayor), se desarrolla la resistencia residual en muestras con grieta ver Figura 99. Ya que hubo una caída (colapso) cuando se aplicaba el desplazamiento, podemos decir que la envolvente de falla de la resistencia residual es  $\tau_r = 0$  ver Figura 99.



### 4.2. Pruebas CD.

Para hacer un análisis de las pruebas consolidadas drenas es más conveniente hacerlo con los resultados de la prueba CD que se repitieron una o dos veces. Solo tomaremos el valor del esfuerzo cortante máximo de la prueba I y dejaremos como validas las pruebas II y III iniciales ya que son más confiables. Los resultados de las pruebas con grieta y sin grieta se presentan en la Figura 105 y Figura 106, respectivamente.

Como en las pruebas CU a las que se les indujo la falla (suponiendo esa falla como una grieta preexistente en la muestra de suelo), se hace la misma suposición de que se propagó la grieta cuando se comenzaba a desarrollar el esfuerzo residual y simplemente colapso en ese punto inicial y no dejó que se desarrollara el esfuerzo residual a excepción de la muestra III (con grieta). Puede ser debido a que el esfuerzo normal es mucho mayor y ayuda en cierta manera a que la propagación de la grieta no sea tan importante como para que impida el desarrollo la resistencia residual en la arcilla.

Por alguna razón no se logra desarrollar una resistencia residual en las pruebas sin grieta de las pruebas CD ver Figura 106, pero dado que aquí no existe una grieta previa, la mecánica de la fractura no puede explicar este fenómeno.

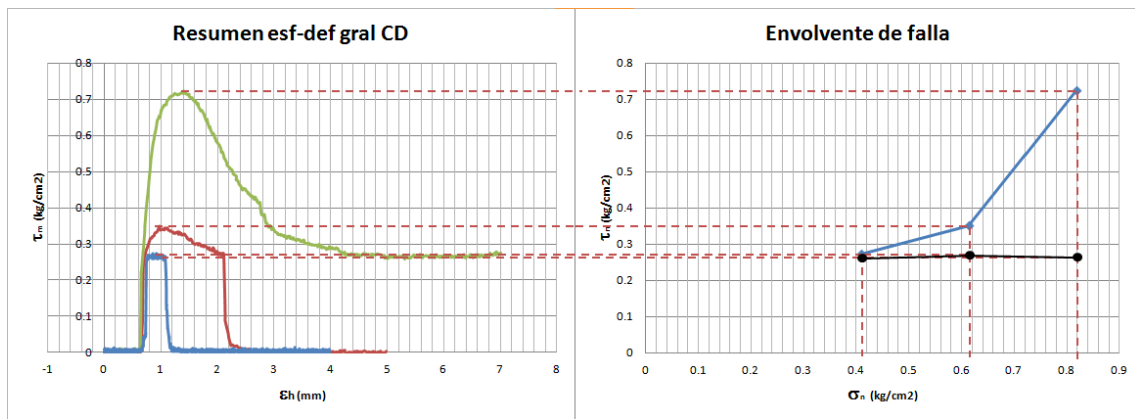


Figura 105: Esfuerzo-deformación, envolvente de falla y esfuerzo residual pruebas con grieta, CD.

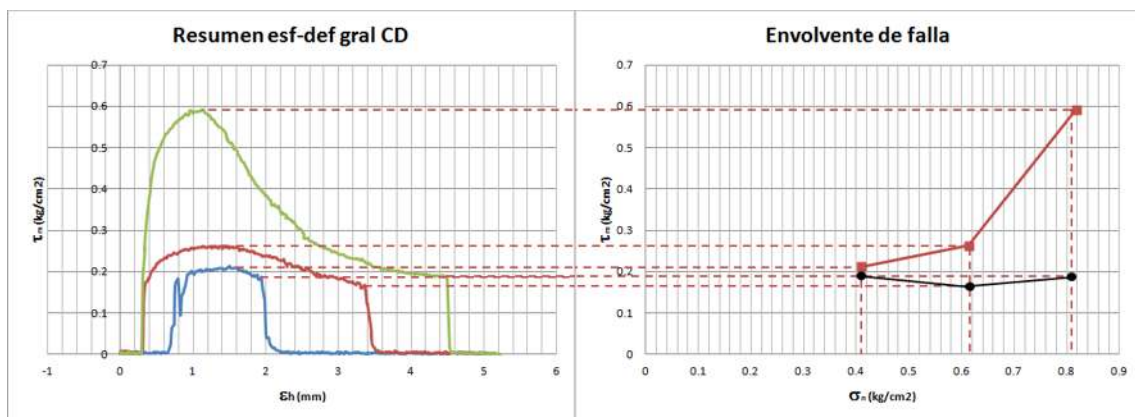


Figura 106: Esfuerzo-deformación, envolvente de falla y esfuerzo residual pruebas sin grieta CD.

En los resultados de las pruebas CD con grieta y sin ella se observa que la resistencia máxima que corresponde a los dos primeros esfuerzos normales ( $0.409\text{kg/cm}^2$  y  $0.614\text{kg/cm}^2$ ), son casi idénticas ( $0.273\text{kg/cm}^2$  y  $0.351\text{kg/cm}^2$  respectivamente). En la primera parte de la gráfica podemos apreciar que la pendiente de la envolvente de falla es muy pequeña, después crece ya que el último esfuerzo normal aplicado



genera en el suelo una resistencia que se eleva exponencialmente. Podemos decir que tanto para las muestras con grieta, como para las muestras sin grieta (que presentan similitud de tendencia de poca diferencia entre los dos primeros puntos) ver Figura 99, hacemos la suposición de que el crecimiento del esfuerzo normal tiende a ser exponencial. Al ser una prueba en donde el agua se drena y no toma parte del esfuerzo, el suelo es el que toma en su totalidad el esfuerzo y que se refleja con mayor fidelidad el comportamiento de nuestra arcilla, también eso se muestra en la gráfica que tiende a ser menos rectilínea con respecto de la prueba CU, el análisis se realiza tomando solo la muestra I que se repitió, II y III sin grieta ver Figura 105 y Figura 106.

Cuando hacemos un análisis en la estabilidad de taludes y se presenta el caso de una grieta de tensión o las grietas por expansión y contracción, así como el desarrollo de un esfuerzo cortante, la grieta se propagará, dependiendo de los esfuerzos aplicados sobre la masa de suelo, pero al final se propagará la grieta creando una superficie de falla, de ahí que se incremente su resistencia cortante máxima, pero su resistencia residual no se desarrolla y tiende a colapsar como vimos en los resultados de las pruebas CU y CD ver Figura 99 y Figura 105, en las muestras I, II y III y la repetición de solamente I y las pruebas sin repetir II y III, respectivamente, como se vio en el capítulo "estabilidad de taludes", la superficie de falla se desarrolla en forma de cuchara sobre el talud y que puede ser calculada por el método de dovelas (superficie de falla crítica), en algunos otros casos, puede que no exista esa grieta de tensión, pero aun así se generan grietas que cuando se propagan, llegan a interconectar y desarrollan los planos de deslizamiento, siempre y cuando se desarrolle un esfuerzo de corte en el talud.

Como vimos en las pruebas tipo CU, ahora lo veremos en las pruebas tipo CD, analizaremos, 4 casos, correspondientes a caso 1: talud sin grietas, caso 2: talud desplazado, caso 3: talud con agrietamiento continuo y caso 4: talud con agrietamiento discontinuo.

- Caso 1: talud sin agrietamiento.

El primer caso corresponde a un talud en donde existe continuidad en el suelo Figura 107. Para realizar el análisis de estabilidad a largo plazo, se requiere obtener una muestra inalterada del lugar para ser probada y obtener su resistencia a corte por medio de una prueba consolidada drenada, la consolidación a diferentes esfuerzos normales, reproduce la consolidación del suelo a diferentes profundidades del talud, la condición de permitir el drenaje nos dice que las condiciones de falla son a largo plazo, puesto que el drenaje en las arcillas es muy lento y finalmente el análisis por medio de dovelas nos permite descubrir la superficie de falla más crítica, como se ejemplifica en la siguiente Figura 107.



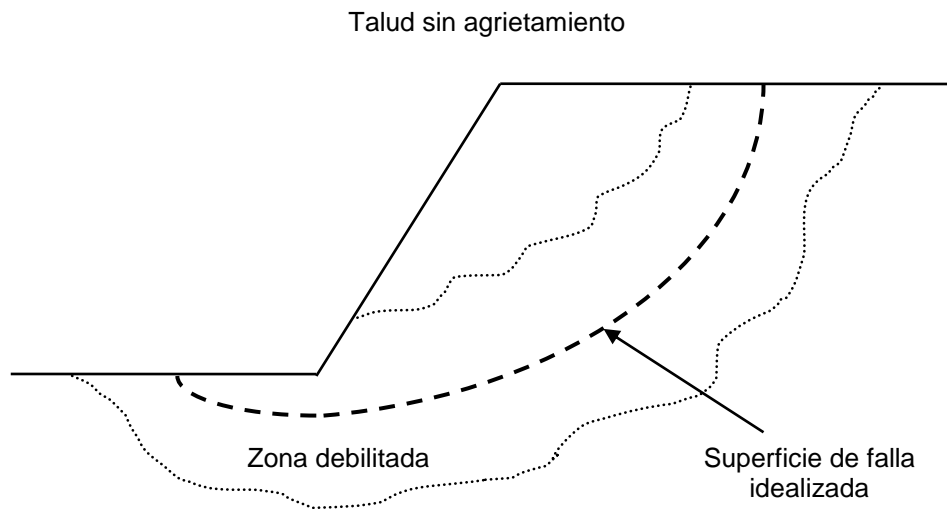


Figura 107: caso 1, CD.

Este caso es para el talud que pasa un largo tiempo después de ser excavado y permitir el drenado, posteriormente al drenado se desarrolla un esfuerzo cortante, como puede ser replicado en laboratorio con una prueba tipo CD, las pruebas que hicimos en equivalencia, son las que no presentan grieta I.I, II.I y III.I ver Tabla 32, como podemos apreciar en la Figura 106, existe una diferencia notable entre las dos primeras resistencias cortantes con respecto de la tercera, el crecimiento desmesurado de la resistencia cortante mayor es atribuido a esfuerzos normales grandes (profundidades mayor) y a esfuerzos normales más bajos (profundidad menor) él esfuerzo cortante no crece significativamente, perdiendo algo de cohesión en comparación a las pruebas CU, teniendo una  $c = 0.1$  y un  $\phi = 47^\circ$ . La resistencia cortante y residual es alta y se aprecia en la Figura 106: Esfuerzo-deformación, envolvente de falla y esfuerzo residual pruebas sin grieta CD., esta resistencia residual que se logra desarrollar en comparación de las pruebas CU.

- Caso 2: talud desplazado.

En este segundo caso ya no existe continuidad del suelo, porque ya falló y se desplazo hasta su equilibrio ver Figura 108: caso 2, CD., resistencia cortante máxima ya fue rebasada en el deslizamiento y la resistencia con la que trabajará será solo la resistencia residual, por lo tanto la envolvente de falla residual es la que gobernará.



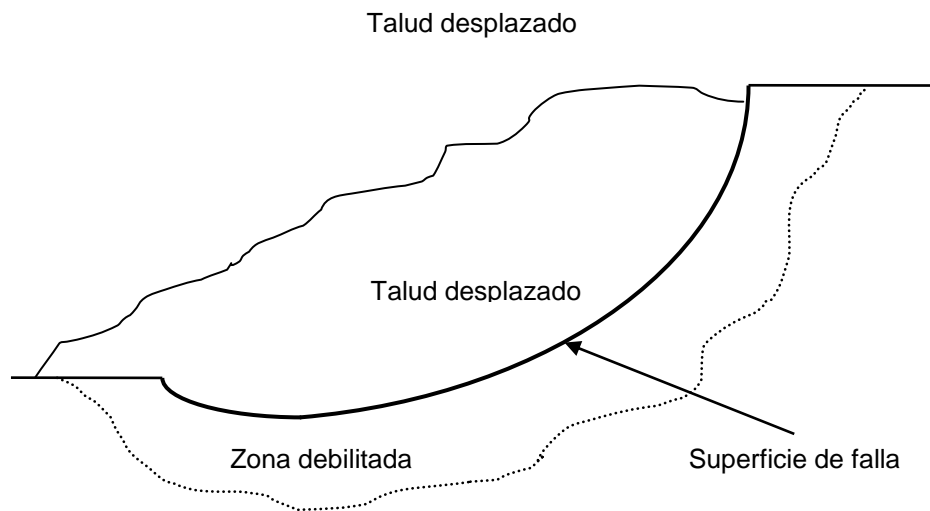


Figura 108: caso 2, CD.

Como se dijo ya, la resistencia cortante máxima se rebasa y la resistencia con la que trabajará será la residual, con valores de  $c = 0.1$  y un  $\varphi = 7^\circ$  aproximadamente, como en el caso anterior CU ver Figura 106, tenemos una cohesión similar y ángulo similar, la resistencia residual promedio para las pruebas CD, es de  $0.15\text{kg/cm}^2$  en contra parte el esfuerzo residual promedio para CU que es de  $0.2\text{kg/cm}^2$ , la diferencia del ángulo entre las pruebas CU y CD es de  $\varphi = 2^\circ$ , esa variación del ángulo nos representa una diferencia de  $0.05\text{kg/cm}^2$  en el origen de la envolvente de falla, ver Figura 100 y Figura 106, por lo tanto el comportamiento a corto plazo y a largo plazo es muy similar para esfuerzos residuales.

- Caso 3: talud con agrietamiento continuo.

Así como en el tercer caso para CU, nuestro suelo por estructuras heredadas de interacción suelo contra suelo o suelo contra roca ver Figura 109, al realizar la excavación inmediatamente se deslizarían los bloques colapsándose el talud, ya que las superficies de deslizamiento ya están formadas en la dirección del corte. No se desarrolla una resistencia cortante máxima, ni residual porque las superficies de falla están completamente definidas y solo actúa la fuerza de fricción entre sus partículas.



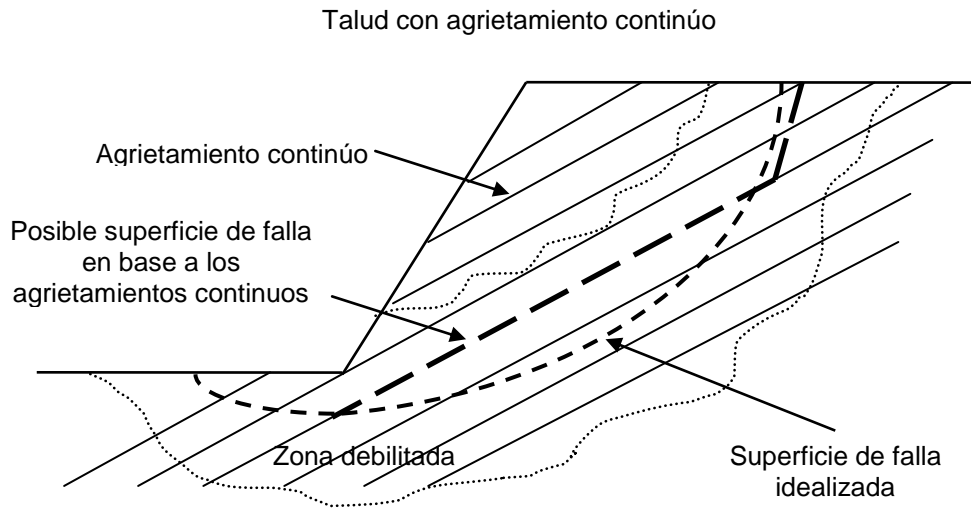


Figura 109: caso 3, CD.

Volvemos a encontrar estructuras heredadas, en la dirección de corte de nuestro talud, la velocidad de drenaje es poco importante en este caso, porque cuando se hace la excavación para formar el talud el deslizamiento se da de manera casi instantánea y la única resistencia que logra desarrollar es la fricción de sus partículas y como vimos en la prueba en la que se indujo la grieta en la totalidad del espécimen ver Figura 55, se aprecia que no desarrolla ninguna resistencia cortante máxima ni residual, por lo tanto es el caso que puede presentarse en campo más desfavorable.

- Caso 4: talud con agrietamiento discontinuo.

En este último caso se tiene un agrietamiento discontinuo en nuestro talud, por expansiones y contracciones del mismo, debidos a cambios de temperatura y humedad ver Figura 110, para la obtención de su resistencia máxima y residual es necesario obtener una muestra inalterada o como en nuestro caso, una remoldear y generar esa grieta como lo hicimos en laboratorio. Posteriormente se prueban a corte directo en una prueba CD, también podemos hacer uso del método de dovelas para determinar la superficie crítica, como vemos claramente en la Figura 110.



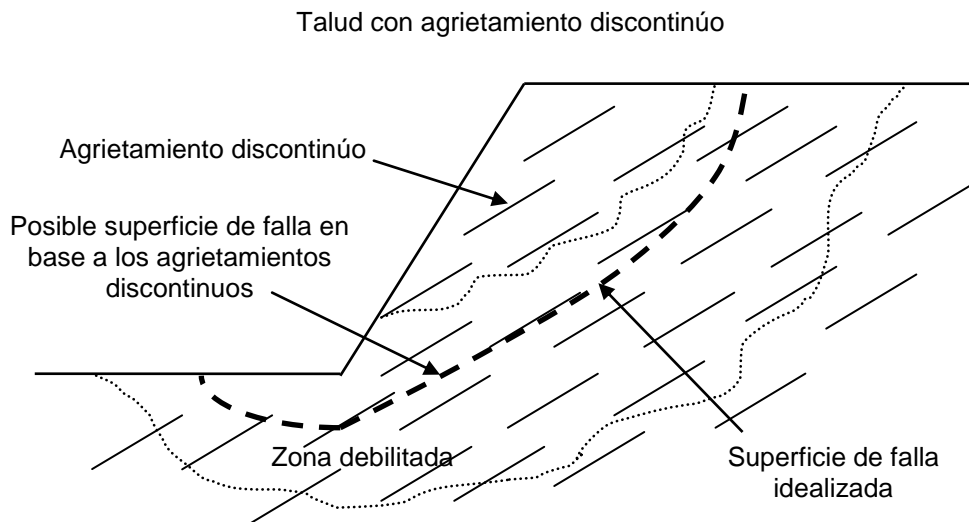


Figura 110: caso 4, CD.

Tenemos un agrietamiento discontinuo, donde tenemos dos zonas por donde se tiene una superficie de falla crítica (método dovelas), una zona con grieta y otra zona sin grieta, nosotros estudiamos la zona intermedia la que tiene interacción de ambas zonas. Curiosamente el comportamiento que presenta cuando la resistencia cortante es diferente, es cuando el esfuerzo normal es bajo (profundidad menor), esta resistencia cortante no es muy alta, pero cuando crece el esfuerzo normal (profundidad mayor), la resistencia cortante máxima se incrementa, como se puede observar en la Figura 105: Esfuerzo-deformación, envolvente de falla y esfuerzo residual pruebas con grieta, CD..

También podemos observar como el colapso se produce de manera mucho más rápida ver Figura 105, de lo que lo hacen las muestras sin grieta en las cuales se aprecia que desarrolla su correspondiente resistencia cortante máxima y posteriormente comienza la etapa de esfuerzo último y finalmente aunque no se a vea claramente en las gráficas, la resistencia residual ver Figura 106.

#### 4.3. Puntos sobresalientes de las pruebas CU y CD.

Para el primer caso (talud sin agrietamiento o prueba de corte sin grieta), si compráramos la cohesión y el ángulo de la envolvente de falla tenemos que la  $c = 0.39$  y  $\phi = 13^\circ$  para CU y  $c = 0.1$  y  $\phi = 47^\circ$  para CD, esto para las **pruebas sin grieta** I.I, II.I y III.I ver Tabla 17, Tabla 32 y Tabla 38, nos damos cuenta de que para las pruebas CU la cohesión es grande, por lo tanto su ángulo es menor y para las pruebas CD la cohesión disminuye y su ángulo crece significativamente.

Para el segundo caso (talud desplazado) tanto para pruebas CU y CD, existe una gran similitud en la cohesión y el ángulo de la envolvente de falla entre el esfuerzo residual de la prueba CU y CD,  $c = 0.1$  para ambos casos y  $\phi = 5^\circ$  y  $7^\circ$ , respectivamente ver Figura 100 y Figura 106, este comportamiento nos da a entender que **la resistencia residual a corto plazo y a largo plazo es muy similar**.



Para el tercer caso (talud con agrietamiento continuo) tanto para pruebas tipo CU y CD, **la resistencia cortante y residual no se desarrollan** ver Figura 55 y cuando estas masas de suelo son excavadas para formar el talud, colapsan de manera casi instantánea, por lo tanto se puede considerar como el caso en campo es el más desfavorable.

Para nuestro cuarto caso (talud con agrietamiento discontinuo o prueba de corte con grieta), podemos ver que **al propagarse la grieta impide el desarrollo de la resistencia residual (para esfuerzos normales pequeños) y colapsa el suelo** ver Figura 99 y Figura 105 (para ambos tipos de prueba CU y CD), haciendo que la propagación de la grieta se comporte como la prueba a la que se le indujo la falla total y evitando el desarrollo de la resistencia última y residual, ya que al rebasar el estado de esfuerzos entre las dos zonas de interacción (con grieta y sin grieta), se propaga la grieta en dirección del corte y solo actúa la fuerza de fricción. Para el esfuerzo normal mayor si se desarrolla la resistencia residual.



## 5. Conclusiones.

### 5.1. Trabajo experimental.

Para lograr trabajar con el material, se tiene que clasificar, determinar su peso específico relativo de sus partículas solidas y determinar su contenido de humedad. Una vez realizada esta etapa, comenzamos a compactar el suelo con el procedimiento Proctor, de este material remoldeado posteriormente se labraron las probetas para ensayar. Por último los especímenes labrados se ensayaron en la máquina de corte directo.

Se contemplan varias posibilidades de inducir la grieta en la muestra con el fin de representar la discontinuidad del agrietamiento en un talud. Para ello se realizó un número importante de pruebas, en busca de establecer un método fácil y replicable que permita inducir la grieta con un grado mínimo de alteración de la muestra. Al final se logra establecer un método que es replicable. El método permite variar la longitud de la grieta hasta generarla en toda la muestra. Por lo que se realizaron pruebas en muestras sin grieta, con grieta con longitud aproximada a la mitad de la muestra y grieta con longitud de toda la muestra.

Se realizan un total de 6 pruebas de corte consolidadas no-drenadas; de las cuales 3 son con inducción de la grieta y 3 sin inducción de de grieta. Cada prueba se realiza con diferente esfuerzo normal (profundidad): la primera prueba se realiza a un esfuerzo normal de  $0.409\text{kg/cm}^2$ , la segunda a un esfuerzo normal de  $0.614\text{kg/cm}^2$  y el último esfuerzo normal es de  $0.818\text{kg/cm}^2$ . Estas mismas 6 condiciones se aplican para la prueba de corte consolidada drenada.

El procedimiento de labrado de las muestras se afectó por los grumos de arcilla, que no se deshacían cuando el suelo se mezclaba con el agua durante el proceso de compactación. La probable causa es que la arcilla de alta plasticidad tiene una permeabilidad baja y el tiempo de mezclado en el laboratorio es corto; por tanto el agua no penetra y no desase el grumo. Estos grumos tienen una resistencia muy alta lo que provoca que se dificulte el labrado, inclusive puede provocar que falle la muestra en la zona donde se está cortando. Para evitar este fenómeno, el suelo se cribó por la malla número 40 y así se eliminó la mayor cantidad de grumos.

Como ya mencionamos, para la prueba CD existe una diferencia marcada entre la resistencia al esfuerzo cortante máximo correspondiente al esfuerzo normal III y las otras dos resistencias correspondientes a los esfuerzos normales I y II (con grieta y sin grieta). A lo que en párrafos anteriores se citó: *“Podemos decir que tanto para las muestras con grieta, como para las muestras sin grieta (que presentan similitud de tendencia de poca diferencia entres los dos primeros puntos) ver Figura 99, hacemos la suposición de que el crecimiento del esfuerzo normal tiende a ser exponencial, a diferencia de las pruebas de referencia la envolvente del esfuerzo residual es mucho menos marcada y eso tiene su explicación como en el las pruebas CU, donde la grieta se propaga cuando se desarrolla el esfuerzo cortante y antes de que comience a desarrollarse el esfuerzo residual, simplemente la grieta se propaga y hace que colapse, evitando el desarrollo del esfuerzo residual en el suelo, además como en otras pruebas que se llevaron a cabo, vemos cuando el colapso se produce la envolvente del esfuerzo residual es  $\tau = 0$  ver Figura 105”.*



## 5.2. Resultados y análisis.

Para el análisis de resultados se presentan 4 casos que en campo son muy comunes, caso 1: talud sin agrietamiento, caso 2: talud desplazado, caso 3: talud con agrietamiento continuo, caso 4: talud con agrietamiento discontinuo. Estos 4 casos son los más representativos, por ese motivo se analizan los resultados en base a esos cuatro casos.

Concluyendo para cada caso lo más importante y relevante, por ejemplo para el primer caso de condiciones CU en donde se tiene un talud continuo sin agrietamiento, se toman los resultados de las pruebas CU sin grieta, ya que esas pruebas son las representativas de un talud continuo y sin agrietamiento, tomando cada prueba para representar cada caso respectivamente.

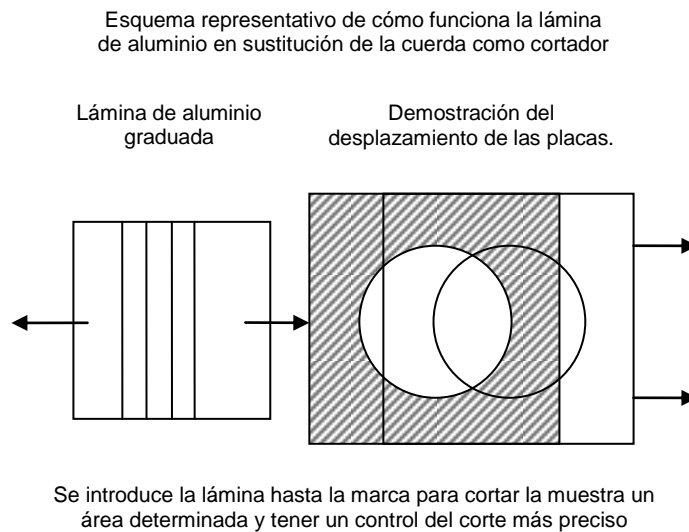
Para las pruebas CU, al no permite un cambio en el volumen ya que la presión de poro no es liberada, solo de manera parcial influye en un comportamiento más uniforme pero sin variar el resultado final que el suelo pueda mostrar. Caso contrario a la prueba CD donde partículas de agua fueron drenadas y las partículas del suelo toman la totalidad de la resistencia, teniendo un cambio de volumen mayor en comparación a las pruebas CU donde no se permitió el drenaje, este comportamiento se puede ver en la Figura 88, tiende a ser más recta la envolvente de falla con respecto de la envolvente de falla de la que la Figura 98, prueba CD.

Se aprecia claramente en los resultados que cuando se presentaba la grieta en la muestra, esta se propagaba e impide que se desarrolle resistencia residual ver Figura 99 y Figura 105 (pruebas CU y CD, respectivamente) y de la misma manera se observó que cuando la grieta no existía se lograba desarrollar este esfuerzo residual de manera mucho más marcada aunque con la limitante de que en algunos casos colapsaba y no mostraba realmente como debería de seguir desarrollándose esta resistencia residual ver Figura 100 y Figura 106, también vimos como en las pruebas CU, al no liberar la presión de poro y por lo tanto que no ocurriera un cambio en el volumen grande de la muestra, este se comportaba más uniforme y desarrollaba una cohesión aparente mayor y en contraste las pruebas CD mostraban lo opuesto, una disminución en la uniformidad de las envolventes y disminución de la cohesión debido a la liberación de presión de poro y por lo tanto una disminución del volumen de la muestra, teniendo comportamiento dispares, pero cuando se tenía similitud para ambas pruebas era cuando se tenía la muestra con grieta y esta no permitía el desarrollo del esfuerzo residual ya que colapsaba al propagarse la grieta cuando se sometía a un esfuerzo cortante.

## 5.3. Trabajos futuros.

También se propone utilizar la lámina de aluminio en vez de la cuerda de guitarra, dado que representa ser una mejor herramienta para lograr inducir la grieta en la muestra de suelo ver Figura 111.





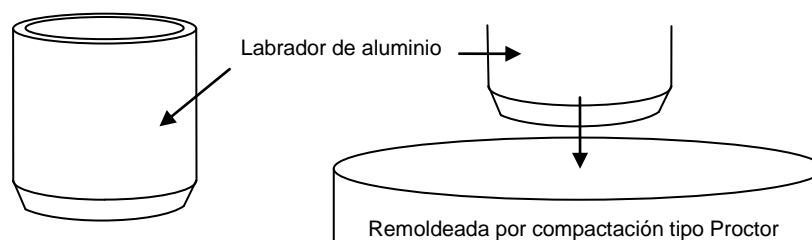
**Figura 111: Ejemplo de cómo funciona la implementación de una placa de aluminio para cortar la muestra.**

- a) La uniformidad de la lámina de aluminio para cortar la muestra e inducir la falla de manera mucho más uniforme de los que la cuerda nos provee.
- b) Se puede marcar en la lámina de aluminio con indicadores que nos permitan saber el grado de la falla, puede que se falle la muestra una cuarta parte, una tercera parte o la mitad, hasta una segunda parte o tres cuartas partes de la muestra con mayor precisión.
- c) La uniformidad de la falla con respecto de la cuerda, ya que esta última se curvaba dada rigidez de esta al ser tensada cuando se inducía la falla.

Realizar un mayor número de pruebas tanto con grieta y sin grieta para las pruebas CU y CD, nos puede ayudara a entender mejor, el comportamiento de los resultados que se obtuvieron en esta investigación, corroborando estos resultados y complementándolos.

Calibrar todo el equipo que se ocupa para realizar estas pruebas antes de comenzar con la investigación, para descartar posibles errores.

Fabricar un labrador de especímenes que se montaran en la máquina de corte directo, para descartar imperfecciones en el labrado de la muestra y que esta sea lo más uniforme posible ver Figura 112.



**Figura 112: labrador de aluminio para muestras de corte.**



## 6. Bibliografía.

González L; 2002, Mecánica de la Fractura: bases y aplicaciones, Páginas: 12-18.

Whitlow R; 1994, Fundamentos de Mecánica de Suelos 2da ed, Páginas: 231-277.

Badillo J; Rodríguez R; 2009, Mecánica de Suelos tomo 1: fundamentos de la mecánica de suelos, Páginas: 98-99, 123-143, 575-578.

González L, Ferrer M, Ortuño L, Oteo C; 2004, Ingeniería Geológica, Páginas: 430-651.

Smith G, Smith I; 1998, Elements of Soil Mechanics, Páginas: 127-130

Duncan J, Wright S; 2005, Soil Strength and Slope Stability, Páginas 213-221

Varios autores, 1992, Seminario taller de mecánica de suelos y exploración geotécnica, Páginas 1-227

LO, K. Y. and Lee, C. F; 1973, Géotechnique 23, No. 1, 1-11

Norma ASTM D3282, para clasificación de suelos.

SCT M-MMP-1-02/03, para clasificación de suelos.

SCT M-MMP-1-07/03, para LL y LP.

Norma ASTM D698 y D1557, para compactación tipo Proctor.

Norma ASTM C188-44, para peso específico de los sólidos.

SCT M-MMP-1-05/03, para peso específico de los sólidos.

Norma Española UNE 103401, para prueba de corte directo.



## 7. Anexos.

### 7.1. Anexo A: Límites y su clasificación.

#### Límite Líquido

Prueba No.	Cápsula No.	Número de golpes			Peso cápsula + suelo húmedo	Peso cápsula + suelo seco	Peso agua	Peso cápsula	Peso suelo seco	Contenido de agua
-	-	-	-	-	(grs.)	(grs.)	(grs.)	(grs.)	(grs.)	%
1	46	-	39	-	24.82	15.53	9.29	8.37	7.16	129.75
1	6	-	27	-	24.43	15.06	9.37	8.39	6.67	140.48
1	14	-	14	-	33.85	20.00	13.85	10.48	9.52	145.48

Tabla 40: datos generales de límite líquido.

#### Límite Plástico

Prueba No.	Cápsula No.	Peso cápsula + suelo húmedo	Peso cápsula + suelo seco	Peso agua	Peso cápsula	Peso suelo seco	Contenido de agua
-	-	(grs.)	(grs.)	(grs.)	(grs.)	(grs.)	%
1	15	13.42	11.72	1.70	8.55	3.17	53.63

Tabla 41: datos generales de límite plástico.

#### Humedad Natural

Prueba No.	Cápsula No.	Li	Lf	Peso cápsula + suelo húmedo	Peso cápsula + suelo seco	Peso agua	Peso cápsula	Peso suelo seco	Contenido de agua
-	-	(cm.)	(cm.)	(grs.)	(grs.)	(grs.)	(grs.)	(grs.)	%
CL	7	9.88	6.90	-	-	-	-	-	-
CV	3	-	-	104.71	90.85	13.86	80.58	10.27	134.96

Tabla 42: datos generales de humedad natural.

Cálculos para determinar los valores de LL, LP, IP, CL y CV

Área y volumen de cápsula no. 3

$$\emptyset = 3.85\text{cm.}$$

$$H = 1.56\text{cm.}$$

$$A = \pi \cdot \emptyset^2 / 4 = (3.1416)(3.85^2)/4 = 11.65\text{cm}^2.$$

$$v_i = A \cdot H = (11.65)(1.56) = 18.17\text{cm}^3.$$

$$v_f = 87.23 / 13.59 = 6.42\text{cm}^3.$$

Peso del mercurio

$$Hg = 87.23\text{grs. (Mercurio } 13.59\text{gr./cm}^3 = \text{Agua } 1\text{gr./cm}^3.)$$



Contracción Lineal

$$CL = Li - Lf / Li * 100 = 9.88 - 6.90 / 9.88 * 100 = 30.16\%$$

Contracción Volumétrica

$$CV = Wh - Ws - (Vi - Vf) \gamma_w / Ws * 100$$

$$CV = 24.13 - 10.27 - (18.17 - 6.42)(1) / 10.27 * 100 = 20.55\%$$

Se determina el límite líquido con la curva de flujo

X	Y
abscisas	ordenadas
39	129.75
27	140.48
14	145.48

Tabla 43: coordenadas del número de golpes y contenido de agua.

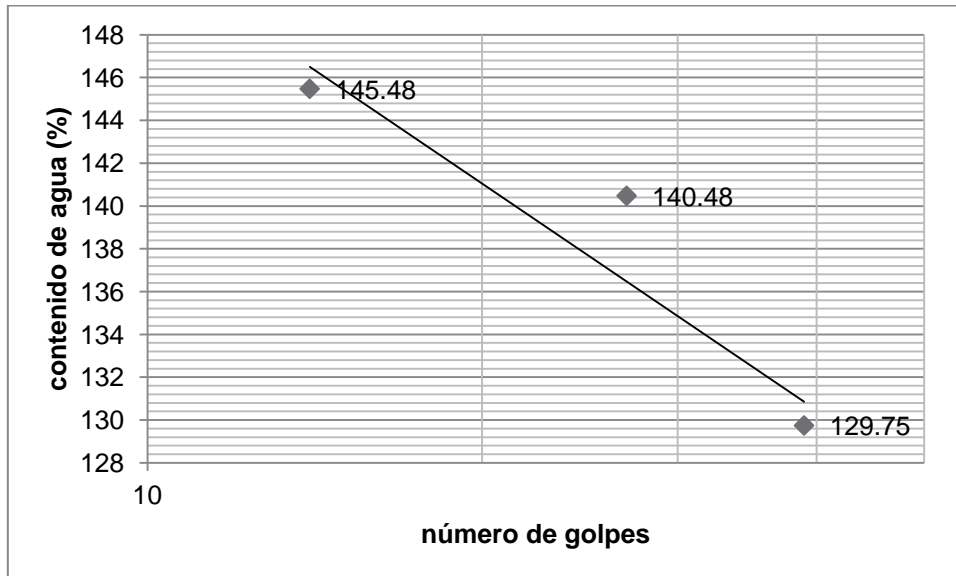


Figura 113: número de golpes y contenido de agua.

$$LL = 137\%$$

$$LP = 53.63\%$$

$$IP = LL - LP = 137 - 53.63 = 83.37\%$$

$$IP = 0.73 (LL - 20) = 0.73 (137 - 20) = 85.41\%$$



## 7.2. Anexo B: Humedad óptima.

Determinación de Humedad mediante compactación tipo Proctor.

Prueba No.	1-600ml.	2-660ml.	3-720ml.	4-780ml.
Peso molde + suelo húmedo (grs.)	3450	3465	3460	3480
Peso molde (grs.)	1980	1980	1980	1980
Peso suelo húmedo (grs.)	1470	1485	1480	1500
Peso específico húmedo (ton/m <sup>3</sup> .)	1.558	1.573	1.568	1.589
Cápsula No.	9	7	3	11
Peso cápsula + suelo húmedo (grs.)	270.7	375.4	278.5	311.5
Peso cápsula + suelo seco (grs.)	231.1	304.3	232.2	254.2
Peso agua (grs.)	39.6	71.1	46.3	57.3
Peso cápsula (grs.)	141.4	149.9	140.6	145.2
Peso suelo seco (grs.)	89.7	154.4	91.6	109
Contenido de agua %	44.15	46.05	50.55	52.57
Peso específico seco (ton/m <sup>3</sup> .)	1.081	1.077	1.042	1.042

Tabla 44: datos generales de la primera determinación de la humedad óptima.

$$\varnothing = 10.13\text{cm.}$$

$$H = 11.71\text{cm.}$$

$$A = \pi \cdot \varnothing^2 / 4 = (3.1416)(10.13^2)/4 = 80.59\text{cm}^2.$$

$$v_m = A \cdot H = (80.59)(11.71) = 943.77\text{cm}^3.$$

$$v_m: 943.77\text{cm}^3.$$

No. Capas: 3

No. Golpes/capa: 25

Se hace la determinación de que el contenido de agua es difícil de obtener y se hace otra prueba Proctor para prescindir de más valores.



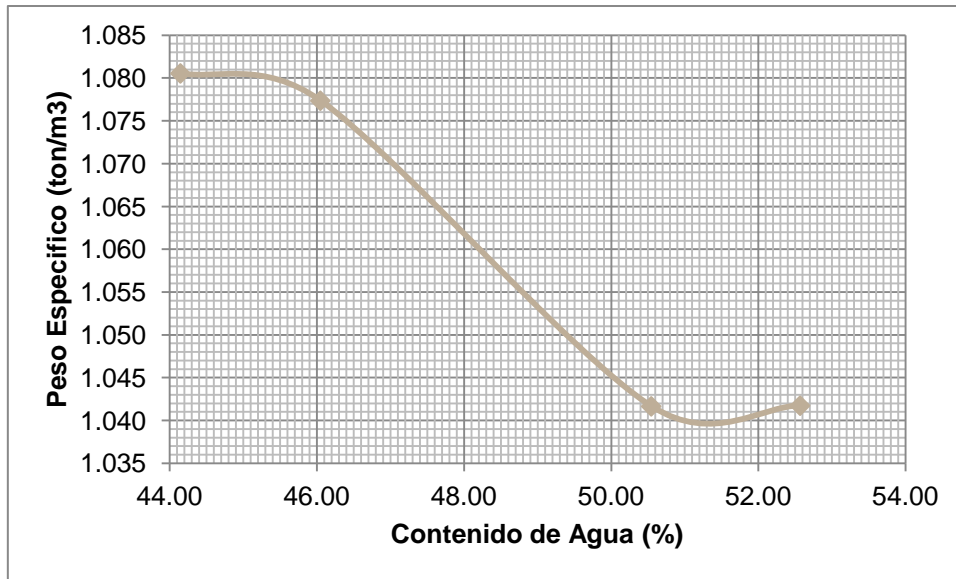


Figura 114: las primeras 4 determinaciones de la humedad óptima.

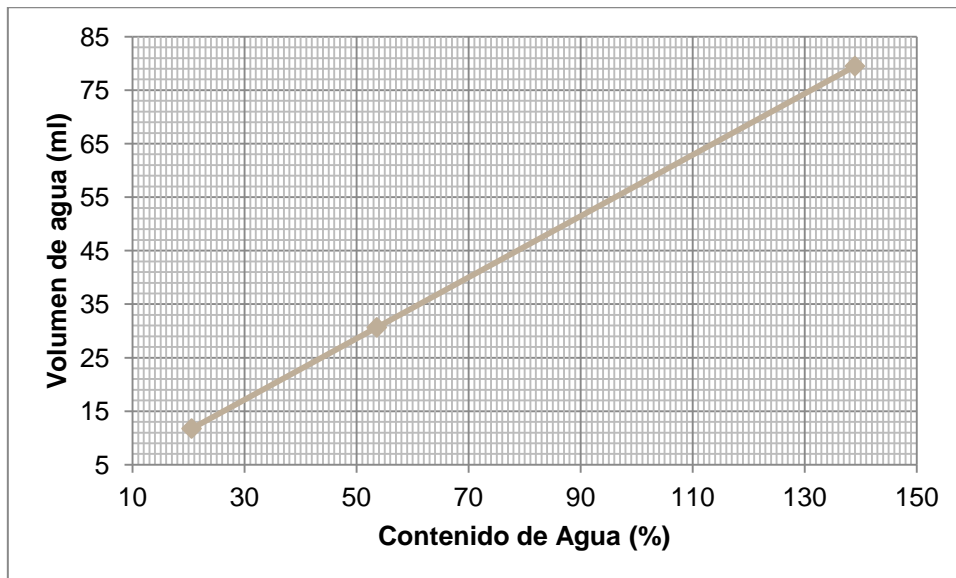


Figura 115: las primeras 4 determinaciones de volumen contra contenido de agua.

Determinación de Humedad mediante compactación tipo Proctor, extensión.

Prueba No.	0-150ml.	1-210ml.	2-270ml.	3-330ml.
Peso molde + suelo húmedo (grs.)	3230	3270	3325	3315
Peso molde (grs.)	1970	1970	1970	1970
Peso suelo húmedo (grs.)	1260	1300	1255	1345
Peso específico húmedo (ton/m <sup>3</sup> .)	1.335	1.377	1.330	1.425
Cápsula No.	0	1	2	3
Peso cápsula +	217.31	116.71	173.88	228.88



suelo húmedo (grs.)				
Peso cápsula + suelo seco (grs.)	199.71	106.41	156.77	205.28
Peso agua (grs.)	17.6	10.3	17.11	23.6
Peso cápsula (grs.)	134.76	71.32	100.22	140.55
Peso suelo seco (grs.)	64.95	35.09	56.55	64.73
Contenido de agua %	27.10	29.35	30.26	36.46
Peso específico seco (ton/m <sup>3</sup> .)	1.050	1.065	1.021	1.044

Tabla 45: datos generales de la segunda determinación de la humedad óptima.

$$\varnothing = 10.13\text{cm.}$$

$$H = 11.71\text{cm.}$$

$$A = \pi * \varnothing^2 / 4 = (3.1416)(10.13^2)/4 = 80.59\text{cm}^2.$$

$$v_m = A * H = (80.59)(11.71) = 943.77\text{cm}^3.$$

$$v_m: 943.77\text{cm}^3.$$

No. Capas: 3

No. Golpes/capa: 25

En la siguiente grafica podemos ver los cuatro puntos obtenidos de los ciclos de compactación tipo Proctor.

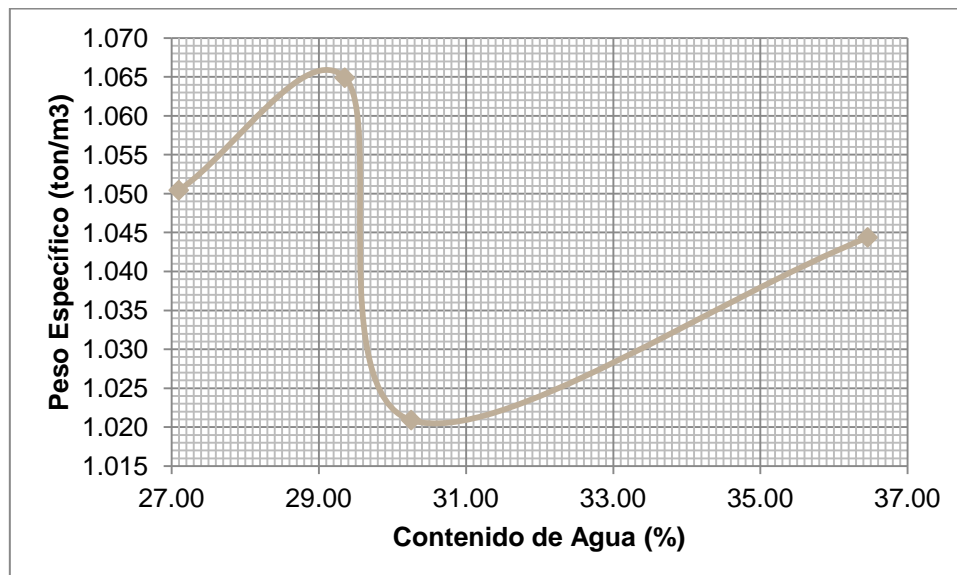


Figura 116: las segundas 4 determinaciones de la humedad óptima.

Se opta por hacer uso de los últimos 2 valores de la segunda determinación junto con los 4 valores de la primera determinación y determinar el contenido de agua, teniendo como resultado un óptimo de 44.75%  $\approx$  45% (aproximadamente).



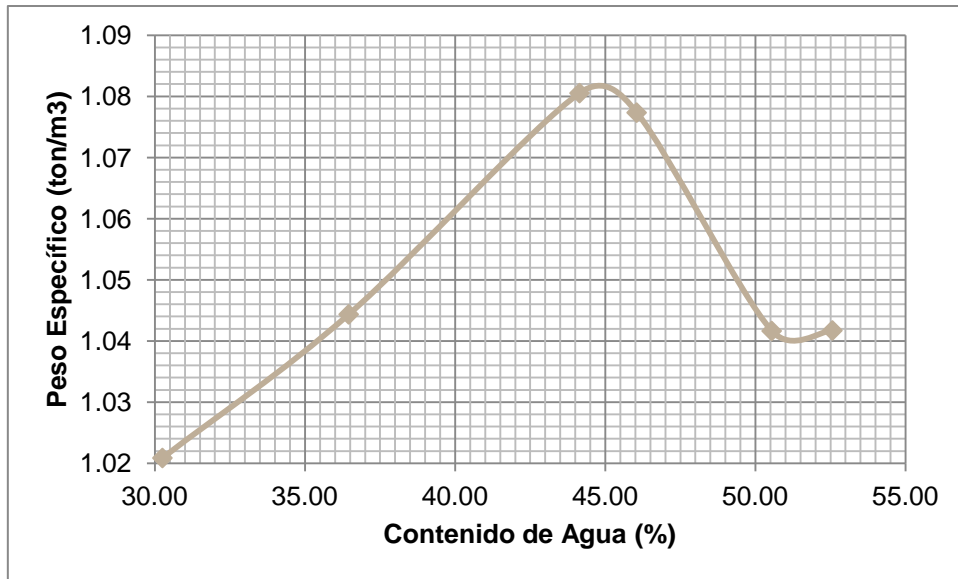


Figura 117: obtención de la humedad óptima con 6 determinaciones.



7.3. Anexo C: Densidad o Peso especifico relativo de los sólidos.

matraz 10		matraz 11		matraz 12	
temperatura	Wfw	temperatura	Wfw	temperatura	Wfw
°C	grs	°C	grs	°C	grs
8	692.8	5.5	692.2	5.5	697.8
16	691.8	22	691.1	23	696.5
23.5	691.1	28	690.7	29	695.6
30	690.2	33	690	35	694.6
36	689.8	38	689.2	40	693.6
42	688.3	44	687.8	43.5	692.6
matraz 10		matraz 11		matraz 12	
Wsfw (grs)	727.6	Wsfw (grs)	727.3	Wsfw (grs)	732.4
temp (°C)	32	temp (°C)	30.5	temp (°C)	33
Wfw (grs)	690	Wfw (grs)	690.3	Wfw (grs)	694.9
No. cápsula	A	No. cápsula	B	No. cápsula	3B
Wc+sd (grs)	822.4	Wc+sd (grs)	822.7	Wc+sd (grs)	820.5
Wcáps (grs)	762.8	Wcáps (grs)	762.9	Wcáps (grs)	763.3
Ws (grs)	59.6	Ws (grs)	59.8	Ws (grs)	57.2
Ss	2.709	Ss	2.623	Ss	2.904
		promedio			
sd = suelo seco		Ss 2.74515041			

Tabla 46: datos generales de la densidad relativa de los sólidos.

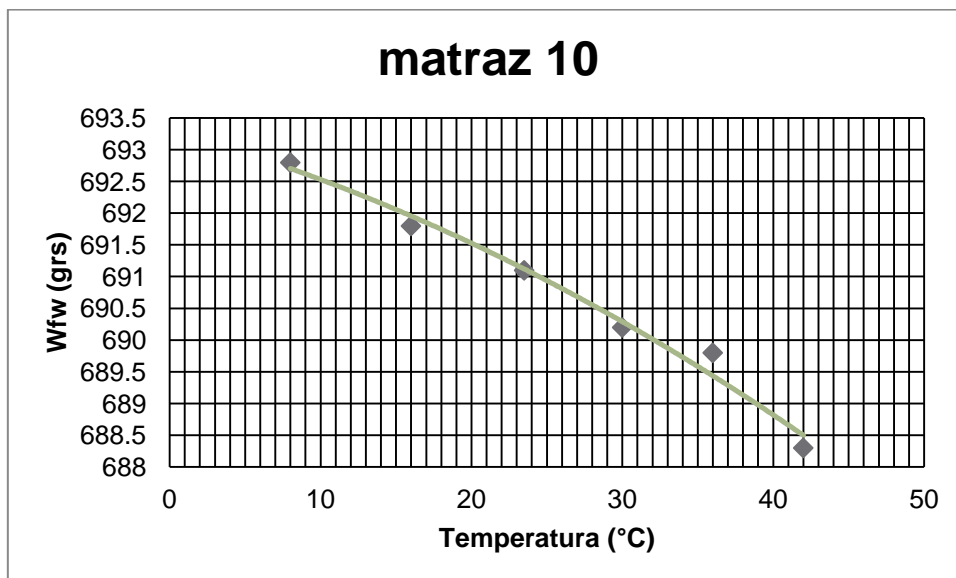


Figura 118: curva de calibración del matraz no.10.



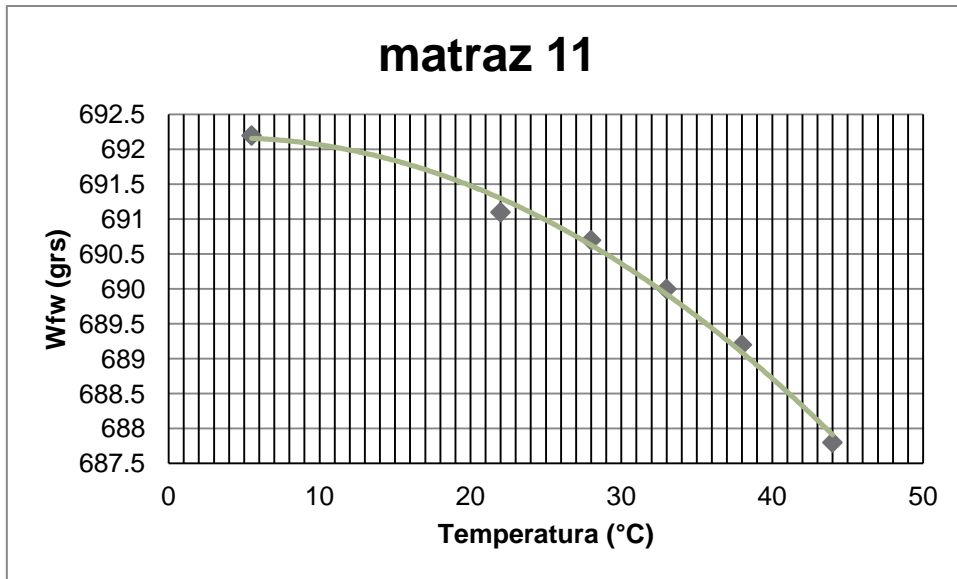


Figura 119: curva de calibración del matraz no.11.

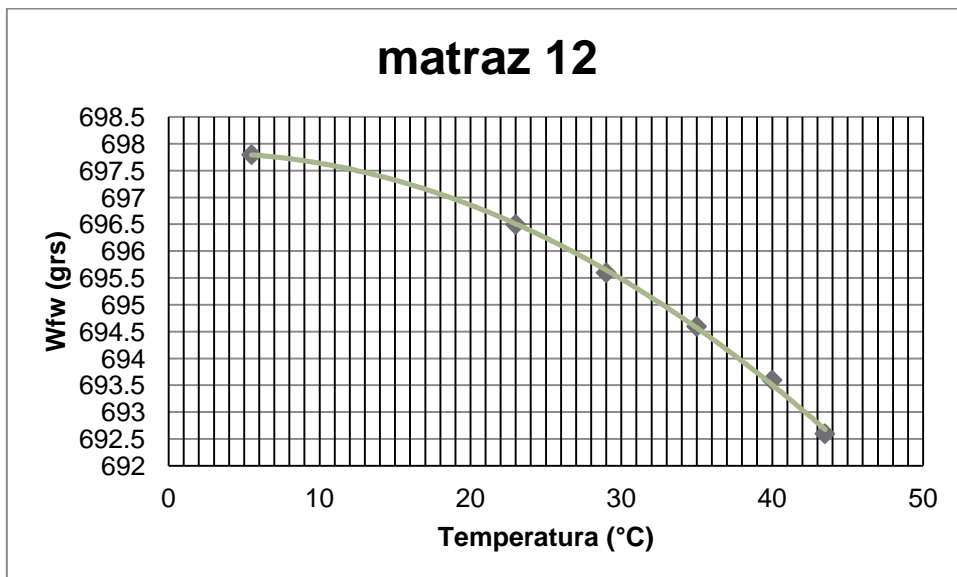


Figura 120: curva de calibración del matraz no.12.



7.4. Anexo D: Primeros ensayos C1-C4, fallada.

Primeras pruebas de corte directo, correspondientes a C1.

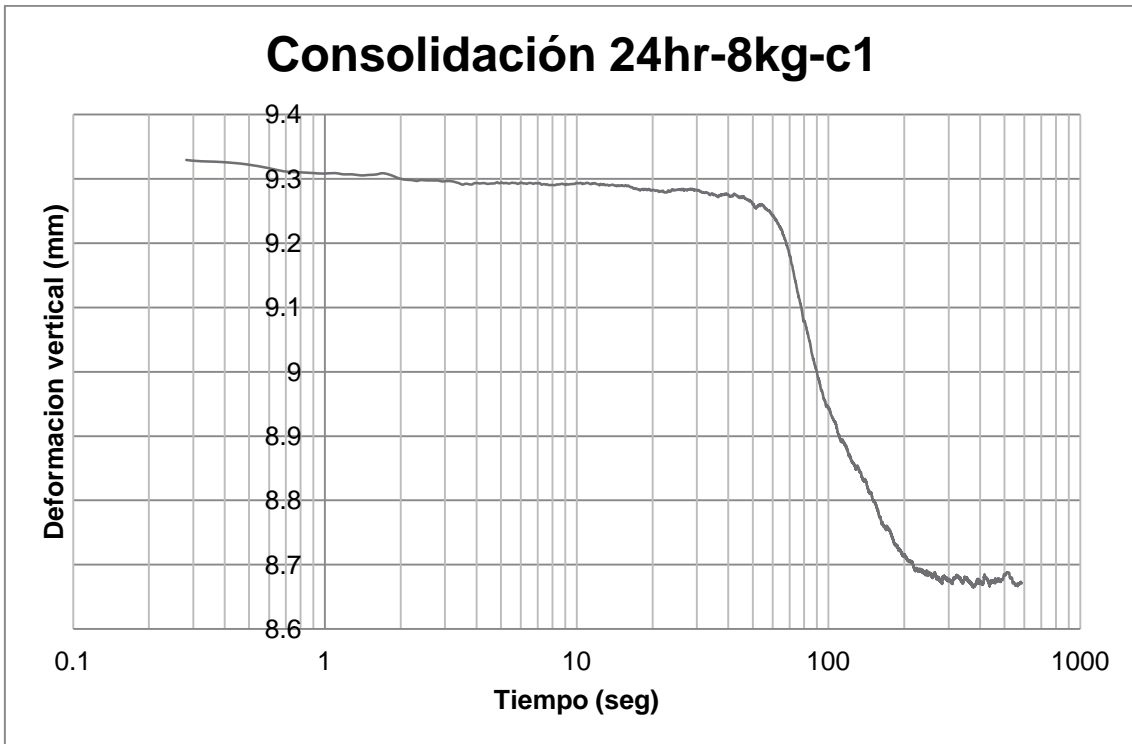


Figura 121: consolidación de la muestra C1.

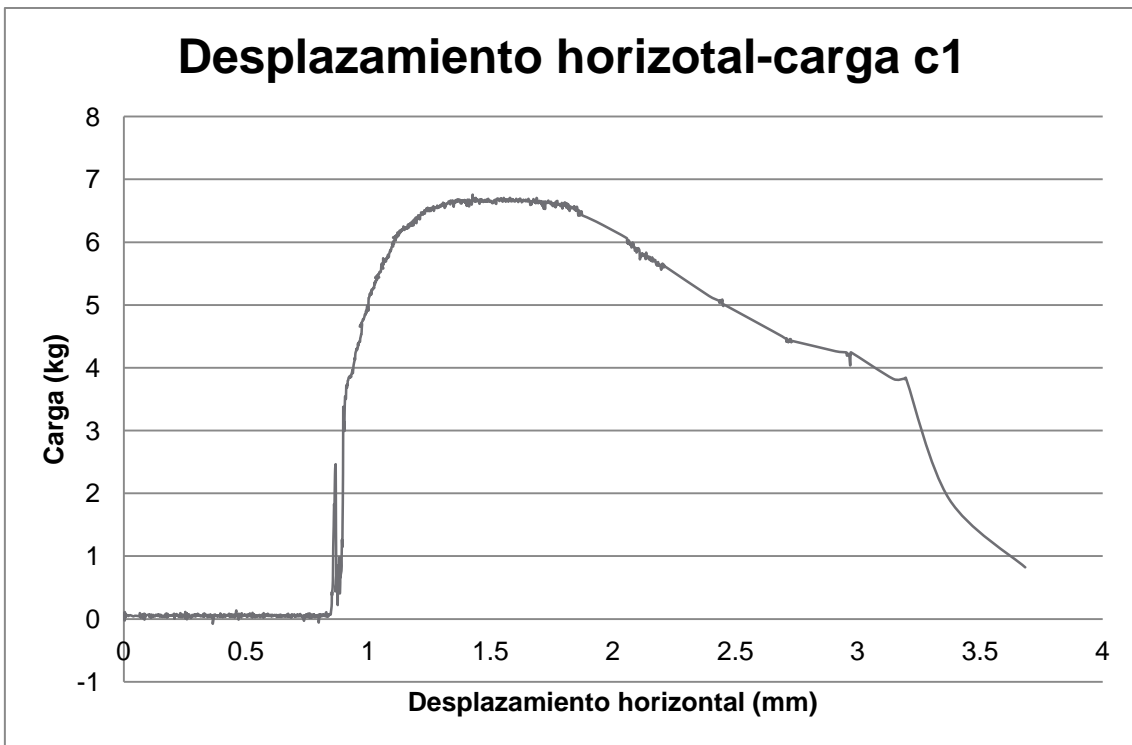


Figura 122: carga contra deformación de la muestra C1.



Primeras pruebas de corte directo, correspondientes a C2.

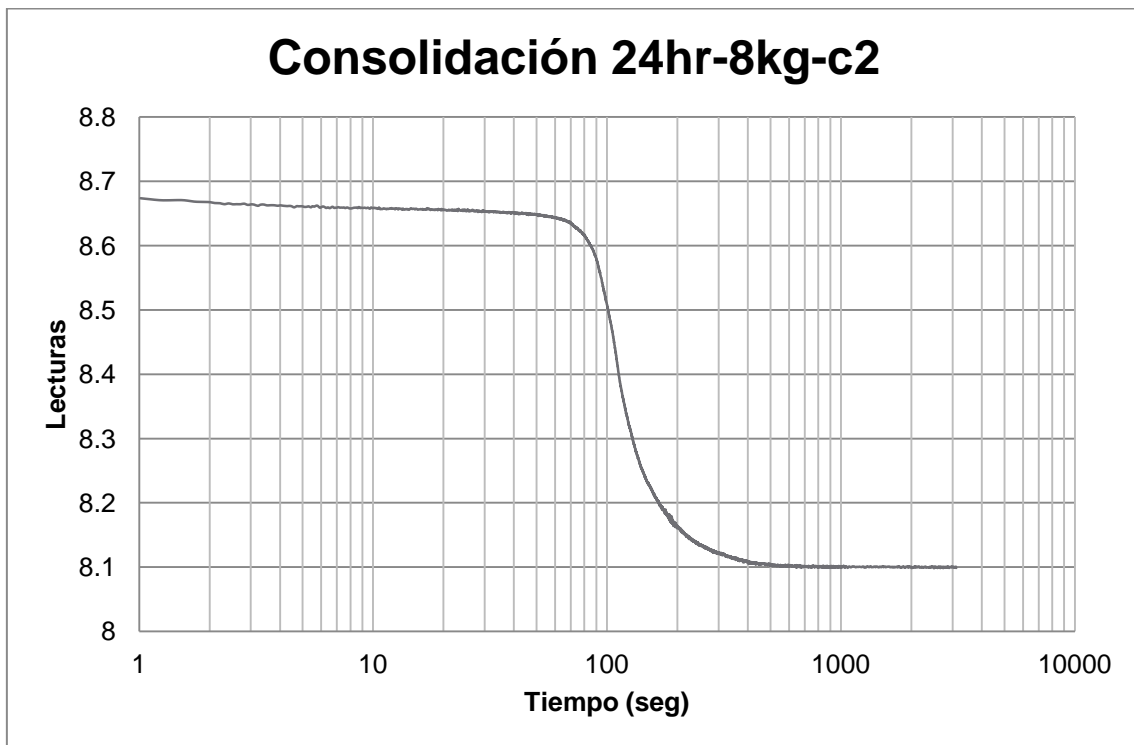


Figura 123: consolidación de la muestra C2.

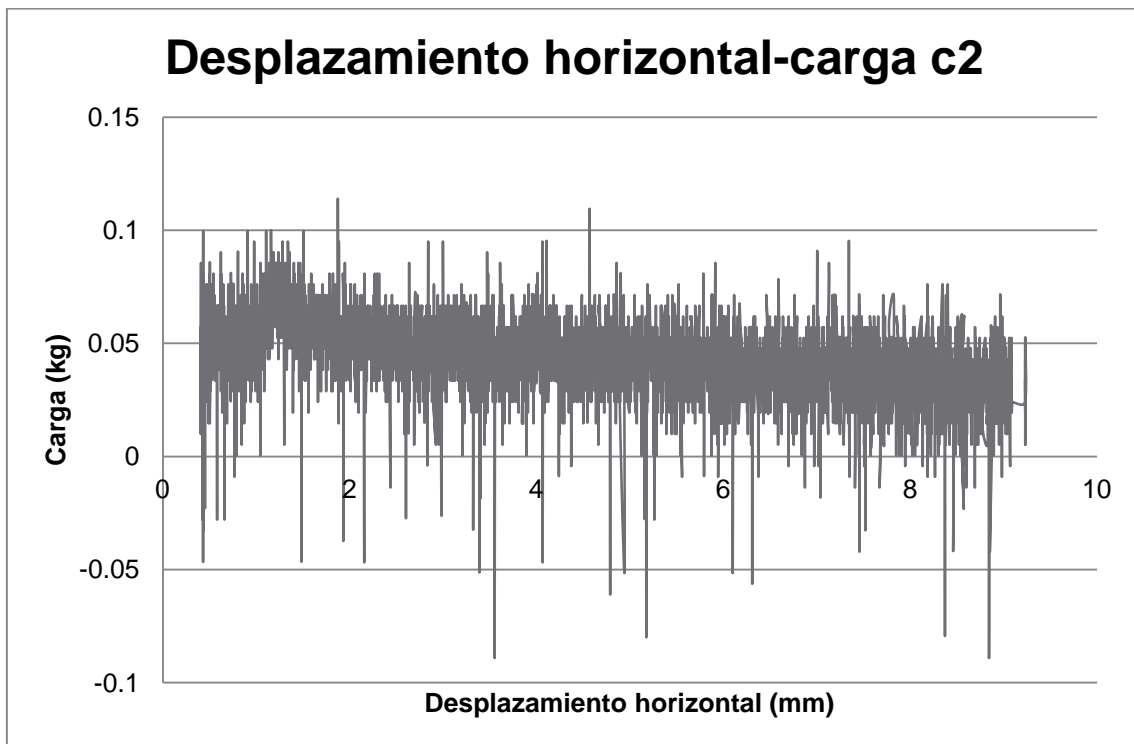


Figura 124: carga contra deformación de la muestra C2.



Primeras pruebas de corte directo, correspondientes a C3.

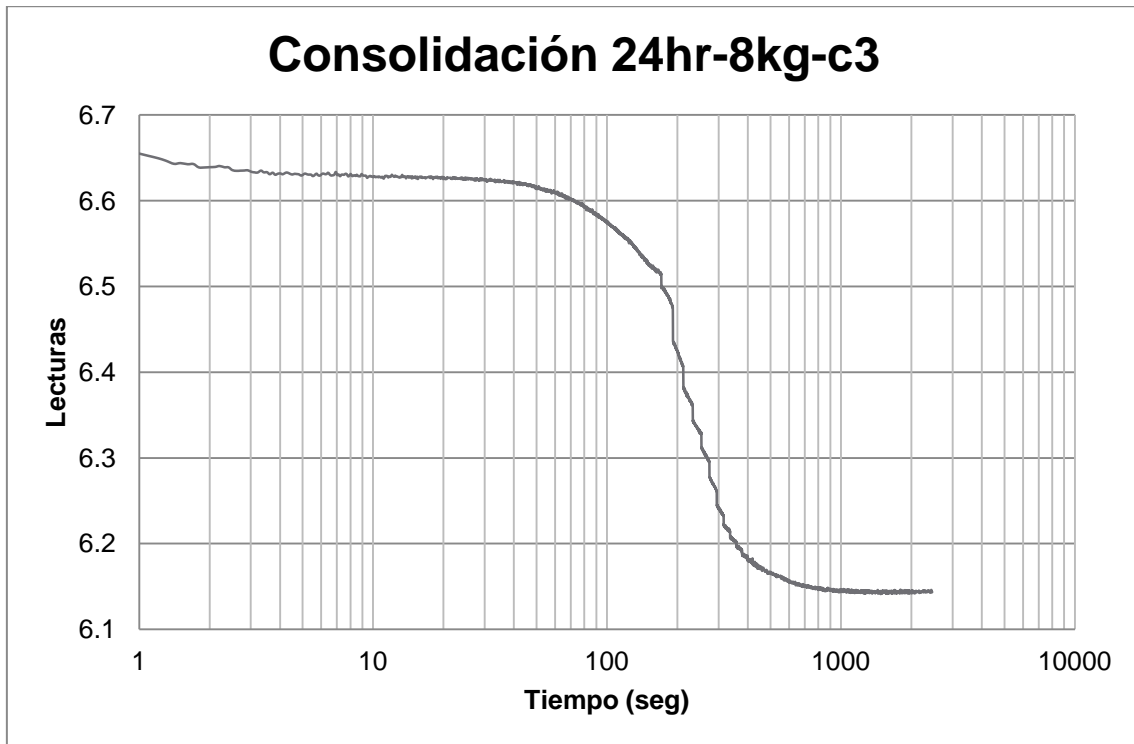


Figura 125: consolidación de la muestra C3.

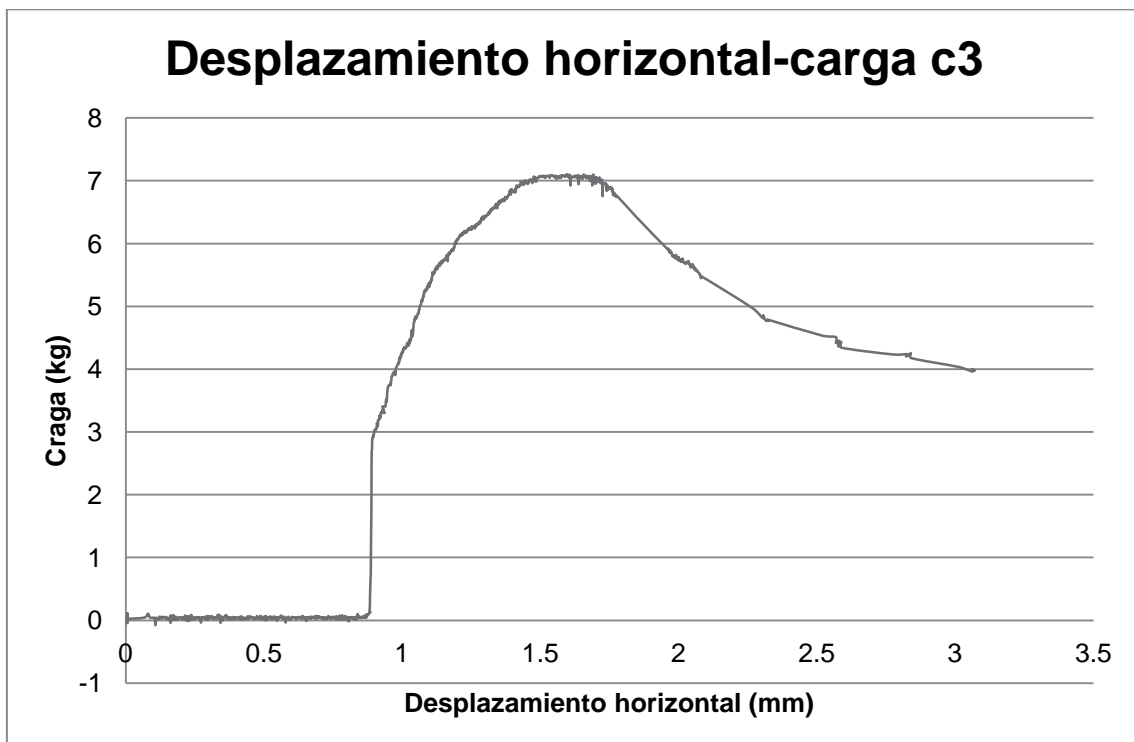


Figura 126: carga contra deformación de la muestra C3.



Primeras pruebas de corte directo, correspondientes a C4.

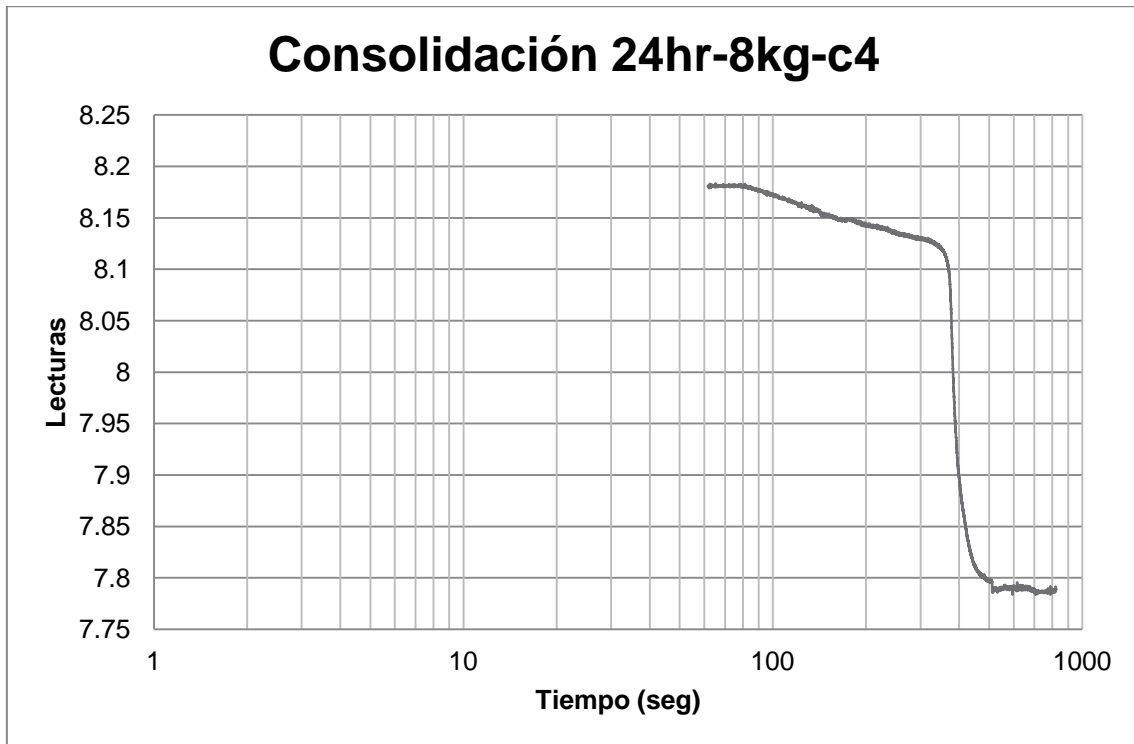


Figura 127: consolidación de la muestra C4.

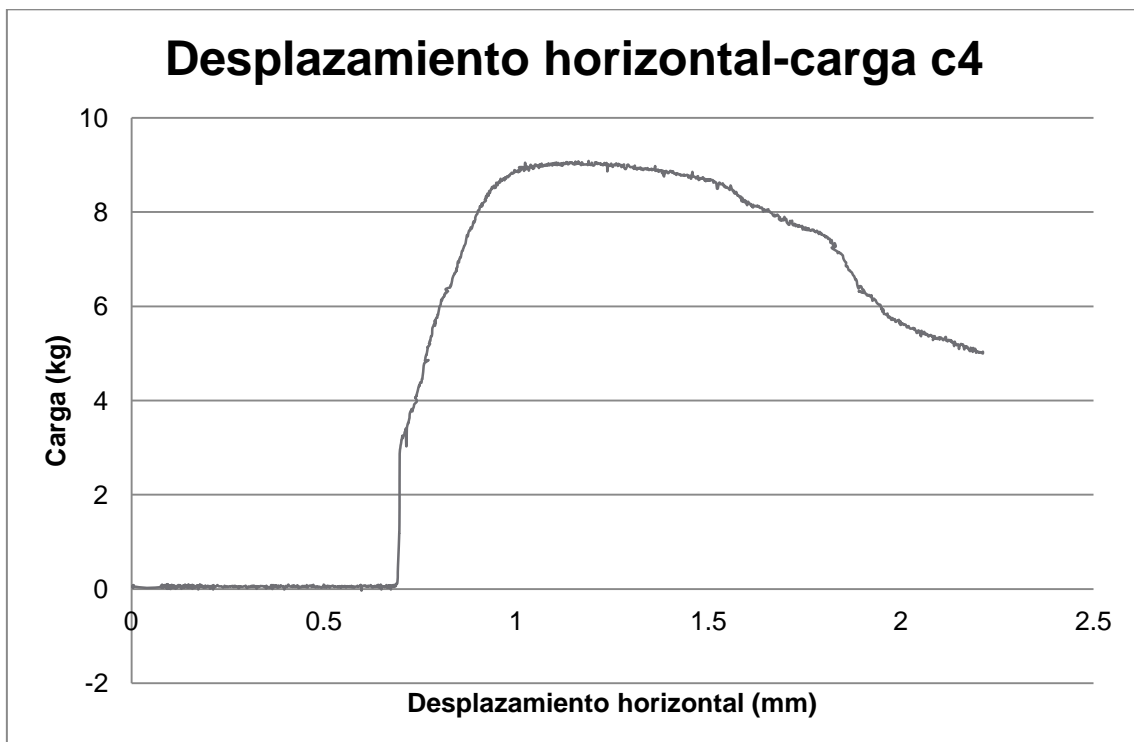


Figura 128: carga contra deformación de la muestra C4.



Primeras pruebas de corte directo, correspondientes a la fallada totalmente.

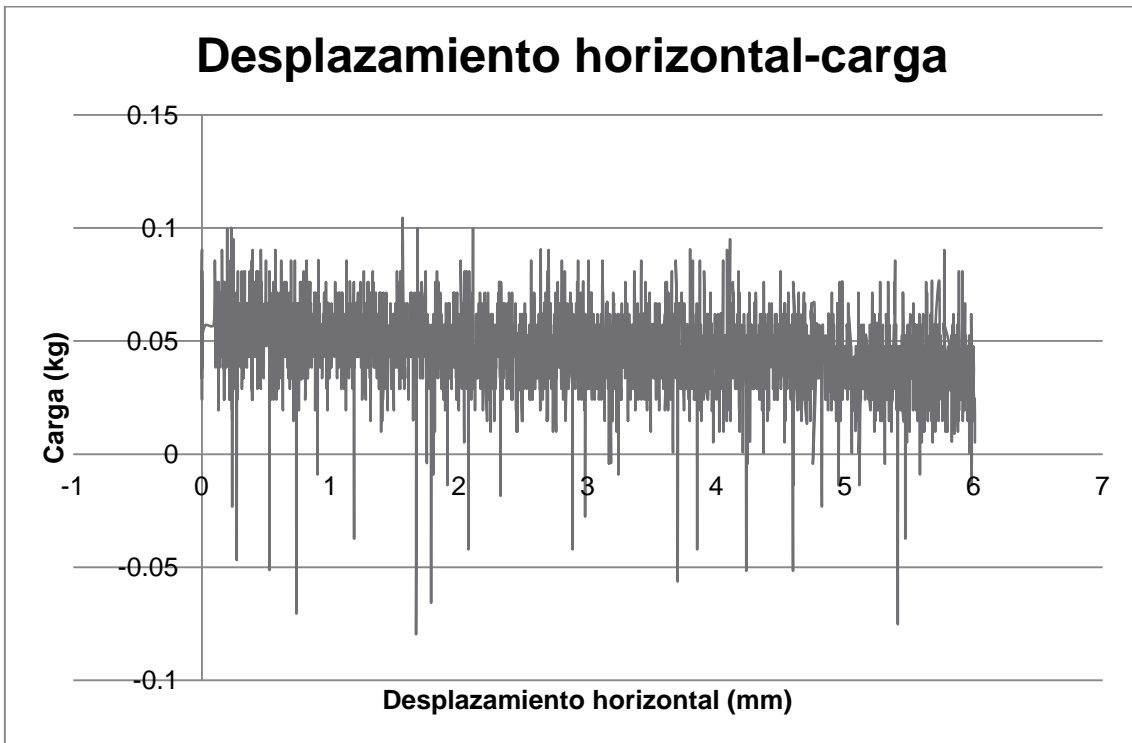


Figura 129: carga contra deformación de la muestra con grieta en la totalidad de la muestra.

**7.5. Anexo E: Segundos ensayos F, G y T.**

Prueba fallida F.

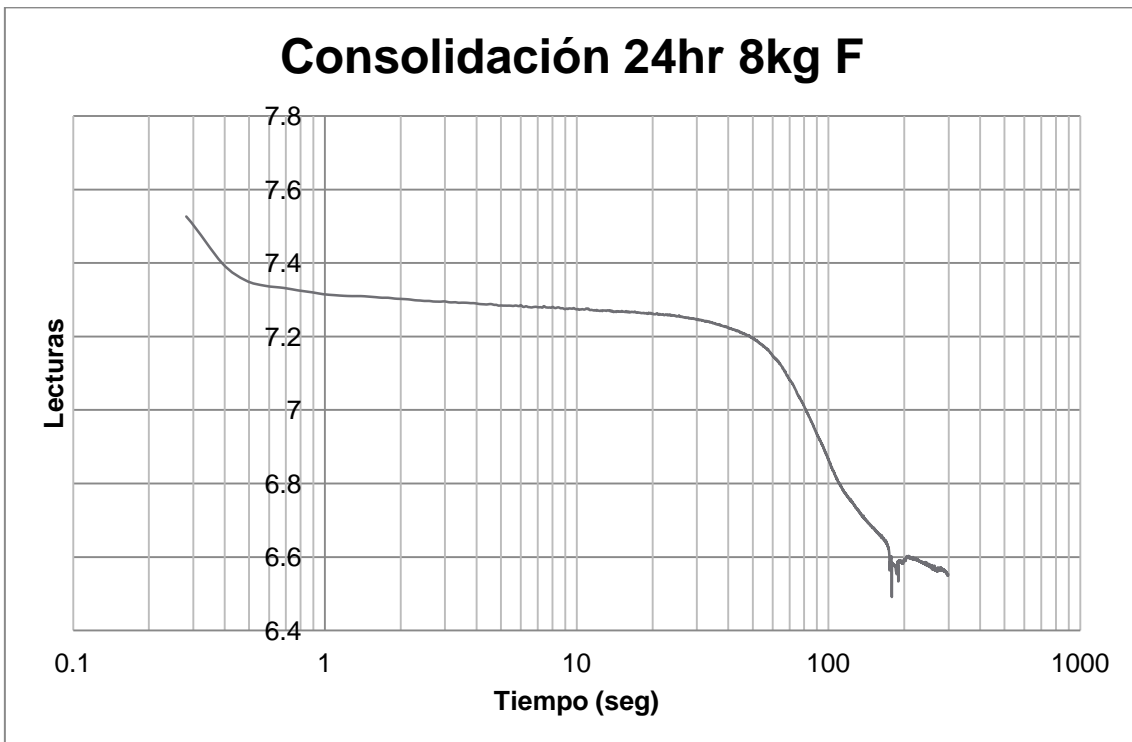


Figura 130: consolidación de la muestra F.



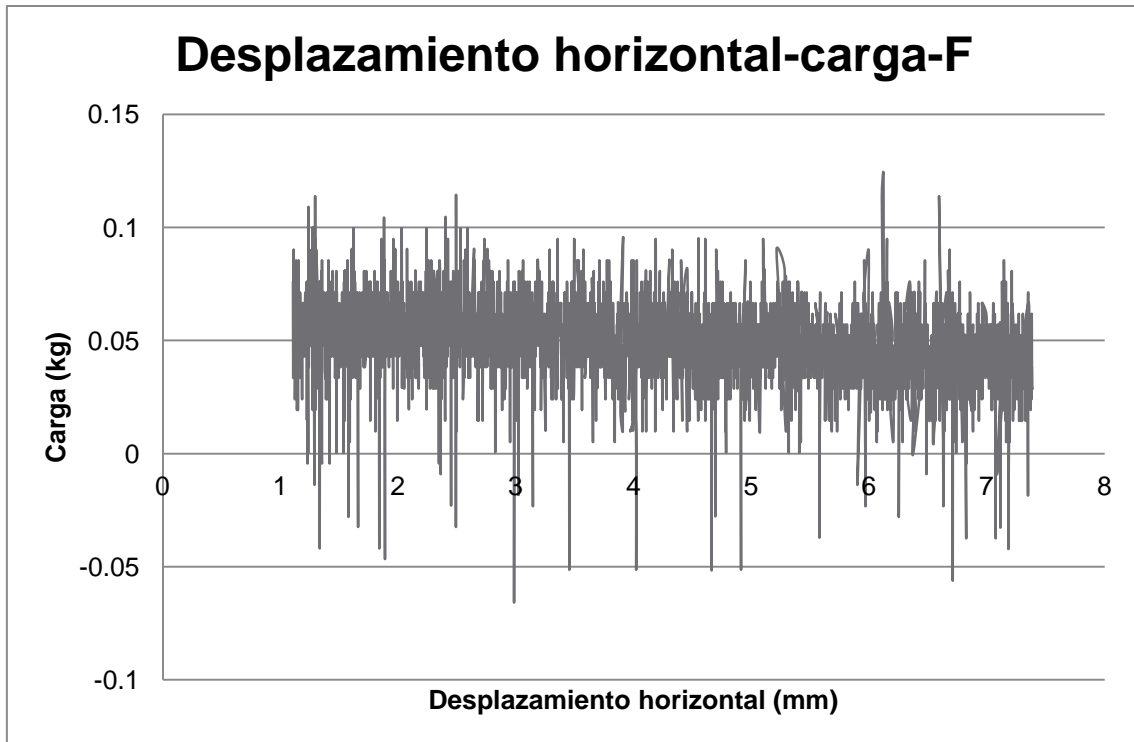


Figura 131: carga contra deformación de la muestra F.

### Prueba G.

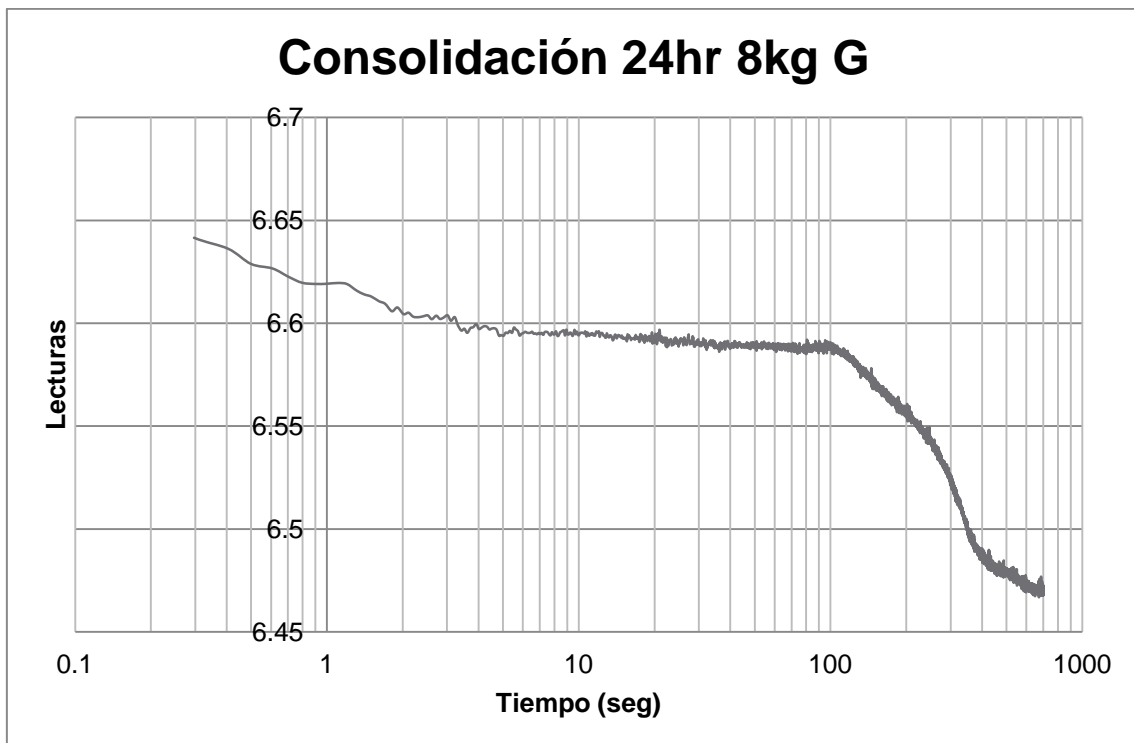


Figura 132: consolidación de la muestra G.



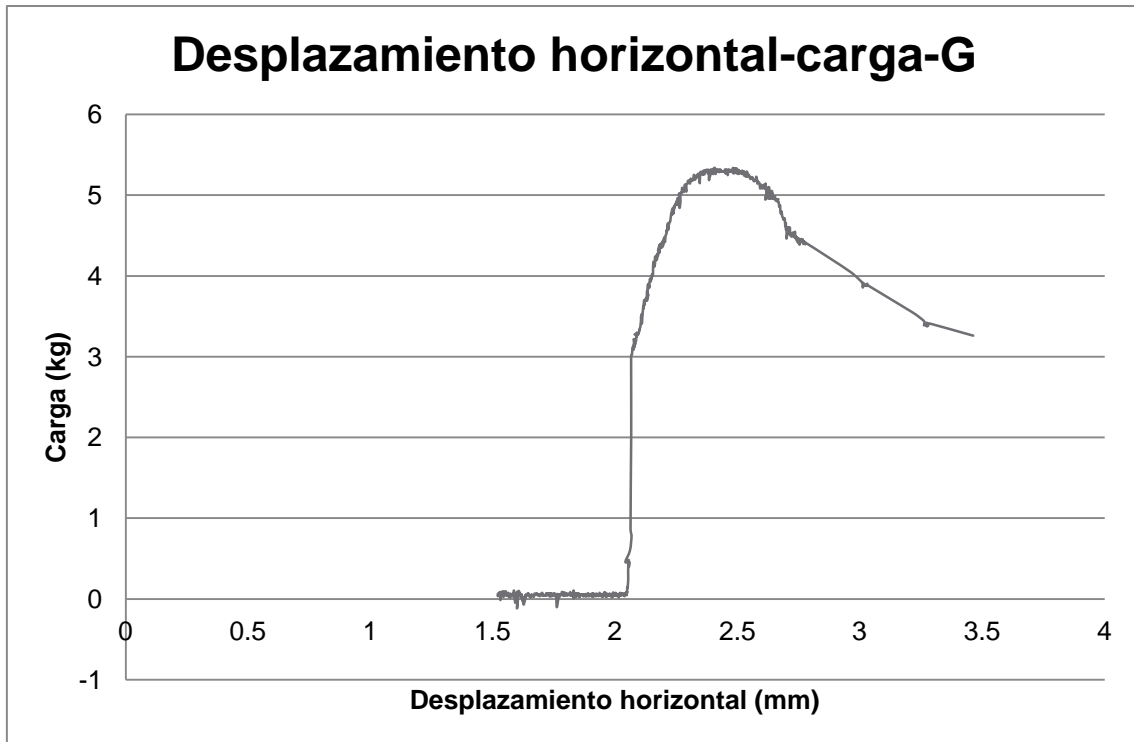


Figura 133: carga contra deformación de la muestra G.

Prueba T.

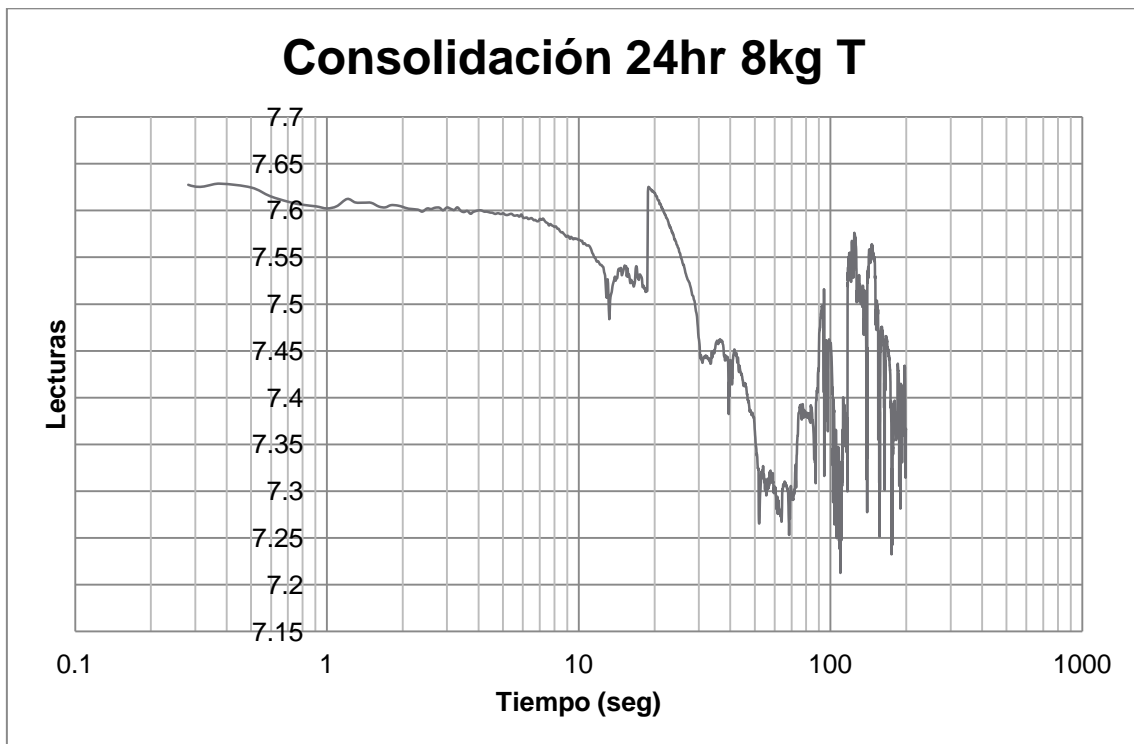


Figura 134: consolidación de la muestra T.



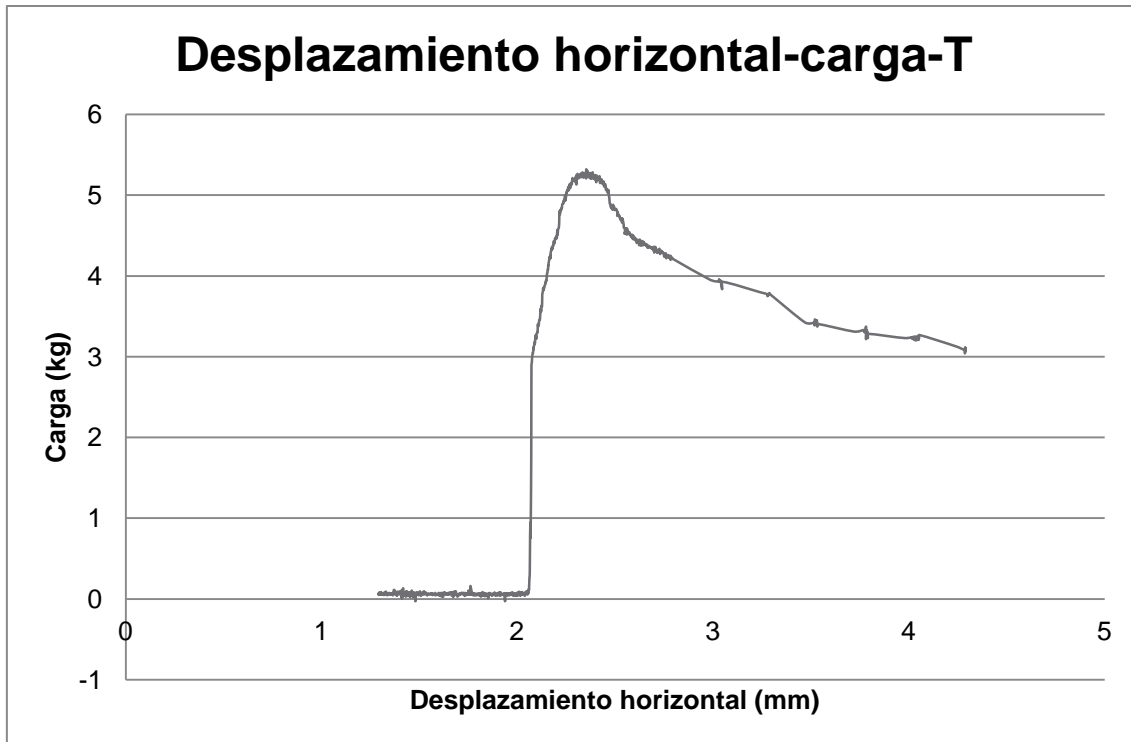


Figura 135: carga contra deformación de la muestra T.

## 7.6. Anexo F: Obtención de la energía específica.

Calculo de la energía específica.

$$Ee = \text{energía específica} = (N \cdot n \cdot W \cdot h) / V$$

N = número de golpes

n = número de capas

W = peso del pisón (kg)

h = altura de caída del pisón (cm)

V = volumen del molde de compactación tipo Proctor. (cm<sup>3</sup>)

$$Ee = (25)(3)(2.5)(30.5) / (943.77) = 6.06 \text{ kg/cm}^2$$



### 7.7. Anexo G: Determinación $t_{50}$ .

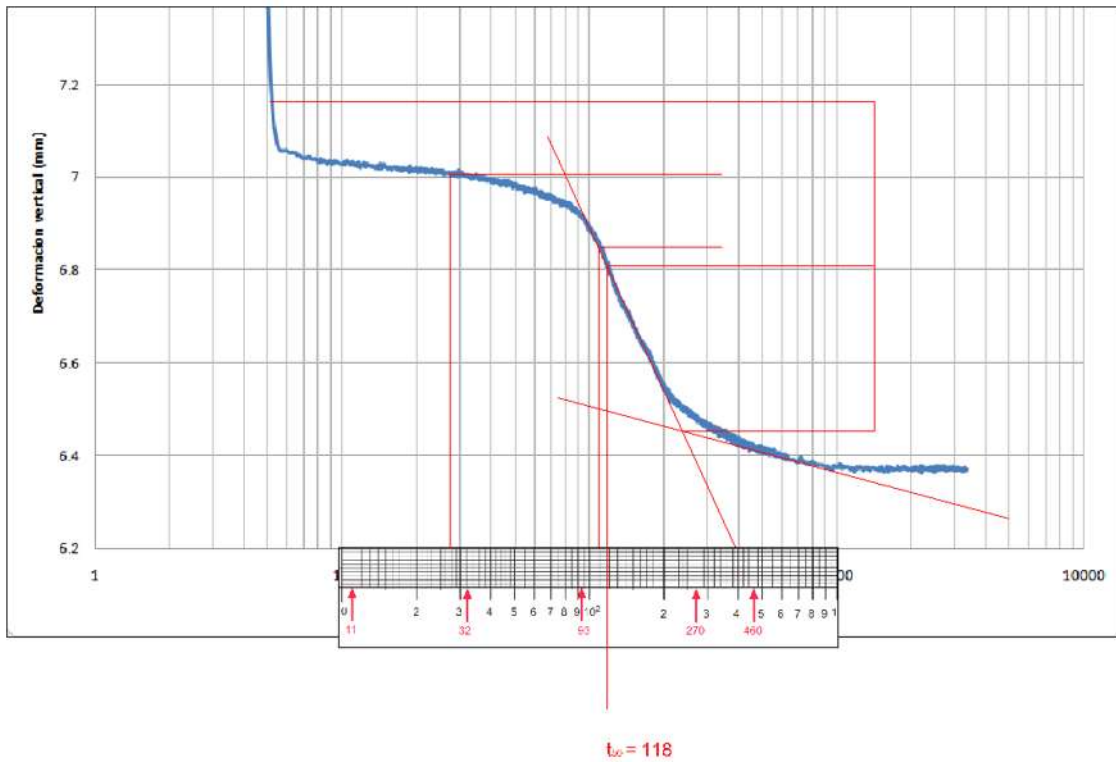


Figura 136: curva de consolidación para determinar  $t_{50}$ .

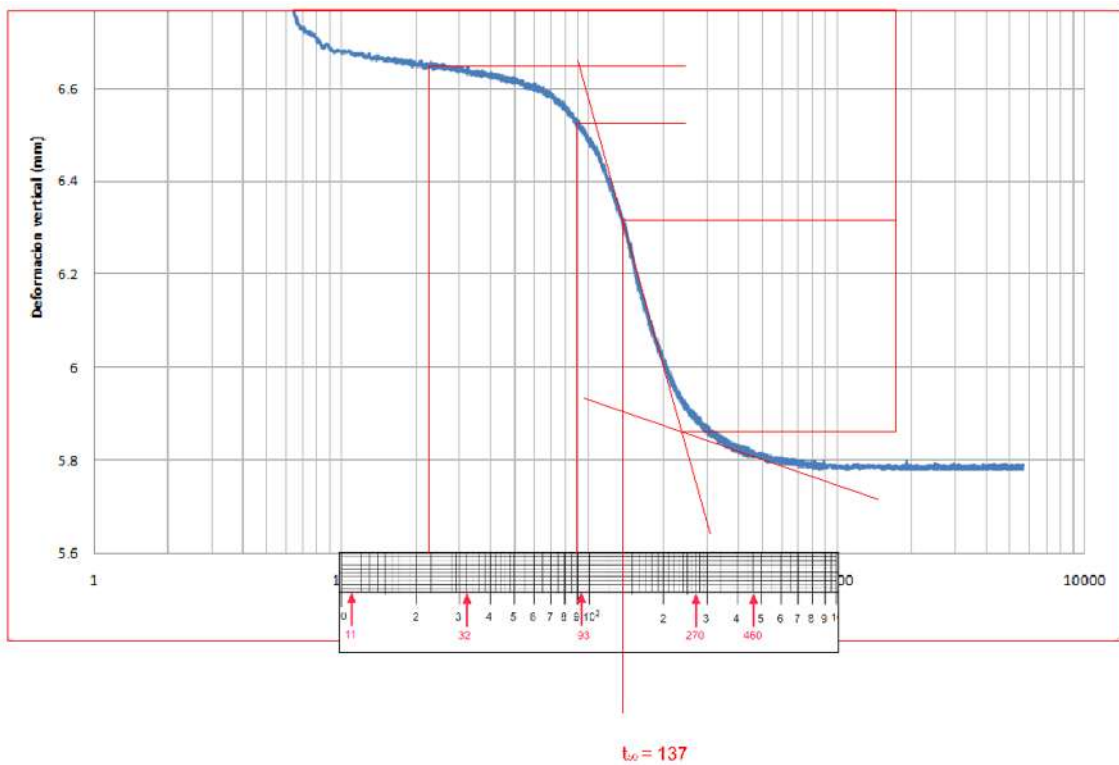


Figura 137: curva de consolidación para determinar  $t_{50}$ .

Cálculos de  $t_{50}$  para determinar la velocidad final.

$t_{50}$  figura A = 118 seg



$$t_{50} \text{ figura B} = 137 \text{ seg}$$

$$t_{50} \text{ promedio} = 127.5 \text{ seg}$$

Convirtiendo a minutos, se tiene:  $127.5 \text{ (seg)} / 60 \text{ (seg / min)} = 2.13 \text{ min.}$

$t_{50} = 127.5 \text{ segundos promedio de las figuras A y B.}$

$$t_{50f} = 2.13 \text{ minutos.}$$

$$t_f = (50) * t_{50}$$

$$t_f = (50) * 2.13 = 106.5 \text{ minutos.}$$

$$V_f = D_f / t_f$$

Donde  $D_f = 5 \text{ milímetros de desplazamiento esperado. (También puede ser 7mm).}$

$$V_f = 5 / 106.5 = 0.047 \text{ mm/min.}$$

### 7.8. Anexo H: Resumen pruebas con y sin grieta, CU y CD.

#### 7.7.1. Prueba consolidada no drenada CU.

Para términos prácticos solo se mostraran las hojas de cálculo en su inicio y no en su totalidad, para que el documento anexo H no sea demasiado extenso, ya que en algunas hojas de cálculo se rebasan los 14000 datos, a continuación comenzaremos con los datos básicos de las pruebas y después con la segunda fase.

#### Muestra I y I.I CU

Muestras	Diametro φ (cm)	Altura h (cm)	Area A (cm2)	Volumen V (cm3)	Peso húmedo ini Whi (gr)	Peso hf+ch Whf+Wch (gr)	Peso húmedo fi Whf (gr)	Peso Charola Wch (gr)	Peso s+ch Ws+Wch (gr)	Peso seco Ws (gr)	edad de lab HI (%)	edad de prueba Hp (%)
I												
1	4.87	2.84										
2	4.95	2.86										
3	4.86	2.89										
4	4.86	2.88										
total	4.885	2.868	18.742	53.743	82.025	162.980	92.490	70.490	128.3	57.810	41.887	59.990
I.I												
1	4.79	3.32										
2	4.86	3.32										
3	4.93	3.31										
4	4.9	3.33										
total	4.870	3.320	18.627	61.842	85.050	165.370	94.880	70.490	129.3	58.810	44.618	61.333

Tabla 46: valores generales de las muestras I y I.I CU.

#### Muestra II y II.I CU

Muestras	Diametro φ (cm)	Altura h (cm)	Area A (cm2)	Volumen V (cm3)	Peso húmedo ini Whi (gr)	Peso hf+ch Whf+Wch (gr)	Peso húmedo fi Whf (gr)	Peso Charola Wch (gr)	Peso s+ch Ws+Wch (gr)	Peso seco Ws (gr)	edad de lab HI (%)	edad de prueba Hp (%)
II												
1	4.95	3.1										
2	4.95	3										
3	4.96	2.97										
4	4.98	3										
total	4.960	3.018	19.322	58.304	91.15	170.43	99.940	70.490	135.01	64.520	41.274	54.898
II.I												
1	4.96	2.9										
2	4.99	2.92										
3	4.97	2.9										
4	4.97	2.89										
total	4.973	2.903	19.420	56.365	87.61	168.02	97.530	70.490	133.15	62.660	39.818	55.650

Tabla 47: valores generales de las muestras II y II.I CU.

#### Muestra III y III.I



Muestras	Diametro φ (cm)	Altura h (cm)	Area A (cm <sup>2</sup> )	Volumen V (cm <sup>3</sup> )	Mo humedo ini Whi (gr)	Peso hf+ch Whf+Wch (gr)	Mo humedo fi Whf (gr)	Peso Charola Wch (gr)	Peso s+ch Ws+Wch (gr)	Peso seco Ws (gr)	Medida de labnidad de prueba HI (%)	Hp (%)
<b>III</b>												
1	4.97	2.95										
2	4.95	2.95										
3	4.97	2.95										
4	4.98	2.88										
<b>total</b>	<b>4.968</b>	<b>2.933</b>	<b>19.381</b>	<b>56.833</b>	<b>88.01</b>	<b>166.76</b>	<b>96.270</b>	<b>70.490</b>	<b>132.13</b>	<b>61.640</b>	<b>42.781</b>	<b>56.181</b>
<b>III.I</b>												
1	4.94	2.91										
2	4.94	2.92										
3	4.91	3.02										
4	4.99	2.97										
<b>total</b>	<b>4.945</b>	<b>2.955</b>	<b>19.205</b>	<b>56.752</b>	<b>89.08</b>	<b>152.2</b>	<b>98.120</b>	<b>54.080</b>	<b>116.73</b>	<b>62.650</b>	<b>42.187</b>	<b>56.616</b>

NOTA: nomenclatura I, II, III para muestras a probar con induccion de corte, I.I, II.I, III.I para muestras de control respectivamente

Tabla 48: tabla de valores generales de las muestras III y III.I CU.

Consolidación CU muestra I esfuerzo normal 0.419kg/cm<sup>2</sup>

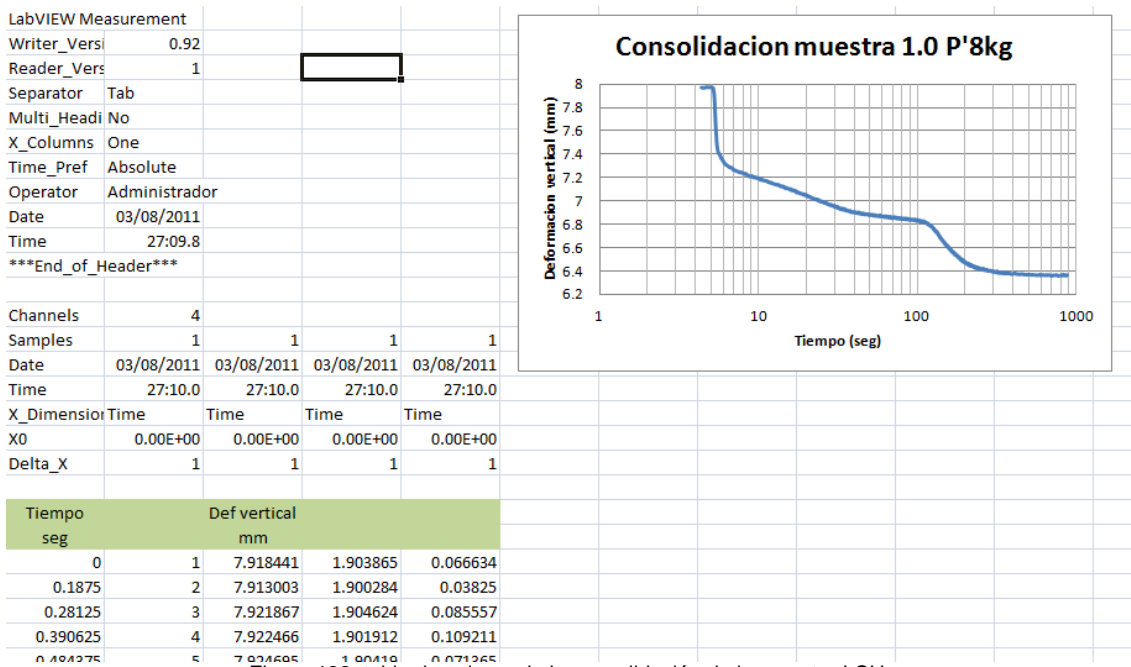
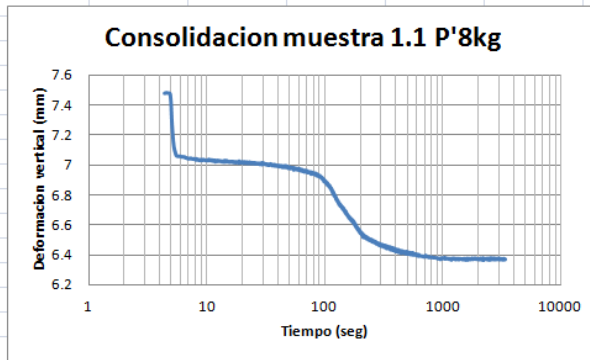


Figura 138: tabla de valores de la consolidación de la muestra I CU.

Consolidación CU muestra I.I esfuerzo norma 0.419kg/cm<sup>2</sup>



LabVIEW Measurement  
 Writer\_Versi 0.92  
 Reader\_Vers 1  
 Separator Tab  
 Multi\_Head No  
 X\_Columns One  
 Time\_Pref Absolute  
 Operator Administrador  
 Date 04/08/2011  
 Time 14:05.9  
 \*\*\*End\_of\_Header\*\*\*



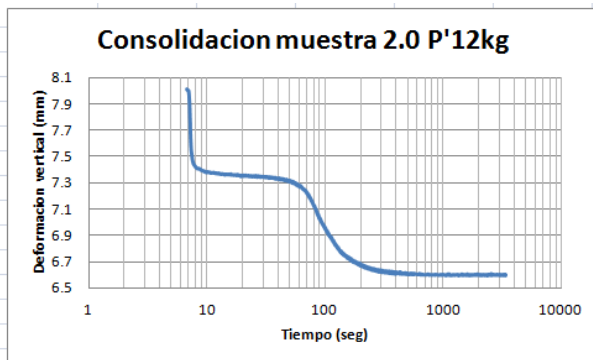
Channels 4  
 Samples 1 1 1 1  
 Date 04/08/2011 04/08/2011 04/08/2011 04/08/2011  
 Time 14:14:06 14:14:06 14:14:06 14:14:06  
 X\_Dimension Time Time Time Time  
 X0 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00  
 Delta\_X 1 1 1 1

Tiempo seg	Def vertical mm
0	7.475006
0.171875	7.478161
0.28125	7.480173
0.375	7.478052

Figura 139: tabla de valores de la consolidación de la muestra I.I CU.

Consolidación CU muestra II esfuerzo normal 0.614kg/cm<sup>2</sup>

LabVIEW Measurement  
 Writer\_Versi 0.92  
 Reader\_Vers 1  
 Separator Tab  
 Multi\_Head No  
 X\_Columns One  
 Time\_Pref Absolute  
 Operator Administrador  
 Date 08/08/2011  
 Time 46:00.7  
 \*\*\*End\_of\_Header\*\*\*



Channels 4  
 Samples 1 1 1 1  
 Date 08/08/2011 08/08/2011 08/08/2011 08/08/2011  
 Time 46:00.8 46:00.8 46:00.8 46:00.8  
 X\_Dimension Time Time Time Time  
 X0 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00  
 Delta\_X 1 1 1 1

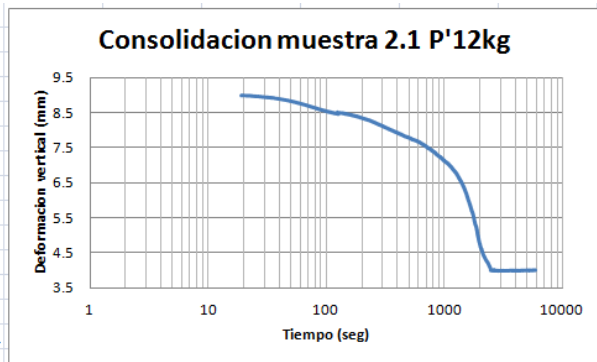
Tiempo seg	Def vertical mm
0	7.992728
0.15625	7.993217
0.265625	7.99474
0.359375	7.991042

Figura 140: tabla de valores de la consolidación de la muestra II CU.



Consolidación CU muestra II.I esfuerzo normal 0.614kg/cm<sup>2</sup>

LabVIEW Measurement				
Writer_Versi	0.92			
Reader_Versi	1			
Separator	Tab			
Multi_Head	No			
X_Columns	One			
Time_Pref	Absolute			
Operator	Administrador			
Date	09/08/2011			
Time	44:34.6			
***End_of_Header***				
Channels	4			
Samples	1 1 1 1			
Date	09/08/2011 09/08/2011 09/08/2011 09/08/2011			
Time	44:34.8 44:34.8 44:34.8 44:34.8			
X_Dimension	Time	Time	Time	Time
X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Delta_X	1	1	1	1

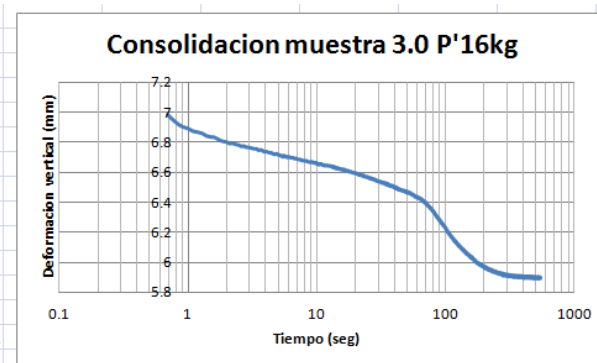


Tiempo seg	Def vertical mm			
0	1	9.541269	1.671117	0.061904
0.203125	2	9.449798	1.66949	0.080827
0.296875	3	9.282898	1.673179	0.10448
0.40625	4	9.193276	1.67562	0.080827
0.5	5	9.149791	1.675402	0.076096

Figura 141: tabla de valores de la consolidación de la muestra II.I CU.

Consolidación CU muestra III esfuerzo normal 0.818kg/cm<sup>2</sup>

LabVIEW Measurement				
Writer_Versi	0.92			
Reader_Versi	1			
Separator	Tab			
Multi_Head	No			
X_Columns	One			
Time_Pref	Absolute			
Operator	Administrador			
Date	16/08/2011			
Time	27:54.0			
***End_of_Header***				
Channels	4			
Samples	1 1 1 1			
Date	16/08/2011 16/08/2011 16/08/2011 16/08/2011			
Time	27:54.1 27:54.1 27:54.1 27:54.1			
X_Dimension	Time	Time	Time	Time
X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Delta_X	1	1	1	1



Tiempo seg	Def vertical mm			
0	1	8.121669	1.430015	0.080827
0.1875	2	7.99213	1.431208	0.090288
0.28125	3	7.627169	1.430503	0.085557
0.375	4	7.407572	1.442981	0.071365
0.46875	5	7.271628	1.451119	0.071365

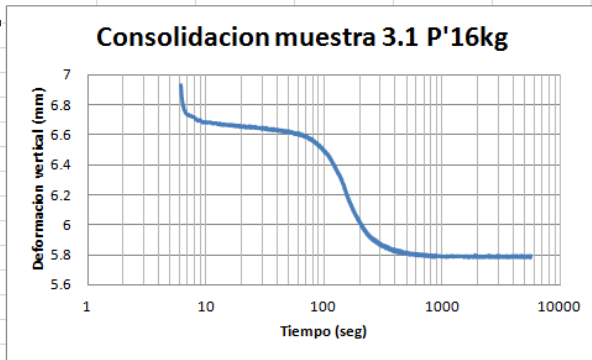
Figura 142: tabla de valores de la consolidación de la muestra III CU.

Consolidación CU muestra III.I esfuerzo normal 0.818kg/cm<sup>2</sup>



LabVIEW Measurement

Writer_Versi	0.92
Reader_Versi	1
Separator	Tab
Multi_Head	No
X_Columns	One
Time_Pref	Absolute
Operator	Administrador
Date	17/08/2011
Time	40:09.4
***End_of_Header***	
Channels	4
Samples	1 1 1 1
Date	17/08/2011 17/08/2011 17/08/2011 17/08/2011
Time	40:09.6 40:09.6 40:09.6 40:09.6
X_Dimension	Time Time Time Time
X0	0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
Delta_X	1 1 1 1



Tiempo seg	Def vertical mm
0	1 7.632933 1.241212 0.076096
0.171875	2 7.632226 1.239368 0.071365
0.265625	3 7.635489 1.241267 0.085557
0.375	4 7.636794 1.241809 0.071365
0.46875	5 7.640775 1.242352 0.095019

Figura 143: tabla de valores de la consolidación de la muestra III.I CU.

Corte directo CU muestra I

LabVIEW Measurement

Writer_Versi	0.92
Reader_Versi	1
Separator	Tab
Multi_Head	No
X_Columns	One
Time_Pref	Absolute
Operator	Administrador
Description	GUARDAR ARCHIVOS
Date	04/08/2011
Time	34:16.1
***End_of_Header***	
Channels	4
Samples	1 1 1 1
Date	04/08/2011 04/08/2011 04/08/2011 04/08/2011
Time	34:16.2 34:16.2 34:16.2 34:16.2
X_Dimension	Time Time Time Time
X0	0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00
Delta_X	1 1 1 1

- Grafica deformacion horizontal-vertical hoja2 def h-v
- Grafica deformacion horizontal-carga hoja3 def h-c
- Grafica deformacion horizontal-esfuerzo hoja3 def h-e

Muestra # 1.0 a P'8kg/cm2				
Radio R (cm)	Diametro φ (cm)	Area A (cm2)	Volumen V (cm3)	Arzo Cortante Max. σm (kg/cm2)
2.443	4.885	18.742	53.743	0.318

Tiempo t (seg)	Lecturas lec	Deform Verticala Dv (mm)	Deform Horizontal Dh (mm)	Carga (kg)	Resp corregido Dhc (mm)	Area corregida A (cm2)	esfuerzo cortante σ (kg/cm2)	NOTA: como la muestra 1ra siempre se corto el area siempre se redujo, esa area se determina en autocad y se hace la reduccion correspondiente	reducida en A (cm2)	Area corregida A (cm2)	esfuerzo cortante σ (kg/cm2)
0	1	-0.005848	1.846519	0.057173	0	18.7421331	0.00305051		7.806	10.937	0.00522771
0.1875	2	-0.006664	1.846682	0.080827	0.000163	18.7420535	0.0043126		7.806	10.936	0.0073906
0.296875	3	-0.005468	1.847116	0.090288	0.000597	18.7418415	0.00481746		7.806	10.936	0.00825585
0.39625	4	-0.005957	1.847929	0.056634	0.00141	18.7414443	0.00355544		7.806	10.936	0.00609217

Tabla 49: valores del corte directo de la muestra I CU.



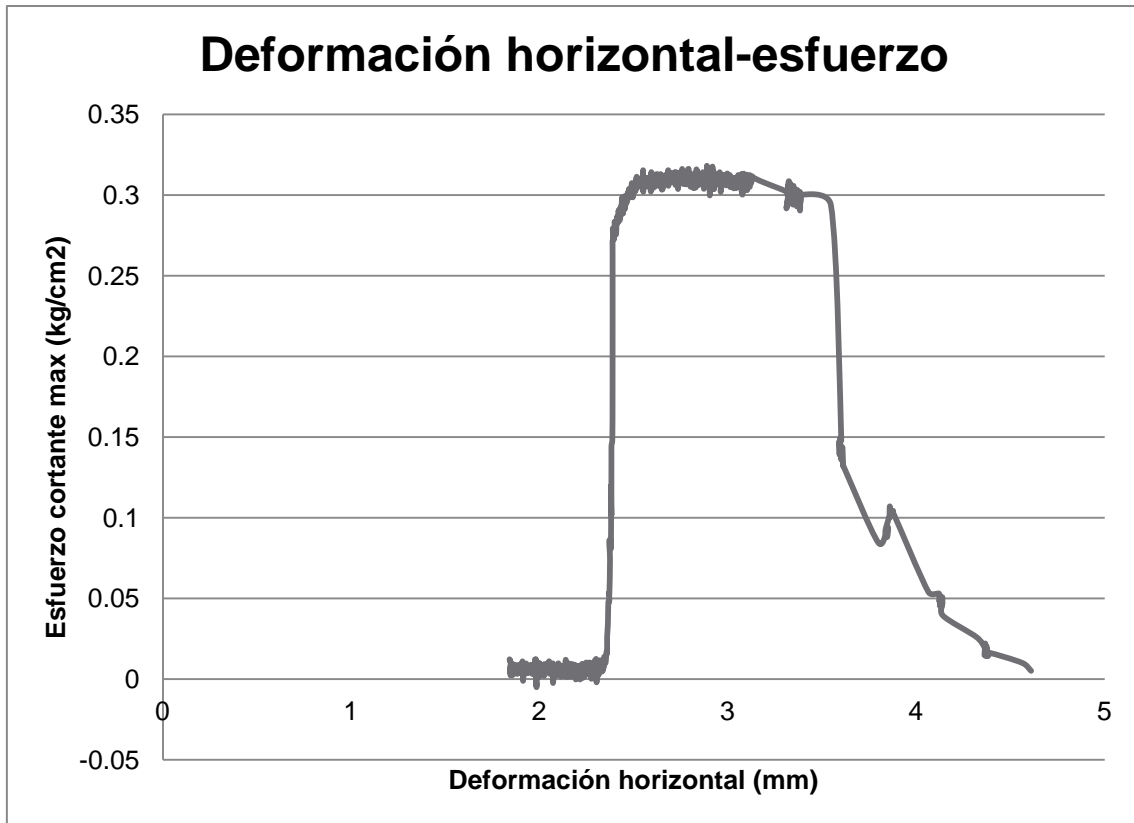


Figura 144: esfuerzo contra deformación de la muestra I CU.

Corte directo CU muestra I.I

Time_Pref	Absolute								
Operator	Administrador								
Description	GUARDAR ARCHIVOS								Grafica deformacion horizontal-vertical hoja2 def h-v
Date	05/08/2011								
Time	10:21.7								Grafica deformacion horizontal-carga hoja3 def h-c
***End_of_Header***									
Channels	4								Grafica deformacion horizontal-esfuerzo hoja3 def h-e
Samples	1	1	1	1					
Date	05/08/2011	05/08/2011	05/08/2011	05/08/2011					
Time	10:21.8	10:21.8	10:21.8	10:21.8					
X_Dimension	Time	Time	Time	Time					<b>Muestra # 1.1 a P8kg/cm2</b>
X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	Radio R (cm)	Diámetro φ (cm)	Area A (cm2)	Volumen V (cm3)	Esfuerzo Cortante Max. σm (kg/cm2)
Delta_X	1	1	1	1	2.435	4.870	18.627	61.842	0.4738182
Tiempo t (seg)	Lecturas lec	Deform Verticala Dv (mm)	Deform Horizontal Dh (mm)	Carga (kg)	Desp corregido Dhc (mm)	Area corregida A (cm2)	Esfuerzo cortante σ (kg/cm2)		
0	1	6.432331	1.915041	0.028788	0	18.62721	0.00154548		
0.171875	2	6.431733	1.91477	0.042981	-0.000271	18.62734	0.00230741		
0.28125	3	6.431461	1.91477	0.047711	-0.000271	18.62734	0.00256134		
0.375	4	6.427709	1.913359	0.052442	-0.001682	18.62803	0.00281522		
0.484375	5	6.431842	1.914661	0.076096	-0.00038	18.62739	0.00408517		
0.578125	6	6.433908	1.915638	0.057173	0.000597	18.62692	0.00306938		
0.671875	7	6.432168	1.916126	0.057173	0.001085	18.62668	0.00306941		
0.78125	8	6.430265	1.913739	0.080827	-0.001302	18.62784	0.00433904		
0.875	9	6.428851	1.913468	0.076096	-0.001573	18.62798	0.00408504		
0.984375	10	6.430487	1.914834	0.076096	-0.000717	18.62737	0.00408518		

Tabla 50: valores del corte directo de la muestra I.I CU.









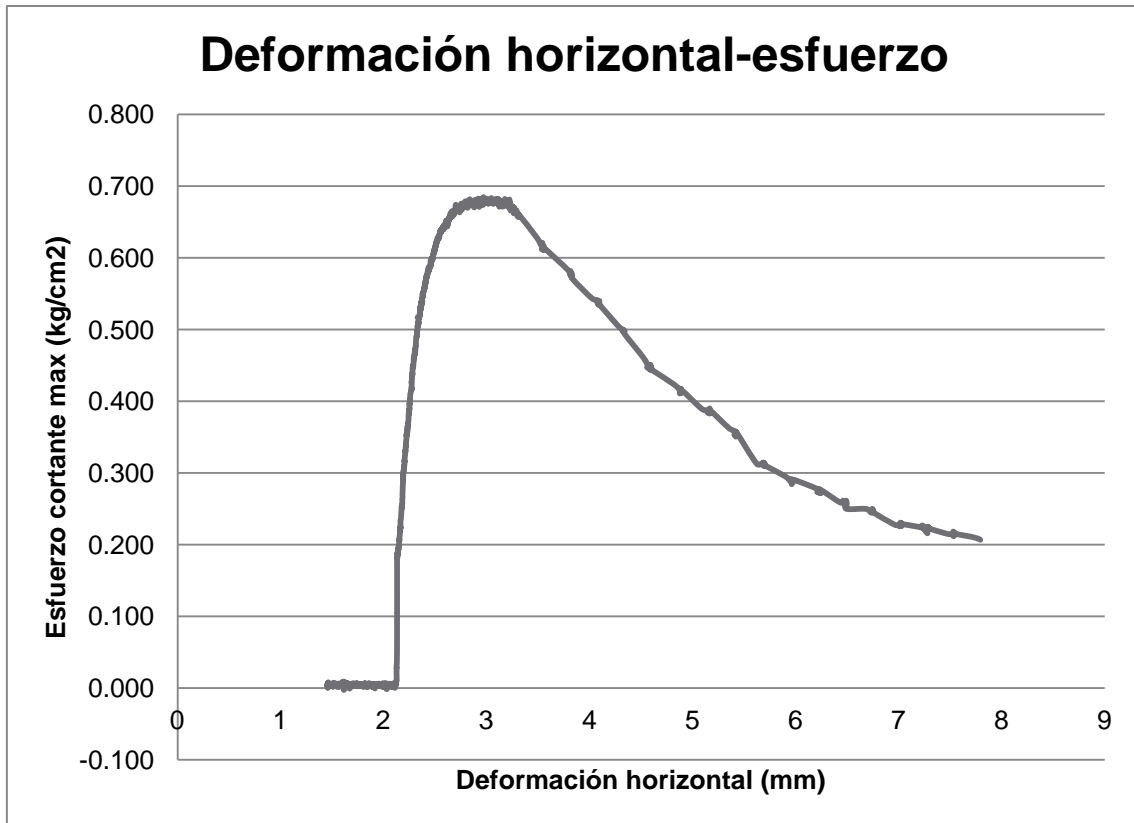


Figura 148: esfuerzo contra deformación de la muestra III CU.

Corte directo CU muestra III.I

LabVIEW Measurement							
Writer_Vers	0.92						
Reader_Vers	1						
Separator	Tab						
Multi_Head	No						
X_Columns	One						
Time_Pref	Absolute						
Operator	Administrador				Grafica deformacion horizontal- vertical hoja2 def h-v		
Description	GUARDAR ARCHIVOS				Grafica deformacion horizontal-carga hoja3 def h-c		
Date	18/08/2011				Grafica deformacion horizontal- esfuerzo hoja3 def h-e		
Time	04:09.2						
***End_of_Header***							
Channels	4						
Samples	1	1	1	1			
Date	18/08/2011	18/08/2011	18/08/2011	18/08/2011			
Time	04:09.3	04:09.3	04:09.3	04:09.3			
X_Dimension	Time	Time	Time	Time			
X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00			
Delta_X	1	1	1	1			
					<b>Muestra # 3.1 a P'16kg/cm2</b>		
	Radio R (cm)	Diametro φ (cm)	Area A (cm <sup>2</sup> )	Volumen V (cm <sup>3</sup> )	Esfuerzo Cortante Max. σm (kg/cm <sup>2</sup> )		
	2.473	4.945	19.205	56.752	0.569		
<b>Tiempo</b>	<b>Lecturas</b>	<b>Deform Vertical</b>	<b>Deform Horizontal</b>	<b>Carga</b>	<b>Desp corregido</b>	<b>Area corregida</b>	<b>esfuerzo cortante</b>
t (seg)	lec	Dv (mm)	Dh (mm)	(kg)	Dhc (mm)	A (cm <sup>2</sup> )	σ (kg/cm <sup>2</sup> )
0	1	5.85207	1.281794	0.113942	0	19.2053609	0.00593282
0.1875	2	5.846632	1.279895	0.024058	-0.001899	19.2063	0.00125261
0.28125	3	5.847828	1.279135	0.057173	-0.002659	19.2066758	0.00297673
0.375	4	5.847017	1.281306	0.085557	-0.000488	19.2056077	0.0045470

Tabla 54: valores del corte directo de la muestra III.I CU.



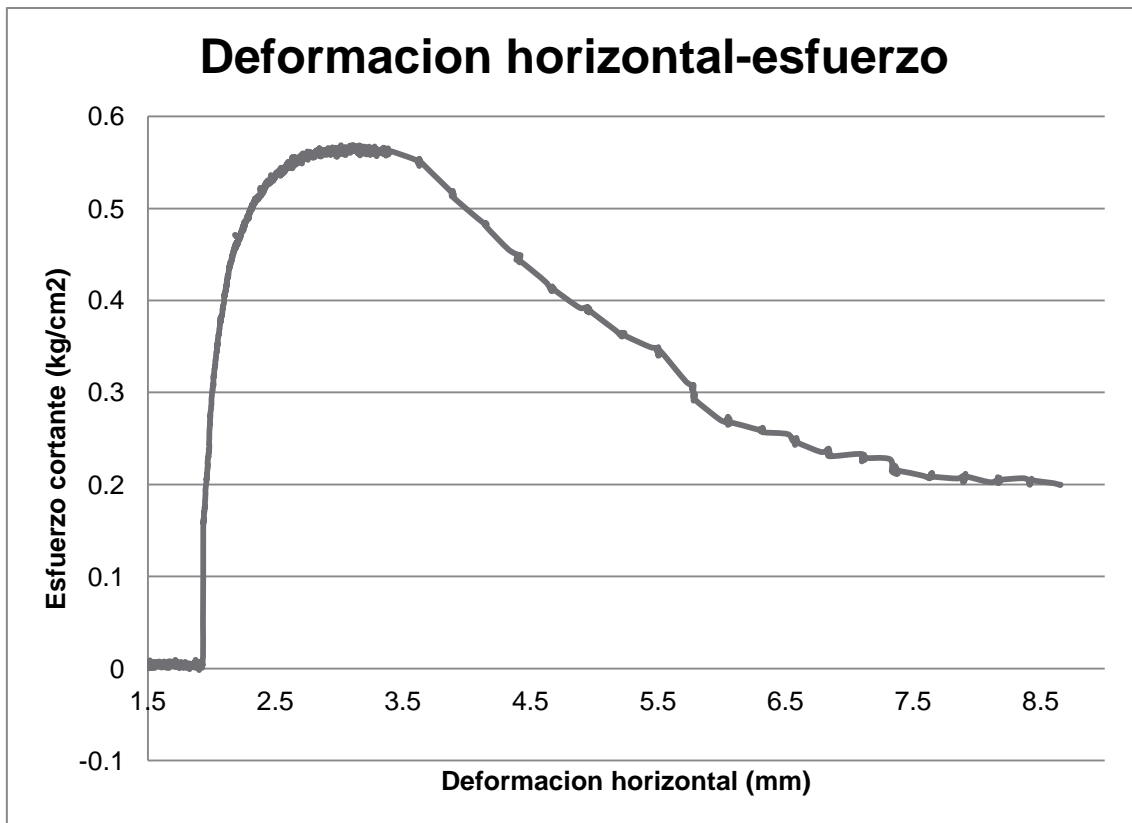


Figura 149: esfuerzo contra deformación de la muestra III.I CU.



Resumen de esfuerzo máximo cortante y esfuerzo normal.

Muestra # 0 a 4kg	Muestra # 1 a 8kg	Muestra # 2 a 12kg	Muestra # 3 a 16kg		
Esfuerzo Cortante Max. $\sigma_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante Max. $\sigma_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante Max. $\sigma_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante Max. $\sigma_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )		
-	0.318	0.500	0.685		
control X.1	0.474	0.512	0.569		
Fuerza Normal a 4kg	Fuerza Normal a 8kg	Fuerza Normal a 12kg	Fuerza Normal a 16kg		
4	8	12	16		
Area Nominal cm <sup>2</sup>					
19.556					
Esfuerzo N a 4kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo N a 8kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo N a 12kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo N a 16kg/cm <sup>2</sup>		
0.205	0.409	0.614	0.818		
	x	y	gulo/tenden	y.1	gulo/tendencia
	0.205	-	$\phi$ (°)	-	$\phi$ (°)
	0.409	0.318	41.861	0.474	13.068
	0.614	0.500		0.512	
	0.818	0.685		0.569	
Grafica de la envolvente de falla esta en la hoja3 (esf c-n)					

Tabla 55: valores general de los esfuerzos cortantes máximos CU.

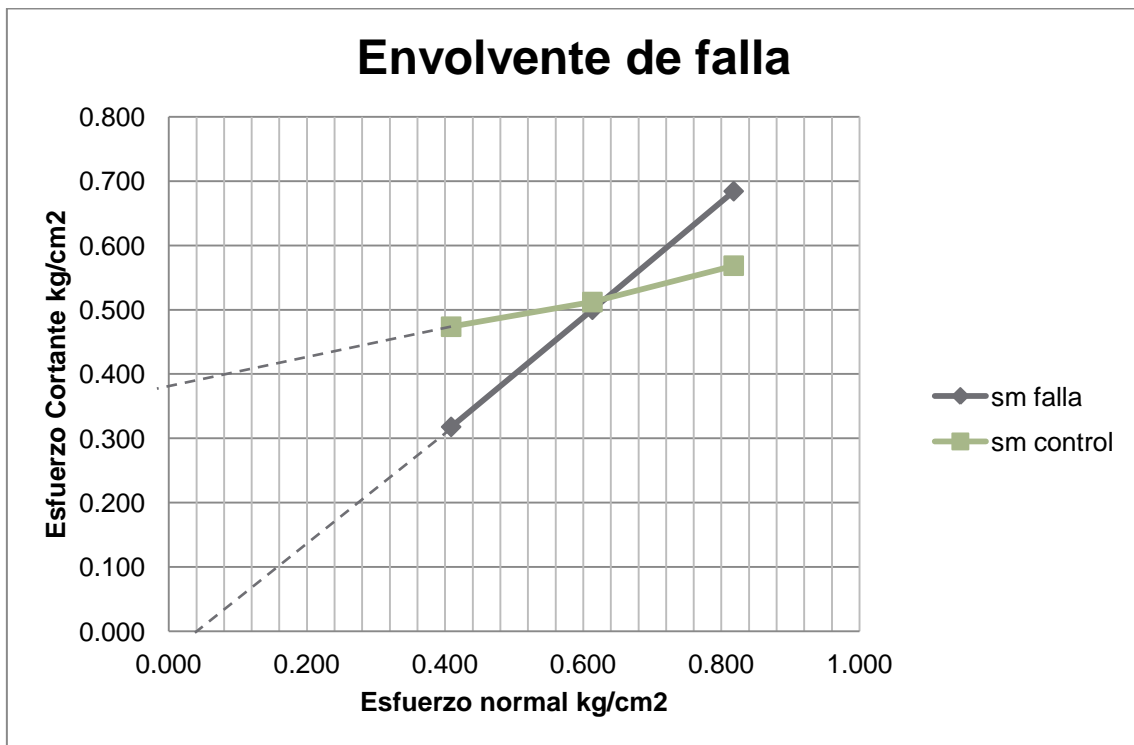


Figura 150: envolventes de falla de las 6 pruebas correspondientes a CU.



Resumen general de pruebas CU de I, II, III, I.I, II.I y III.I.

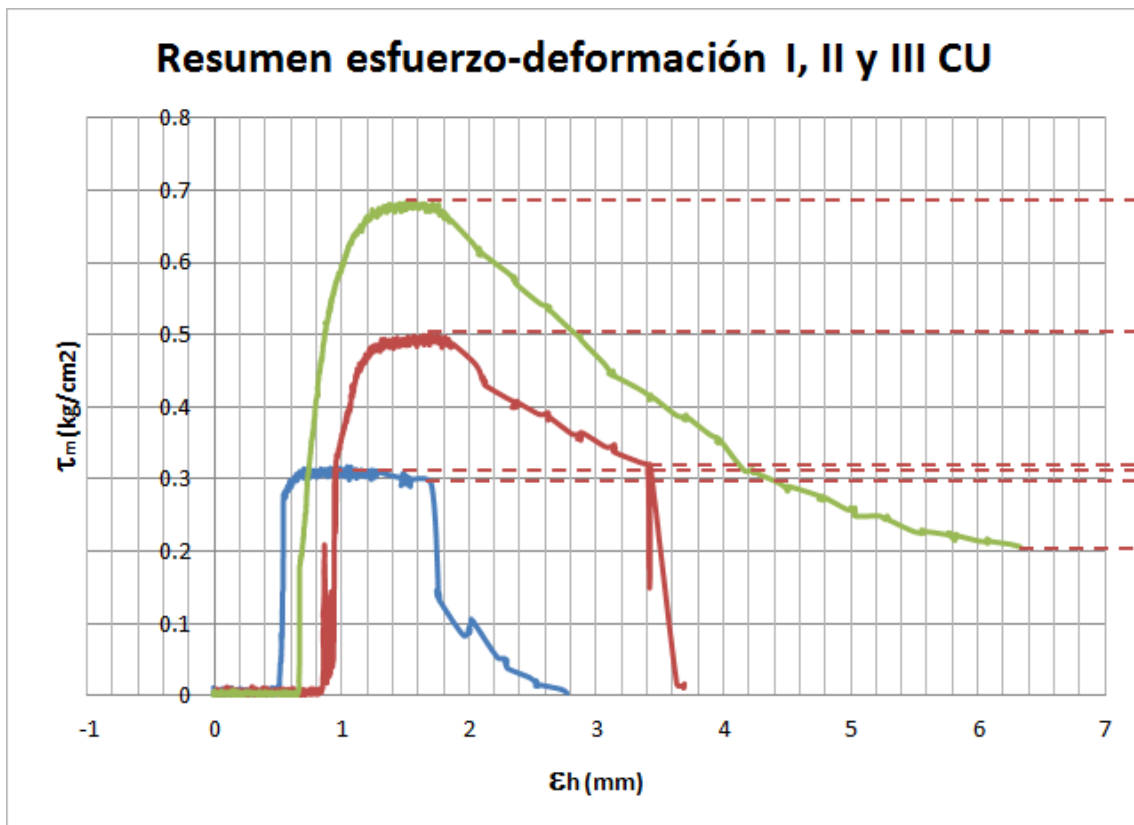


Figura 151: resumen esfuerzo contra deformación pruebas con grieta tipo CU.

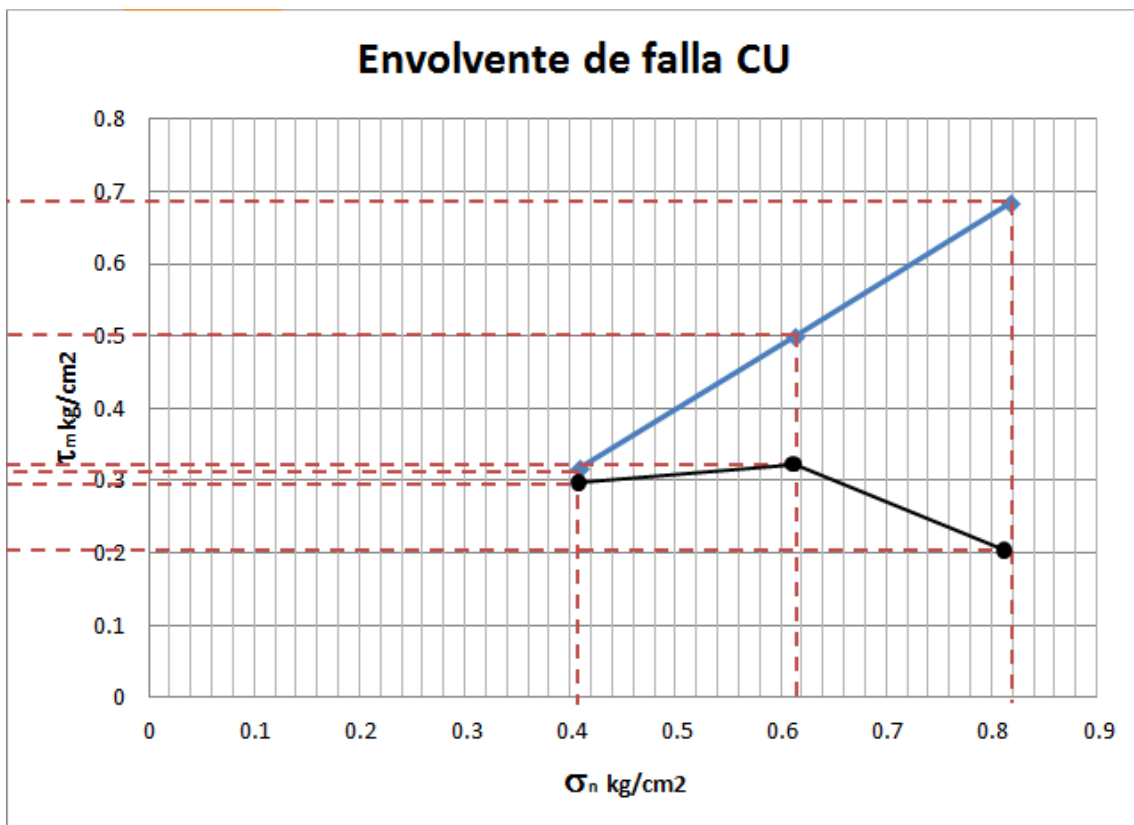


Figura 152: resumen envolvente de falla resistencia máxima y residual pruebas con grieta tipo CU.



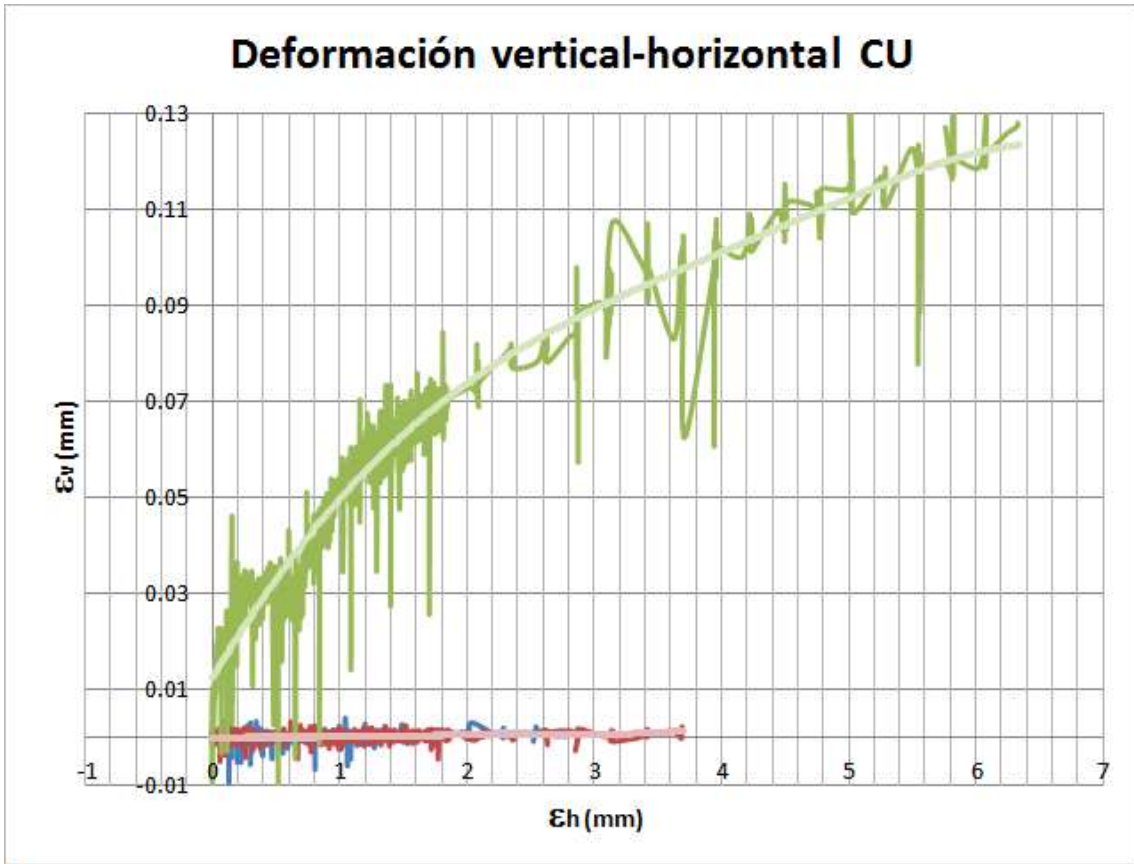


Figura 153: resumen deformación vertical contra horizontal pruebas con grieta tipo CU.

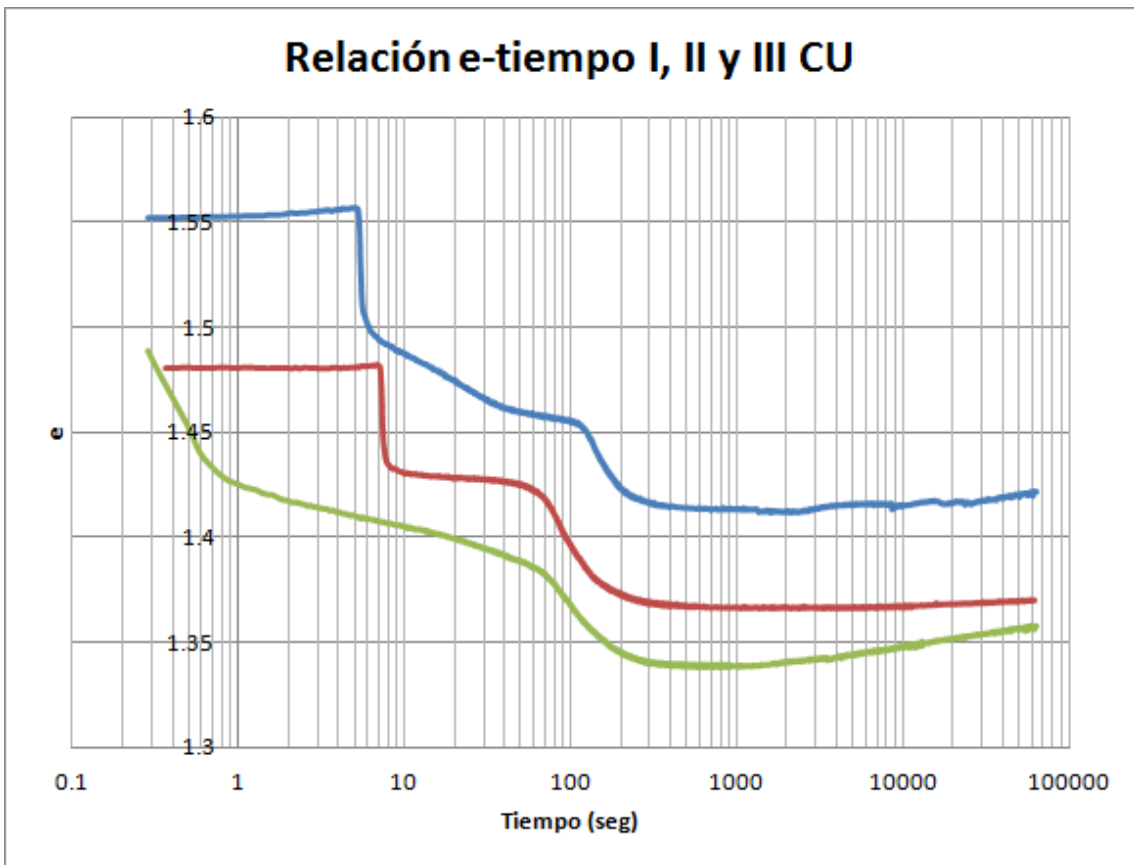


Figura 154: resumen relación de vacíos pruebas con grieta tipo CU.



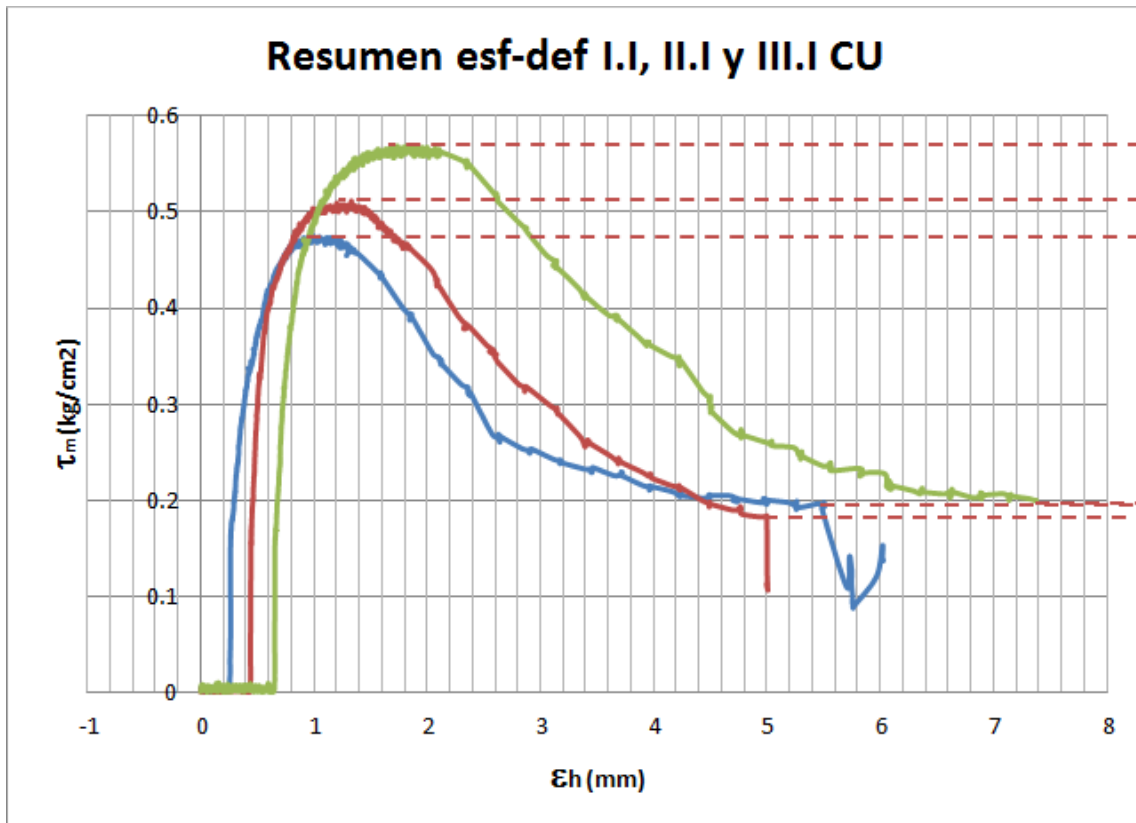


Figura 155: resumen esfuerzo contra deformación pruebas sin grieta tipo CU.

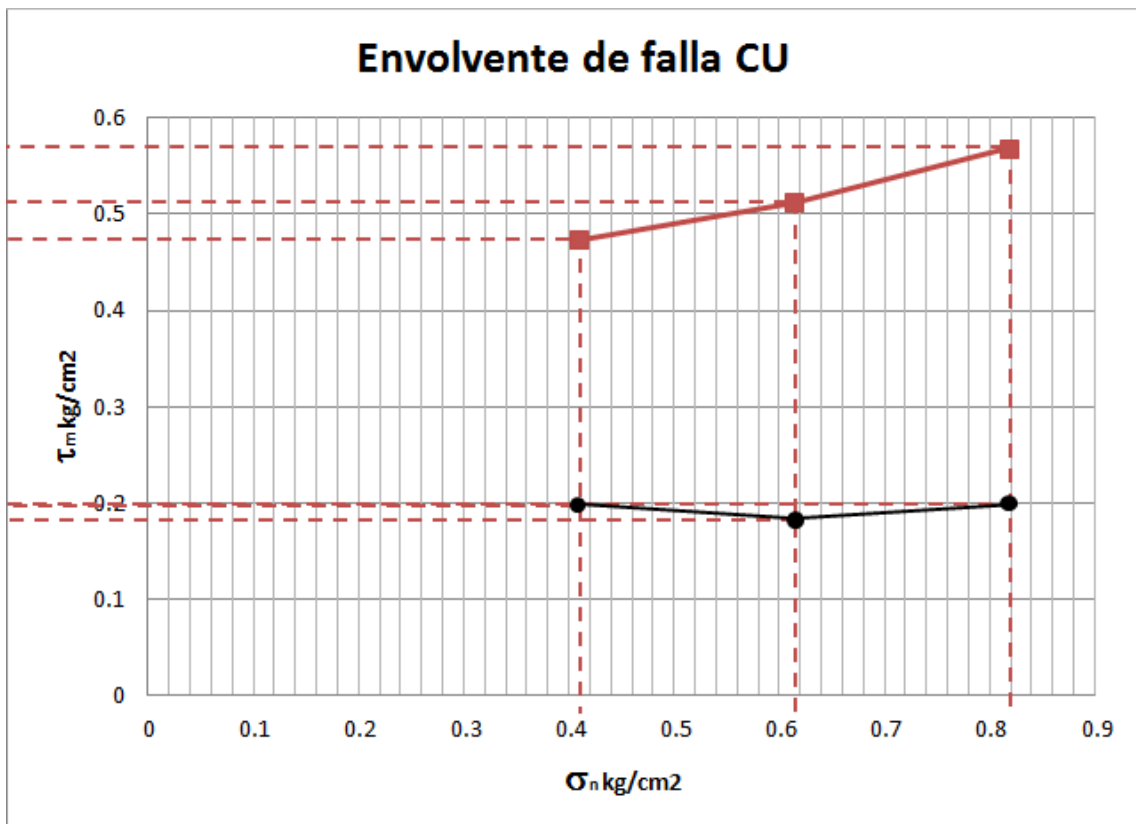


Figura 156: resumen envolvente de falla resistencia máxima y residual pruebas sin grieta tipo CU.



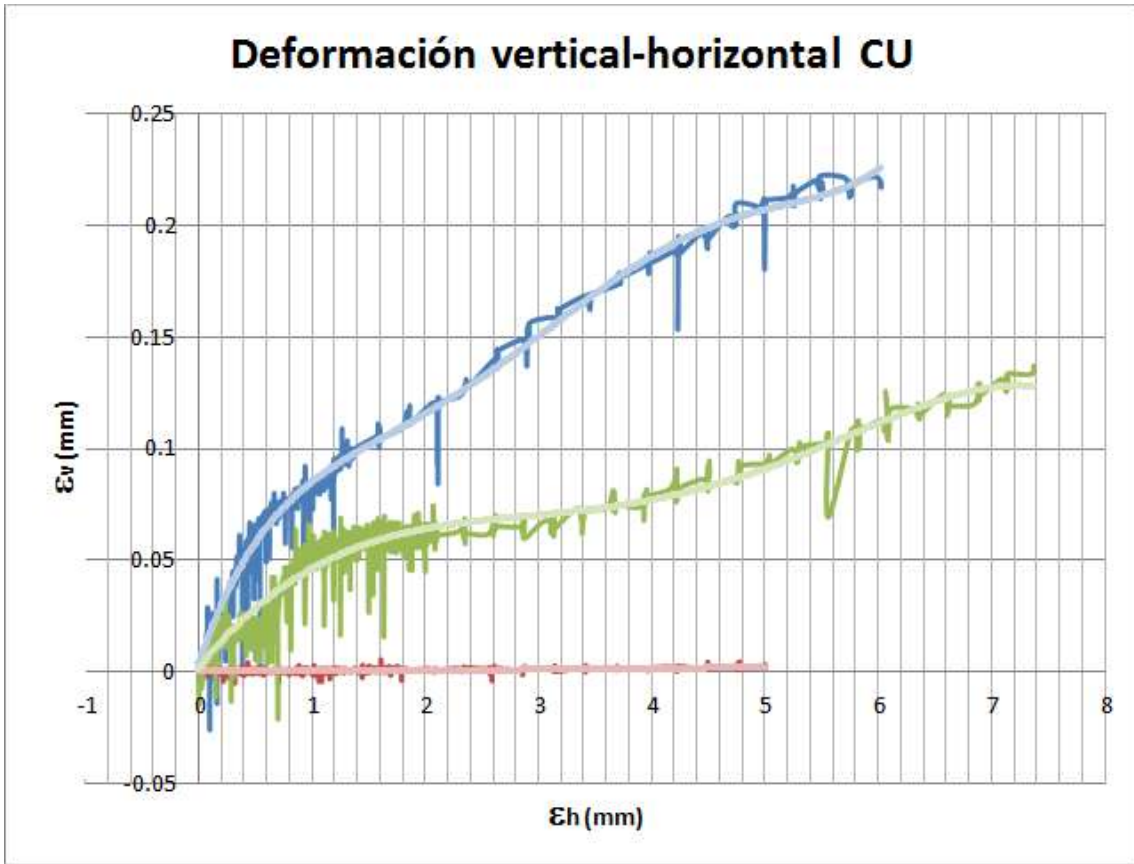


Figura 157: resumen deformación vertical contra horizontal pruebas sin grieta tipo CU.

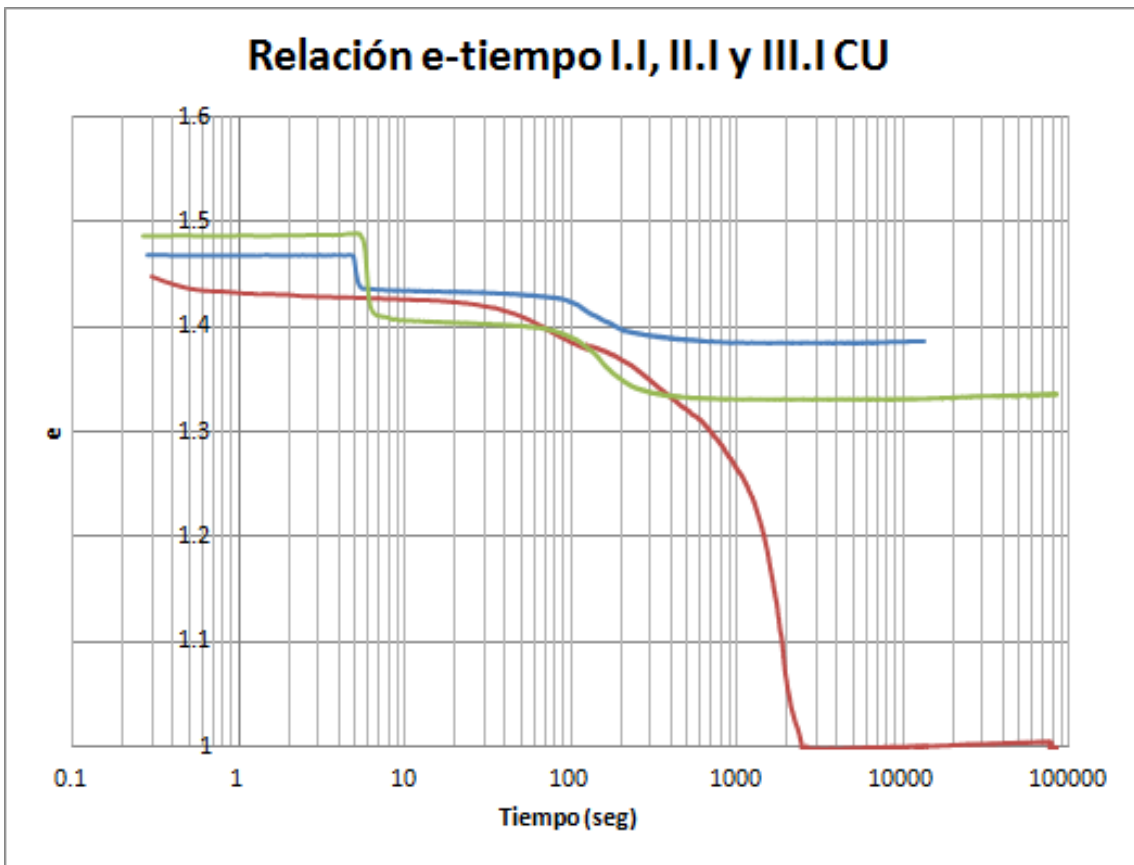


Figura 158: resumen relación de vacíos pruebas sin grieta tipo CU.



### 7.7.2. Prueba consolidada drenada CD.

#### Muestra I y I.I CD

Muestras	Diametro φ (cm)	Altura h (cm)	Area A (cm <sup>2</sup> )	Volumen V (cm <sup>3</sup> )	o humedo ini Whi (gr)	Peso hf+ch Whf+Wch (gr)	so humedo fi Whf (gr)	Peso Charola Wch (gr)	Peso s+ch Ws+Wch (gr)	Peso seco Ws (gr)	edad de lab HI (%)	edad de prueba Hp (%)
<b>I</b>												
1	4.91	2.87										
2	4.96	2.93										
3	4.88	2.93										
4	4.94	2.88										
<b>total</b>	<b>4.923</b>	<b>2.903</b>	<b>19.031</b>	<b>55.237</b>	<b>89.320</b>	<b>152.720</b>	<b>98.720</b>	<b>54.000</b>	<b>116.7</b>	<b>62.700</b>	<b>42.456</b>	<b>57.448</b>
<b>I.I</b>												
1	4.87	3.17										
2	4.87	3.21										
3	4.84	3.17										
4	4.86	3.18										
<b>total</b>	<b>4.860</b>	<b>3.183</b>	<b>18.551</b>	<b>59.038</b>	<b>94.280</b>	<b>158.550</b>	<b>104.550</b>	<b>54.000</b>	<b>120.7</b>	<b>66.700</b>	<b>41.349</b>	<b>56.747</b>

Tabla 56: valores generales de las muestras I y I.I CD.

#### Muestra II y II.I CD

Muestras	Diametro φ (cm)	Altura h (cm)	Area A (cm <sup>2</sup> )	Volumen V (cm <sup>3</sup> )	o humedo ini Whi (gr)	Peso hf+ch Whf+Wch (gr)	so humedo fi Whf (gr)	Peso Charola Wch (gr)	Peso s+ch Ws+Wch (gr)	Peso seco Ws (gr)	edad de lab HI (%)	edad de prueba Hp (%)
<b>II</b>												
1	4.88	3										
2	4.89	3.03										
3	4.98	3										
4	4.88	3.01										
<b>total</b>	<b>4.908</b>	<b>3.010</b>	<b>18.915</b>	<b>56.935</b>	<b>87.65</b>	<b>151.63</b>	<b>97.630</b>	<b>54.000</b>	<b>115.65</b>	<b>61.650</b>	<b>42.174</b>	<b>58.362</b>
<b>II.I</b>												
1	4.98	2.84										
2	4.94	2.83										
3	4.94	2.84										
4	4.9	2.83										
<b>total</b>	<b>4.940</b>	<b>2.835</b>	<b>19.167</b>	<b>54.337</b>	<b>85.73</b>	<b>148.71</b>	<b>94.710</b>	<b>54.000</b>	<b>114.28</b>	<b>60.280</b>	<b>42.220</b>	<b>57.117</b>

Tabla 57: valores generales de las muestras II y II.I CD.

#### Muestra III y III.I CD

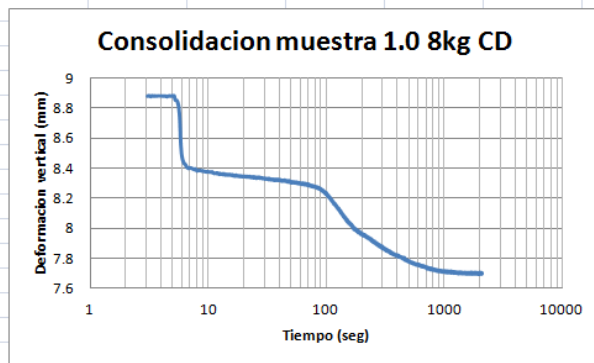
Muestras	Diametro φ (cm)	Altura h (cm)	Area A (cm <sup>2</sup> )	Volumen V (cm <sup>3</sup> )	o humedo ini Whi (gr)	Peso hf+ch Whf+Wch (gr)	so humedo fi Whf (gr)	Peso Charola Wch (gr)	Peso s+ch Ws+Wch (gr)	Peso seco Ws (gr)	edad de lab HI (%)	edad de prueba Hp (%)
<b>III</b>												
1	4.98	3.03										
2	4.93	3.03										
3	4.93	3.03										
4	4.97	3.07										
<b>total</b>	<b>4.953</b>	<b>3.040</b>	<b>19.264</b>	<b>58.562</b>	<b>90.1</b>	<b>153.22</b>	<b>99.220</b>	<b>54.000</b>	<b>117.95</b>	<b>63.950</b>	<b>40.891</b>	<b>55.152</b>
<b>III.I</b>												
1	4.41	2.91										
2	4.97	2.95										
3	4.91	3										
4	4.96	2.96										
<b>total</b>	<b>4.813</b>	<b>2.955</b>	<b>18.190</b>	<b>53.751</b>	<b>88.72</b>	<b>152.2</b>	<b>98.200</b>	<b>54.000</b>	<b>115.84</b>	<b>61.840</b>	<b>43.467</b>	<b>58.797</b>

Tabla 58: valores generales de las muestras III y III.I CD.



Consolidación CD muestra I esfuerzo normal 0.409kg/cm<sup>2</sup>

LabVIEW Measurement				
Writer_Versi	0.92			
Reader_Versi	1			
Separator	Tab			
Multi_Head	No			
X_Columns	One			
Time_Pref	Absolute			
Operator	Administrador			
Date	30/08/2011			
Time	28:56.8			
***End_of_Header***				
Channels	4			
Samples	1	1	1	1
Date	30/08/2011	30/08/2011	30/08/2011	30/08/2011
Time	28:56.9	28:56.9	28:56.9	28:56.9
X_Dimension	Time	Time	Time	Time
X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Delta_X	1	1	1	1

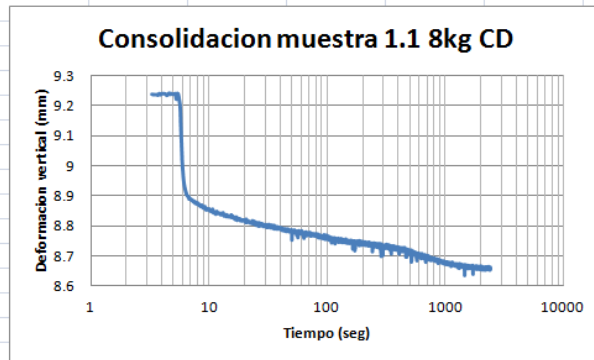


Tiempo seg	Def vertical mm			
0	1	8.881392	1.398656	0.033519
0.15625	2	8.880957	1.399144	0.090288
0.265625	3	8.880576	1.397083	0.024058
0.359375	4	8.880413	1.396703	0.061904
0.46275	5	8.881066	1.39871	0.109211

Figura 159: tabla de valores de la consolidación de la muestra I CD.

Consolidación CD muestra I.I esfuerzo normal 0.409kg/cm<sup>2</sup>

LabVIEW Measurement				
Writer_Versi	0.92			
Reader_Versi	1			
Separator	Tab			
Multi_Head	No			
X_Columns	One			
Time_Pref	Absolute			
Operator	Administrador			
Date	06/09/2011			
Time	15:11.2			
***End_of_Header***				
Channels	4			
Samples	1	1	1	1
Date	06/09/2011	06/09/2011	06/09/2011	06/09/2011
Time	15:11.3	15:11.3	15:11.3	15:11.3
X_Dimension	Time	Time	Time	Time
X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Delta_X	1	1	1	1



Tiempo seg	Def vertical mm			
0	1	9.229277	1.826553	0.066634
0.171875	2	9.227265	1.825794	0.090288
0.28125	3	9.226884	1.824709	0.095019
0.390625	4	9.228842	1.825957	0.095019
0.494275	5	9.225600	1.824004	0.090700

Figura 160: tabla de valores de la consolidación de la muestra I.I CD.



Consolidación CD muestra II esfuerzo normal 0.614kg/cm<sup>2</sup>

LabVIEW Measurement

Writer\_Versi 0.92

Reader\_Versi 1

Separator Tab

Multi\_Head No

X\_Columns One

Time\_Pref Absolute

Operator Administrador

Date 08/09/2011

Time 10:39.8

\*\*\*End\_of\_Header\*\*\*

Channels 4

Samples 1 1 1 1

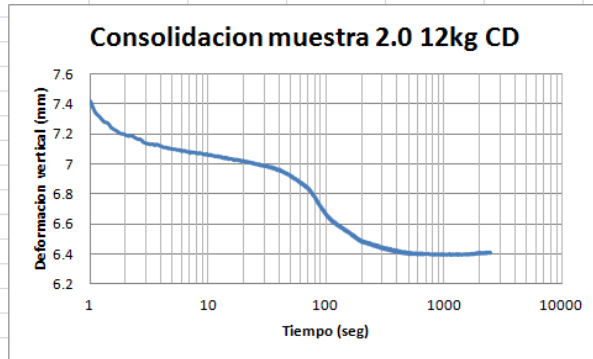
Date 08/09/2011 08/09/2011 08/09/2011 08/09/2011

Time 10:39.9 10:39.9 10:39.9 10:39.9

X\_Dimension: Time Time Time Time

X0 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00

Delta\_X 1 1 1 1



Tiempo seg	Def vertical mm			
0	1	8.524317	1.285971	0.033519
0.171875	2	8.463028	1.286026	0.047711
0.296875	3	8.432954	1.287219	0.061904
0.390625	4	8.39146	1.286026	0.03825
0.5	5	8.37417	1.286528	0.042891

Figura 161: tabla de valores de la consolidación de la muestra II CD.

Consolidación CD muestra II.I esfuerzo normal 0.614kg/cm<sup>2</sup>

LabVIEW Measurement

Writer\_Versi 0.92

Reader\_Versi 1

Separator Tab

Multi\_Head No

X\_Columns One

Time\_Pref Absolute

Operator Administrador

Date 12/09/2011

Time 10:17.0

\*\*\*End\_of\_Header\*\*\*

Channels 4

Samples 1 1 1 1

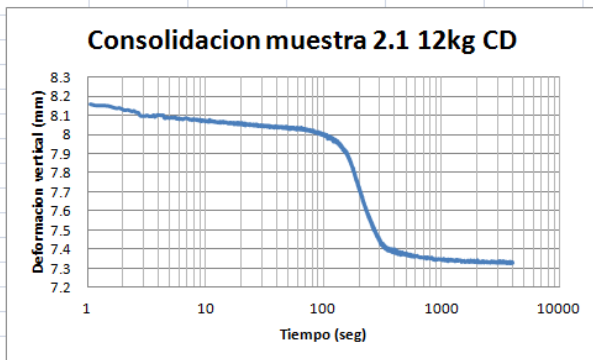
Date 12/09/2011 12/09/2011 12/09/2011 12/09/2011

Time 10:17.1 10:17.1 10:17.1 10:17.1

X\_Dimension: Time Time Time Time

X0 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00 0.00E+00

Delta\_X 1 1 1 1



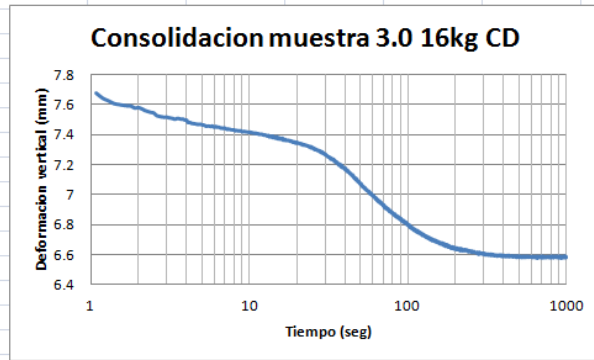
Tiempo seg	Def vertical mm			
0	1	8.473251	1.866267	0.047711
0.171875	2	8.334413	1.868112	-0.027981
0.40625	3	8.253818	1.873211	0.009865
0.515625	4	8.207049	1.872669	0.014596
0.78125	5	8.177202	1.870283	0.052443

Figura 162: tabla de valores de la consolidación de la muestra II.I CD.



Consolidación CD muestra III esfuerzo normal 0.818kg/cm<sup>2</sup>

LabVIEW Measurement				
Writer_Vers	0.92			
Reader_Vers	1			
Separator	Tab			
Multi_Head	No			
X_Columns	One			
Time_Pref	Absolute			
Operator	Administrador			
Date	19/09/2011			
Time	11:27.1			
***End_of_Header***				
Channels	4			
Samples	1	1	1	1
Date	19/09/2011	19/09/2011	19/09/2011	19/09/2011
Time	11:27.2	11:27.2	11:27.2	11:27.2
X_Dimension	Time	Time	Time	Time
X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Delta_X	1	1	1	1

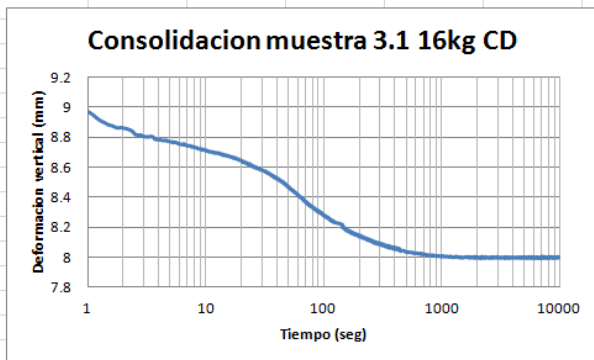


Tiempo seg	Def vertical mm			
0	1	8.796392	1.304201	0.066634
0.1875	2	8.790301	1.304363	0.066634
0.28125	3	8.790029	1.303929	0.061904
0.375	4	8.718843	1.303604	0.071365
0.46875	5	8.592610	1.296216	0.155510

Figura 163: tabla de valores de la consolidación de la muestra III CD.

Consolidación CU muestra III.I esfuerzo normal 0.818kg/cm<sup>2</sup>

LabVIEW Measurement				
Writer_Vers	0.92			
Reader_Vers	1			
Separator	Tab			
Multi_Head	No			
X_Columns	One			
Time_Pref	Absolute			
Operator	Administrador			
Date	20/09/2011			
Time	17:59.3			
***End_of_Header***				
Channels	4			
Samples	1	1	1	1
Date	20/09/2011	20/09/2011	20/09/2011	20/09/2011
Time	17:59.4	17:59.4	17:59.4	17:59.4
X_Dimension	Time	Time	Time	Time
X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Delta_X	1	1	1	1



Tiempo seg	Def vertical mm			
0	1	9.960721	1.657174	0.052442
0.1875	2	9.911723	1.660646	0.113942
0.3125	3	9.826995	1.658747	0.057173
0.40625	4	9.720242	1.665475	0.090288
0.515625	5	9.557018	1.664200	0.095010

164: tabla de valores de la consolidación de la muestra III.I CD.





Corte directo CD muestra I.I

LabVIEW Measurement									
Writer_Vers	0.92								
Reader_Vers	1								
Separator	Tab								
Multi_Head	No								
X_Columns	One								
Time_Pref	Absolute								
Operator	Administrador								
Description	GUARDAR ARCHIVOS								
Date	07/09/2011								
Time	35:15.9								
****End_of_Header****									
Channels	4								
Samples	1	1	1	1					
Date	07/09/2011	07/09/2011	07/09/2011	07/09/2011					
Time	35:16.0	35:16.0	35:16.0	35:16.0					
X_Dimension	Time	Time	Time	Time					
X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00					
Delta_X	1	1	1	1					
Muestra # 1.1 a P <sup>8</sup> kg/cm <sup>2</sup>									
Radio	Diametro	Area	Volumen	Arzo Cortante Max.					
R (cm)	φ (cm)	A (cm <sup>2</sup> )	V (cm <sup>3</sup> )	σm (kg/cm <sup>2</sup> )					
2.430	4.860	18.551	59.038	0.212					
Tiempo t (seg)	Lecturas lec	Deform Vertical Dv (mm)	Deform Horizontal Dh (mm)	Carga (kg)	Desp corregido Dhc (mm)	Area corregida A (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo cortante σ (kg/cm <sup>2</sup> )		
0	1	8.668376	1.867949	0.071365	0	18.550790	0.00384701		
0.1875	2	8.668049	1.866918	0.076096	-0.001031	18.551292	0.00410192		
0.28125	3	8.665004	1.864422	0.109211	-0.003527	18.552505	0.00588659		
0.30625	4	8.662771	1.862227	0.000865	0.006513	18.552022	0.00521773		

Tabla 60: valores del corte directo de la muestra I.I CD.

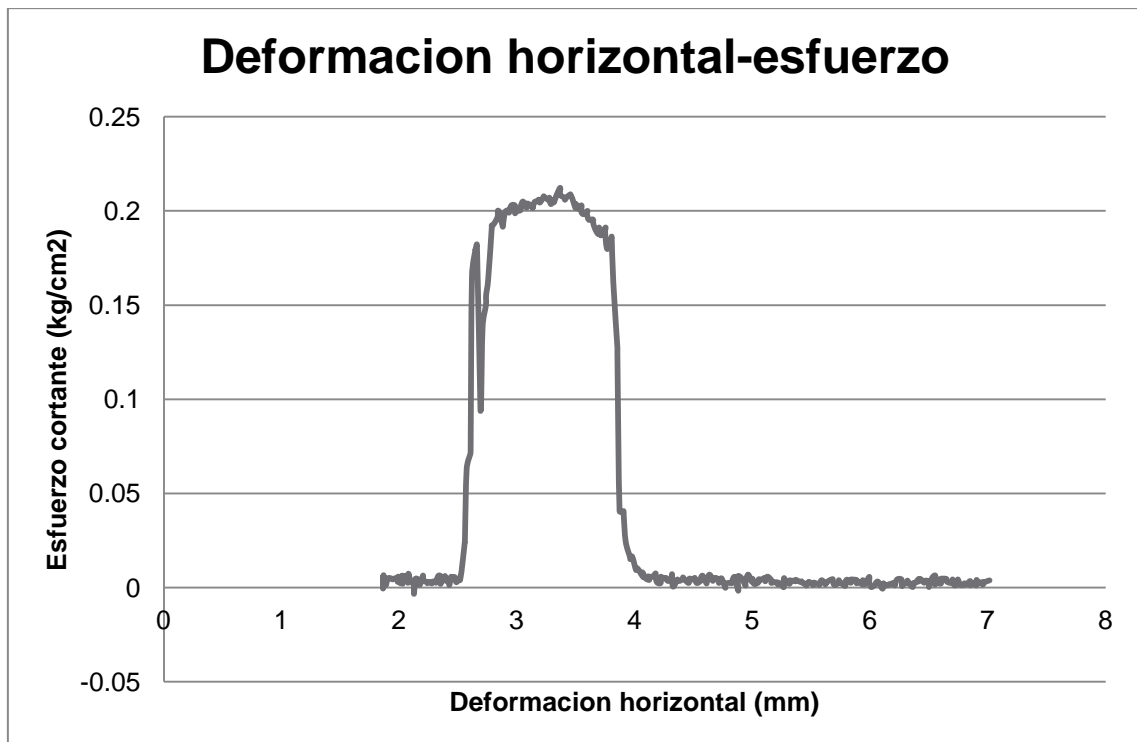


Figura 166: esfuerzo contra deformación de la muestra I.I CD.





Corte directo CD muestra II.I

LabVIEW Measurement									
Writer_Vers	0.92								
Reader_Vers	1								
Separator	Tab								
Multi_Head	No								
X_Columns	One								
Time_Pref	Absolute								
Operator	Administrador								
Description	GUARDAR ARCHIVOS								
Date	13/09/2011								
Time	18:20.7								
***End_of_Header***									
Channels	4								
Samples	1	1	1	1					
Date	13/09/2011	13/09/2011	13/09/2011	13/09/2011					
Time	18:20.8	18:20.8	18:20.8	18:20.8					
X_Dimension	Time	Time	Time	Time					
X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00					
Delta_X	1	1	1	1					
Muestra # 2.1a P'12kg/cm2									
Radio	Diametro	Area	Volumen	Arzo Cortante Max.					
R (cm)	φ (cm)	A (cm2)	V (cm3)	σ (kg/cm2)					
2.470	4.940	19.167	54.337	0.263					
Tiempo t (seg)	Lecturas lec	Deform Vertical Dv (mm)	Deform Horizontal Dh (mm)	Carga (kg)	Desp corregido Dhc (mm)	Area corregida A (cm2)	esfuerzo cortante σ (kg/cm2)		
0	1	7.36113	1.87549	0.028788	0	19.166543	0.00150199		
0.171875	2	7.365263	1.878203	0.042981	0.002713	19.165202	0.00224266		
0.265625	3	7.36684	1.879288	0.095019	0.003798	19.164666	0.00495803		
0.375	4	7.363414	1.876575	0.066634	0.001085	19.166007	0.00347668		

Tabla 62: valores del corte directo de la muestra II.I CD.

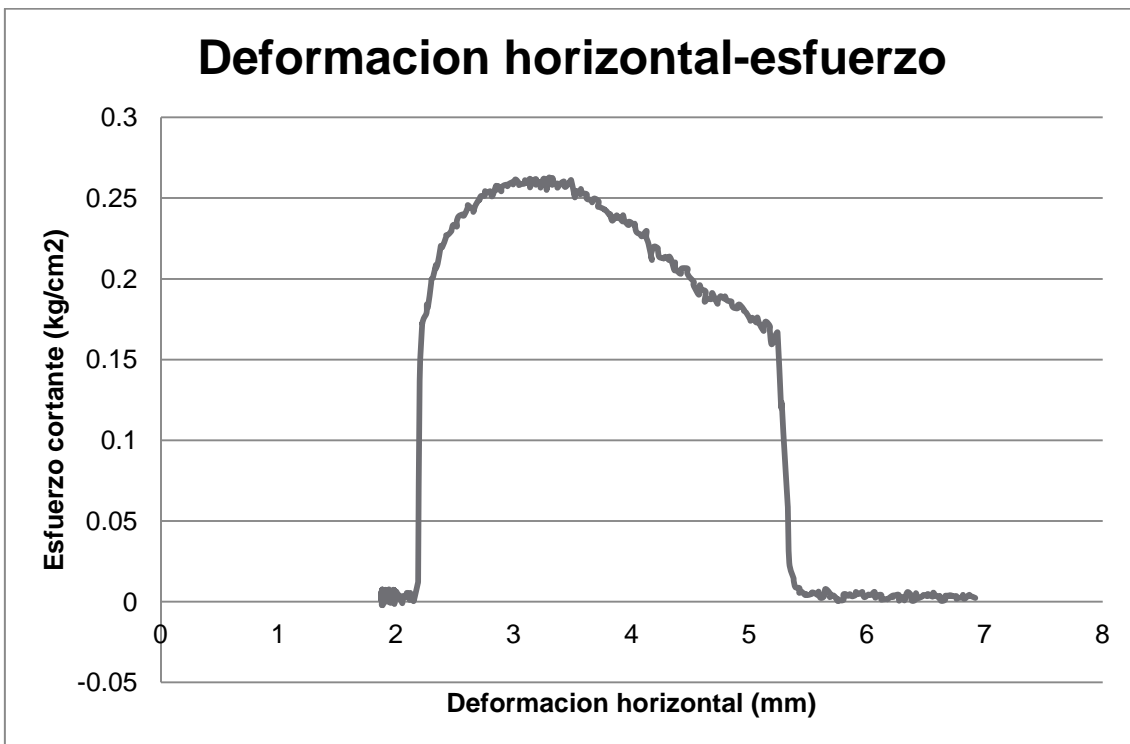


Figura 168: esfuerzo contra deformación de la muestra II.I CD.



Corte directo CD muestra III

LabVIEW Measurement					
Writer_Versi	0.92				
Reader_Vers	1				
Separator	Tab				
Multi_Head	No				
X_Columns	One				
Time_Pref	Absolute				
Operator	Administrador				Grafica deformacion horizontal-vertical hoja2 def h-v
Description	GUARDAR ARCHIVOS				Grafica deformacion horizontal-carga hoja3 def h-c
Date	20/09/2011				
Time	28:32.7				
***End_of_Header***					
Channels	4				Grafica deformacion horizontal-esfuerzo hoja4 def h-e
Samples	1	1	1	1	
Date	20/09/2011	20/09/2011	20/09/2011	20/09/2011	
Time	28:32.9	28:32.9	28:32.9	28:32.9	
X_Dimension	Time	Time	Time	Time	<b>Muestra # 3.0 a P*16kg/cm2</b>
X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	Radio R (cm)
Delta_X	1	1	1	1	Diámetro $\phi$ (cm)
					Área A (cm <sup>2</sup> )
					Volumen V (cm <sup>3</sup> )
					Esfuerzo Cortante Max. $\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )
					2.476
					4.953
					19.264
					58.562
					0.723

Tiempo t (seg)	Lecturas lec	Deform Vertical Dv (mm)	Deform Horizontal Dh (mm)	Carga (kg)	Desp corregido Dhc (mm)	Área corregida A (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo cortante $\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	NOTA: como la muestra tra siempre se corto el area siempre se redujo, esa area se determina en autocad y se hace la reduccion correspondiente	reducida en A (cm <sup>2</sup> )	Área corregida A (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo cortante $\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )
0	1	6.804525	1.380535	0.085557	0	19.263662	0.00444137		3.983	15.280	0.00559918
0.25	2	6.811758	1.384984	0.095019	0.004449	19.2614586	0.00493312		3.983	15.278	0.00621931
0.359375	3	6.811051	1.383953	0.151788	0.003418	19.2619692	0.00788019		3.983	15.279	0.0099347
0.46075	4	6.807670	1.387060	0.057447	0.003333	19.2635066	0.00777340		3.983	15.279	0.00923777

Tabla 63: valores del corte directo de la muestra III CD.

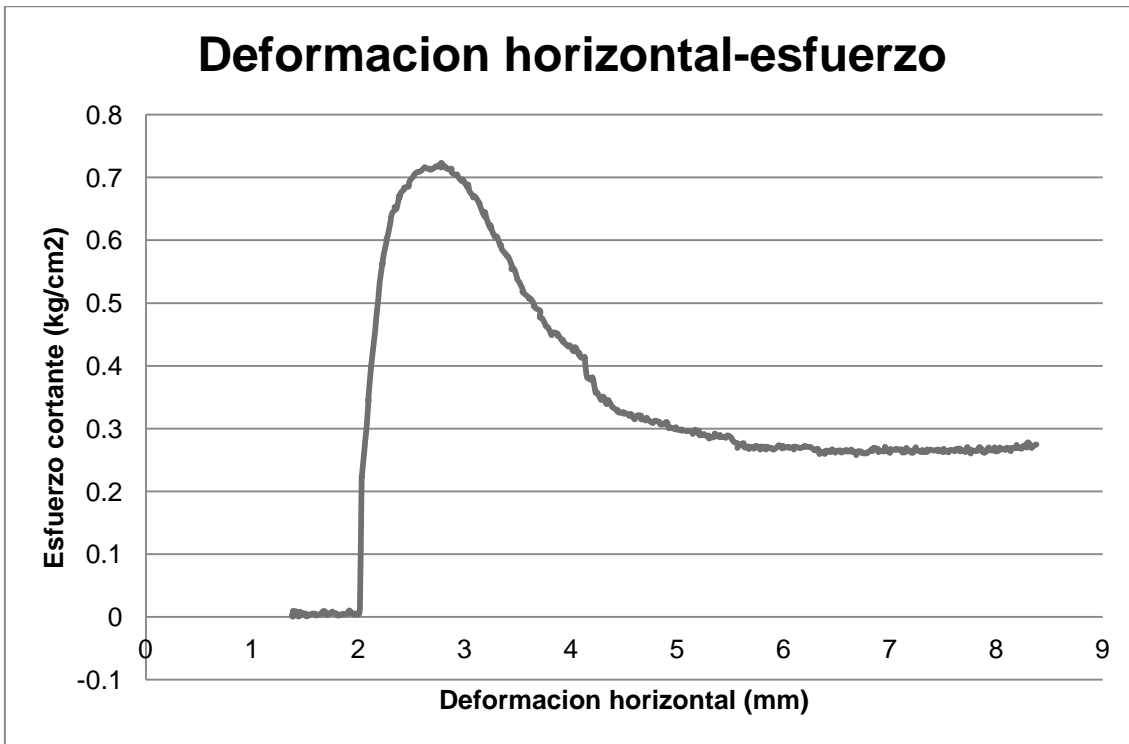


Figura 169: esfuerzo contra deformación de la muestra III CD.



Corte directo CD muestra III.I

LabVIEW Measurement									
Writer_Vers	0.92								
Reader_Vers	1								
Separator	Tab								
Multi_Head	No								
X_Columns	One								
Time_Pref	Absolute								
Operator	Administrador								
Description	GUARDAR ARCHIVOS								
Date	21/09/2011								
Time	27:09.0								
***End_of_Header***									
Channels	4								
Samples	1	1	1	1					
Date	21/09/2011	21/09/2011	21/09/2011	21/09/2011					
Time	27:09.1	27:09.1	27:09.1	27:09.1					
X_Dimension	Time	Time	Time	Time					
X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00					
Delta_X	1	1	1	1					
Muestra # 3.1a P'16kg/cm2									
Radio	Diametro	Area	Volumen	Arzo Cortante	Max.				
R (cm)	φ (cm)	A (cm2)	V (cm3)	σm (kg/cm2)					
2.406	4.813	18.190	53.751	0.592					
Tiempo t (seg)	Lecturas lec	Deform Vertical Dv (mm)	Deform Horizontal Dh (mm)	Carga (kg)	Desp corregido Dhc (mm)	Area corregida A (cm2)	fuerzo cortante σ (kg/cm2)		
0	1	8.081643	1.673559	0.085557	0	18.189944	0.00470353		
0.203125	2	8.077129	1.669815	0.047711	-0.003744	18.191746	0.00262267		
0.3125	3	8.075987	1.668079	0.061904	-0.00548	18.192581	0.00340271		
0.40625	4	8.078815	1.671117	0.071365	-0.002442	18.191119	0.00392307		

Tabla 64: valores del corte directo de la muestra III.I CD.

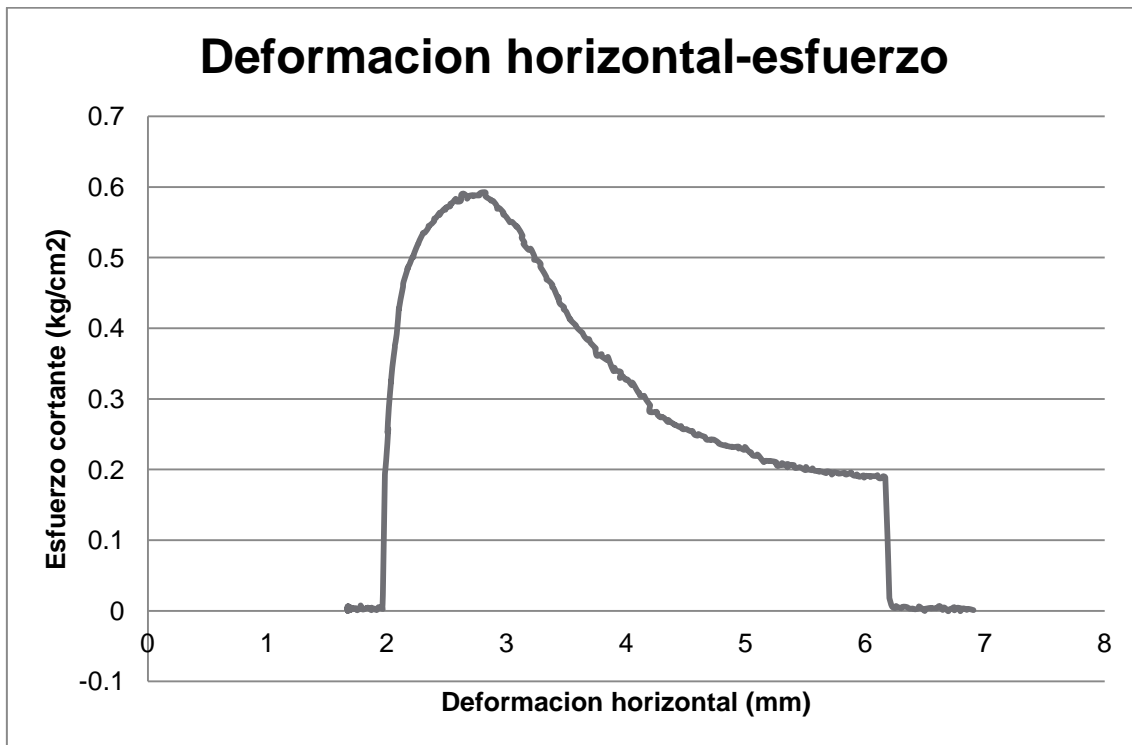


Figura 170: esfuerzo contra deformación de la muestra III.I CD.

El resto de las tablas y graficas siguientes corresponden a la repetición de las dos primeras pruebas I y II (con inducción de falla), no hubo necesidad de repetir las pruebas de referencia I.I y II.I.



Muestra A y B CD repetición de I y II.

Muestras	Diametro φ (cm)	Altura h (cm)	Area A (cm2)	Volumen V (cm3)	Mo humedo in Whi (gr)	Peso hf+ch Whf+Wch (gr)	Peso humedo fi Whf (gr)	Peso Charola Wch (gr)	Peso s+ch Ws+Wch (gr)	Peso seco Ws (gr)	edad de lab HI (%)	medad de prueba Hp (%)
<b>A</b>												
1	4.91	2.88										
2	4.97	2.88										
3	4.94	2.83										
4	4.96	2.84										
total	4.945	2.858	19.205	54.879	85.81	149.69	95.690	54.000	114.10	60.100	42.779	59.218
<b>B</b>												
1	4.98	2.92										
2	4.96	2.89										
3	4.97	2.94										
4	4.94	2.90										
total	4.963	2.913	19.342	56.332	86.53	149.18	95.180	54.000	113.99	59.990	44.241	58.660

NOTA: nomenclatura I, II, III para muestras a probar con induccion de corte, I, I, I, II, I, III, I para muestras de control respectivamente y las pruebas de repetición coresponden a A y B

Tabla 65: valores generales de las muestras I y II CD.

Consolidación CD muestra I esfuerzo normal 0.409kg/cm<sup>2</sup> repetición.

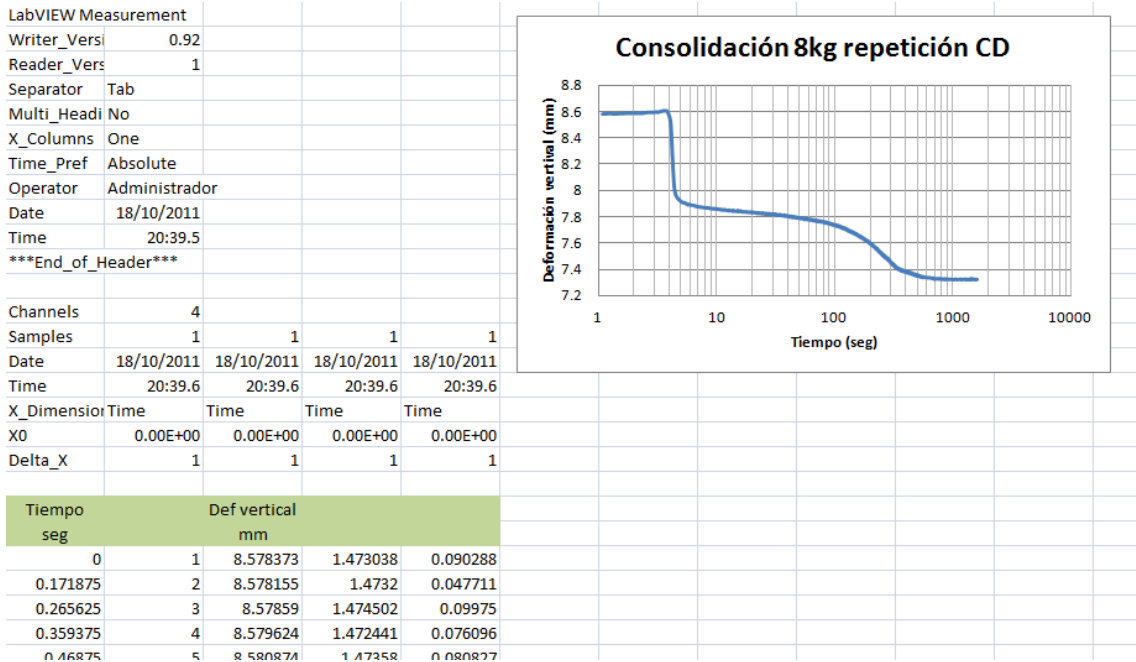
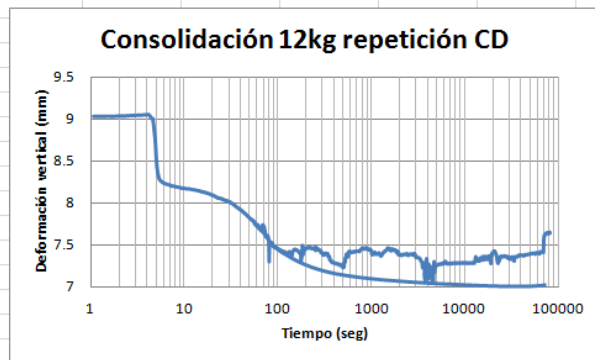


Figura 171: tabla de valores de la consolidación de la muestra I CD repetición.



Consolidación CD muestra II esfuerzo normal 0.614kg/cm<sup>2</sup> repetición.

LabVIEW Measurement				
Writer_Versi	0.92			
Reader_Vers	1			
Separator	Tab			
Multi_Head	No			
X_Columns	One			
Time_Pref	Absolute			
Operator	Administrador			
Date	24/10/2011			
Time	51:28.9			
***End_of_Header***				
Channels	4			
Samples	1	1	1	1
Date	24/10/2011	24/10/2011	24/10/2011	24/10/2011
Time	51:29.0	51:29.0	51:29.0	51:29.0
X_Dimension	Time	Time	Time	Time
X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Delta_X	1	1	1	1



Tiempo seg	Def vertical mm			
0	1	9.029584	1.62332	0.019327
0.171875	2	9.030128	1.623917	0.019327
0.265625	3	9.030346	1.623483	0.014596
0.375	4	9.028279	1.622669	0.028788
0.46075	5	9.029000	1.625653	0.057172

Figura 172: tabla de valores de la consolidación de la muestra II CD repetición.

Corte directo CD muestra I repetición.

LabVIEW Measurement				
Writer_Versi	0.92			
Reader_Vers	1			
Separator	Tab			
Multi_Head	No			
X_Columns	One			
Time_Pref	Absolute			
Operator	Administrador			
Description	GUARDAR ARCHIVOS			
Date	20/10/2011			
Time	17:08.8			
***End_of_Header***				
Channels	4			
Samples	1	1	1	1
Date	20/10/2011	20/10/2011	20/10/2011	20/10/2011
Time	17:08.9	17:08.9	17:08.9	17:08.9
X_Dimension	Time	Time	Time	Time
X0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
Delta_X	1	1	1	1

Grafica deformacion horizontal-  
vertical hoja2 def h-v

Grafica deformacion horizontal-carga  
hoja3 def h-c

Grafica deformacion horizontal-  
esfuerzo hoja4 def h-e

Muestra # 1.0 a P <sup>8</sup> kg/cm <sup>2</sup>				
Radio R (cm)	Diametro φ (cm)	Area A (cm <sup>2</sup> )	Volumen V (cm <sup>3</sup> )	Arzo Cortante Max. σm (kg/cm <sup>2</sup> )
2.473	4.945	19.205	54.879	0.273

Tiempo t (seg)	Lecturas lec	Deform Verticala Dv (mm)	Deform Horizontal Dh (mm)	Carga (kg)	Desp corregido Dhc (mm)	Area corregida A (cm <sup>2</sup> )	esfuerzo cortante σ (kg/cm <sup>2</sup> )	NOTA: como la muestra 1ra siempre se corta, el area se reduce, esa area se determina en autocad y se hace la reduccion correspondiente en la	reducida en A (cm <sup>2</sup> )	Area corregida A (cm <sup>2</sup> )	esfuerzo cortante σ (kg/cm <sup>2</sup> )
0	1	7.557613	1.514216	0.024058	0	19.205361	0.00125267		7.435	11.770	0.002044
0.171875	2	7.55832	1.516603	0.028788	0.002387	19.204181	0.00149905		7.435	11.769	0.00244611
0.28125	3	7.558157	1.515247	0.085557	0.001031	19.204851	0.0045497		7.435	11.770	0.00726935
0.375	4	7.558701	1.514664	0.056634	0.001748	19.204734	0.00346866		7.435	11.769	0.00566161

Tabla 66: valores del corte directo de la muestra I CD repetición.



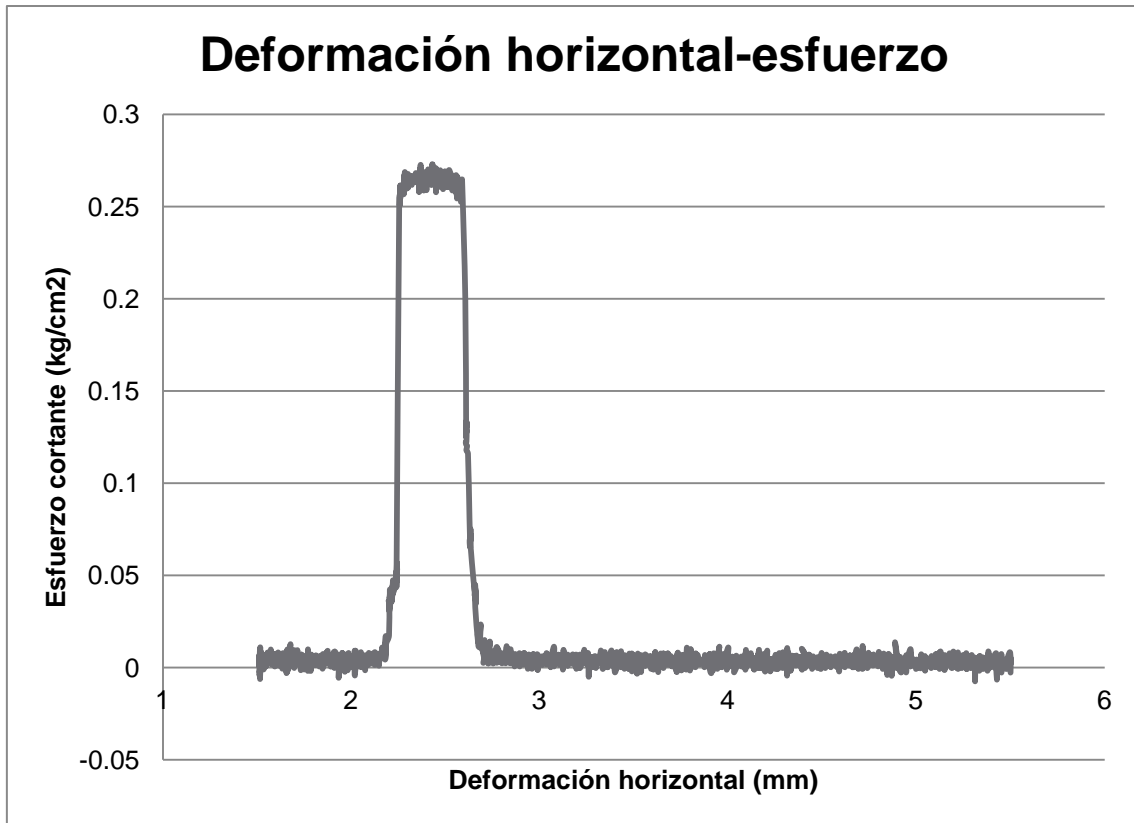


Figura 173: esfuerzo contra deformación de la muestra I CD repetición.

Corte directo CD muestra II repetición.

LabVIEW Measurement												
Writer_Versi	0.92											
Reader_Versi	1											
Separator	Tab											
Multi_Head	No											
X_Columns	One											
Time_Pref	Absolute											
Operator	Administrador											
Description	GUARDAR ARCHIVOS											
Date	25/10/2011											
Time	38:39.2											
***End_of_Header***												
Channels	4											
Samples	1 1 1 1											
Date	25/10/2011			25/10/2011			25/10/2011			25/10/2011		
Time	38:39.4			38:39.4			38:39.4			38:39.4		
X_Dimension	Time											
X0	0.00E+00			0.00E+00			0.00E+00			0.00E+00		
Delta_X	1			1			1			1		
Muestra # 1.0 a P 8kg/cm2												
Radio	Diametro		Area		Volumen		Esfuerzo Cortante Max.					
R (cm)	φ (cm)		A (cm2)		V (cm3)		σm (kg/cm2)					
2.481	4.963		19.342		56.332		0.277					
Time	Lecturas	Deform Vertical	Deform Horizontal	Carga	Desp corregido	Area corregida	Esfuerzo cortante		NOTA: como la muestra			
t (seg)	lec	Dv (mm)	Dh (mm)	(kg)	Dhc (mm)	A (cm2)	σ (kg/cm2)	reducida en			Esfuerzo cortante	
0	1	7.386037	1.687719	0.019327	0	19.341534	0.00099925	A (cm2)		A (cm2)	σ (kg/cm2)	
0.1875	2	7.385384	1.686851	0.005135	-0.000868	19.341965	0.00026548	5.662		13.680	0.00141282	
0.296875	3	7.384514	1.686362	0.033519	-0.001357	19.342208	0.00173295	5.662		13.680	0.00245015	
0.380625	4	7.383670	1.686783	0.010977	0.000677	19.341916	0.00080667	5.662		13.680	0.00141777	

Tabla 67: valores del corte directo de la muestra II CD repetición.



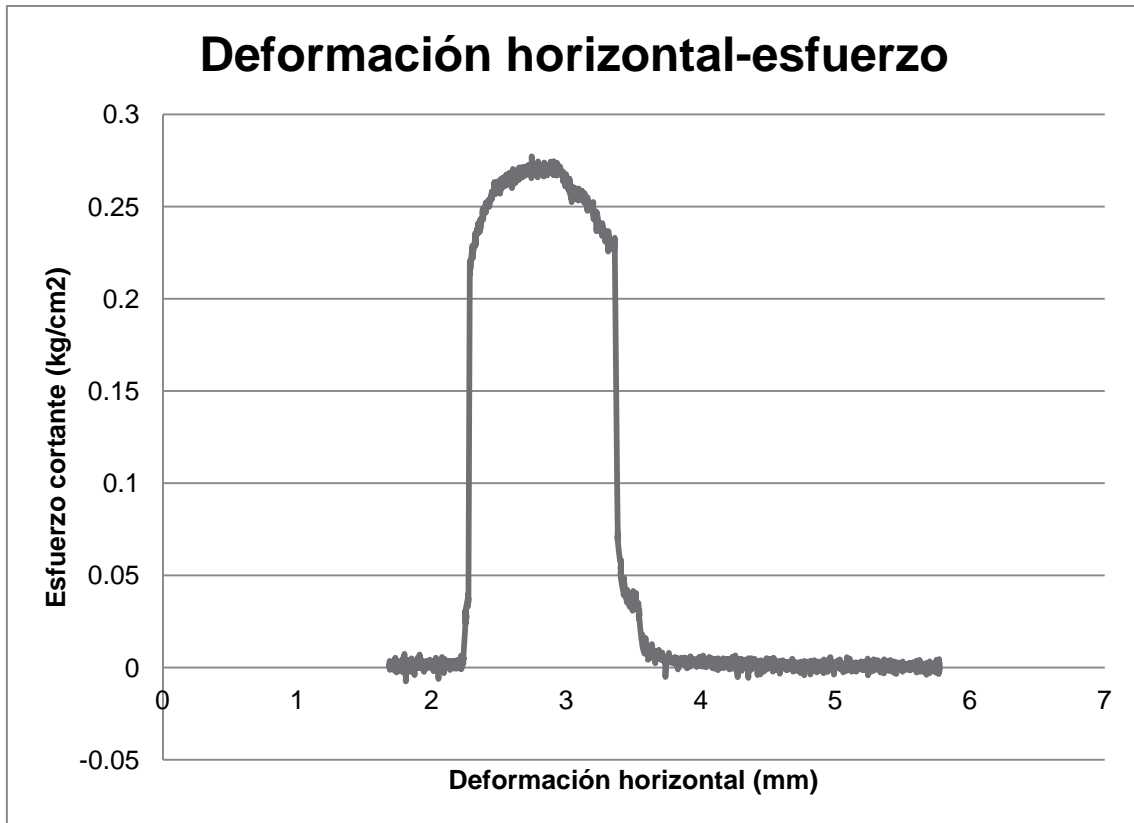


Figura 174: esfuerzo contra deformación de la muestra II CD repetición.  
Resumen de esfuerzo máximo cortante y esfuerzo normal.

Muestra # 0 a 4kg	Muestra # 1 a 8kg	Muestra # 2 a 12kg	Muestra # 3 a 16kg
Esfuerzo Cortante Max.	Esfuerzo Cortante Max.	Esfuerzo Cortante Max.	Esfuerzo Cortante Max.
$\sigma_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\sigma_m$ (kg/cm <sup>2</sup> )
-	0.417	0.351	0.723
control X.1	0.212	0.263	0.592
repetición	0.273	0.277	-

Carga Normal a 4kg	Carga Normal a 8kg	Carga Normal a 12kg	Carga Normal a 16kg
4	8	12	16
Area Nominal cm <sup>2</sup>			
19.556			

Esfuerzo N a 4kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo N a 8kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo N a 12kg/cm <sup>2</sup>	Esfuerzo N a 16kg/cm <sup>2</sup>
0.205	0.409	0.614	0.818

x	y	gulo/tenden	y.1	gulo/tendencia
0.205	-	$\phi$ (°)	-	$\phi$ (°)
0.409	0.417	36.796	0.212	42.884
0.614	0.351		0.263	
0.818	0.723		0.592	

x	y	gulo/tendencia
repetición $\phi$ (°)		
0.409	0.273	47.743
0.614	0.277	
0.818	0.723	

Tabla 68: valores general de los esfuerzos cortantes máximos CD.



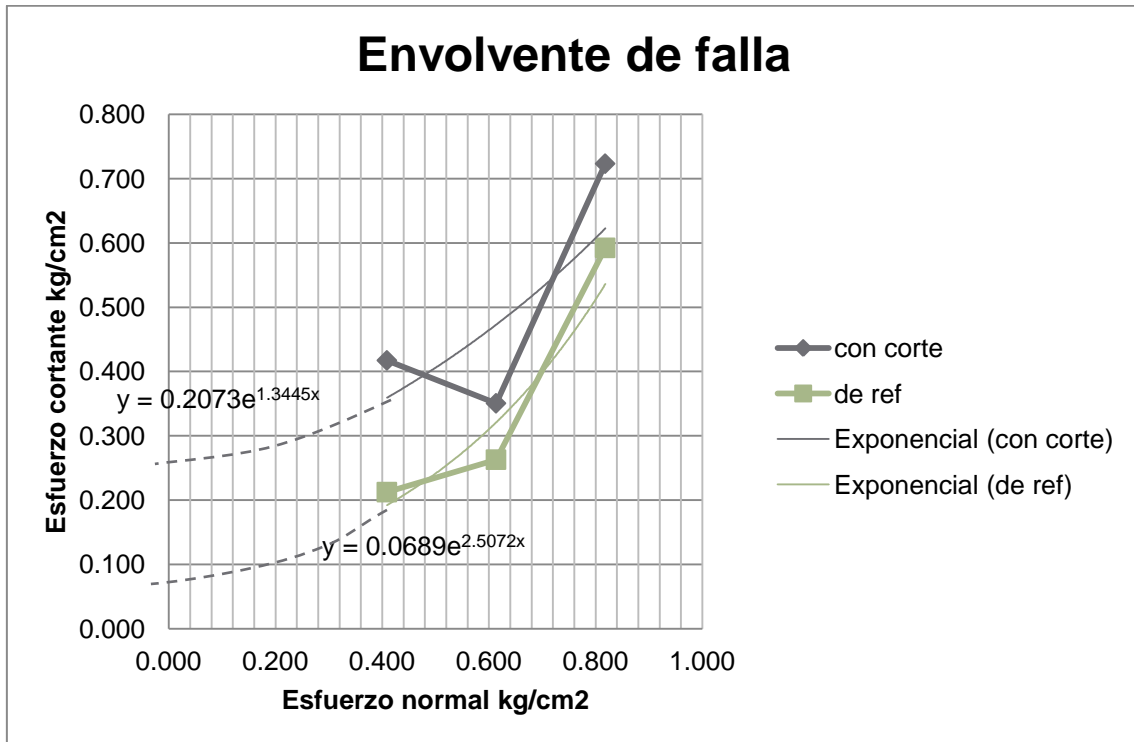


Figura 175: envolventes de falla de las 6 pruebas correspondientes a CD.

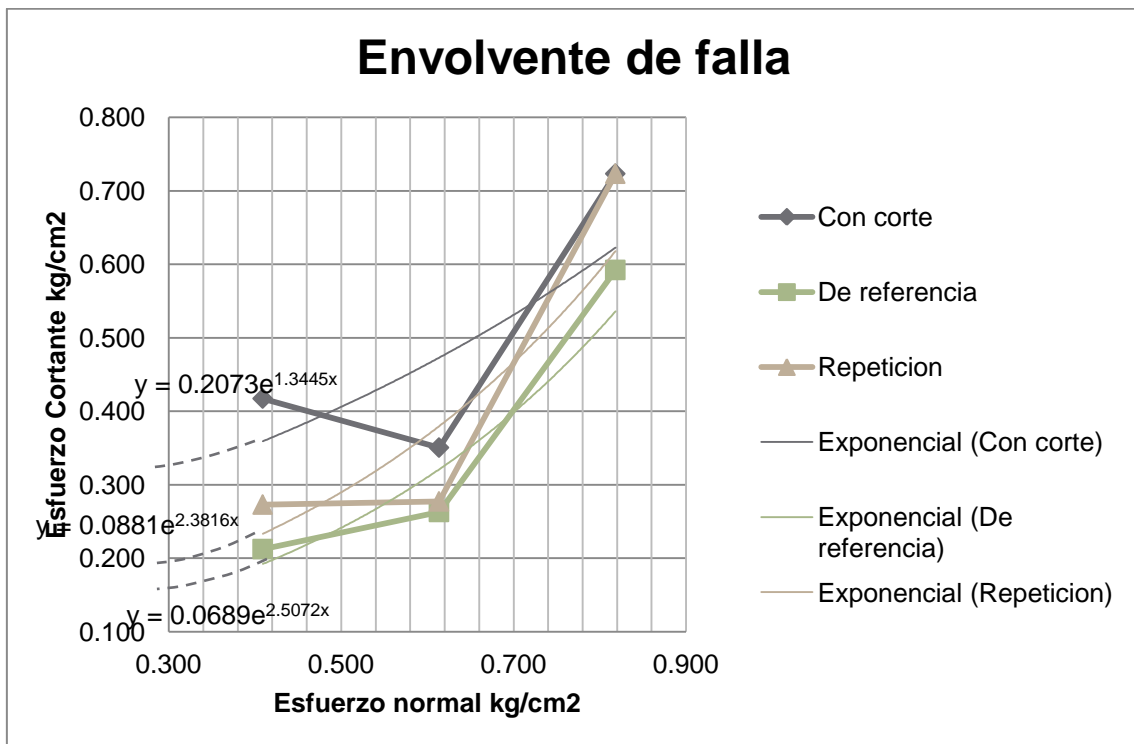


Figura 176: envolventes de falla de las 6 pruebas y dos repeticiones correspondientes a CD.



Resumen general de pruebas CD de I rep; II, III, I.I, II.I y III.I.

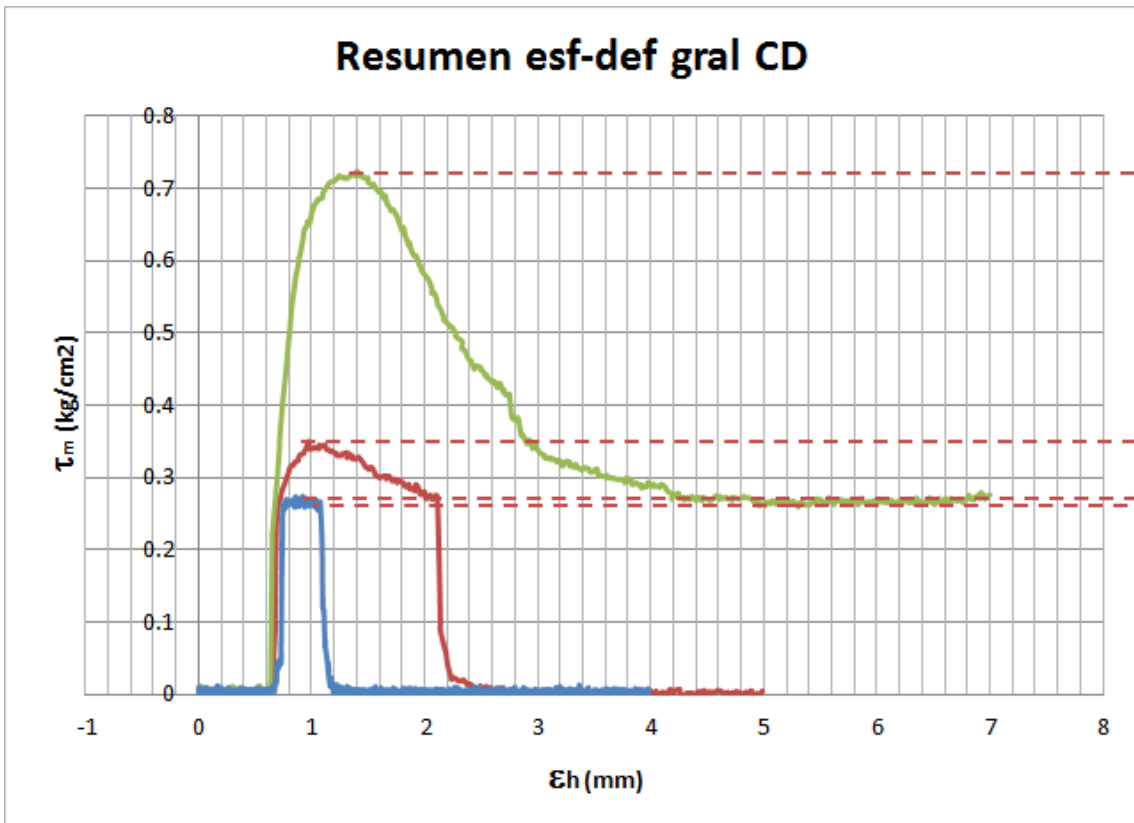


Figura 177: resumen esfuerzo contra deformación pruebas con grieta tipo CD.

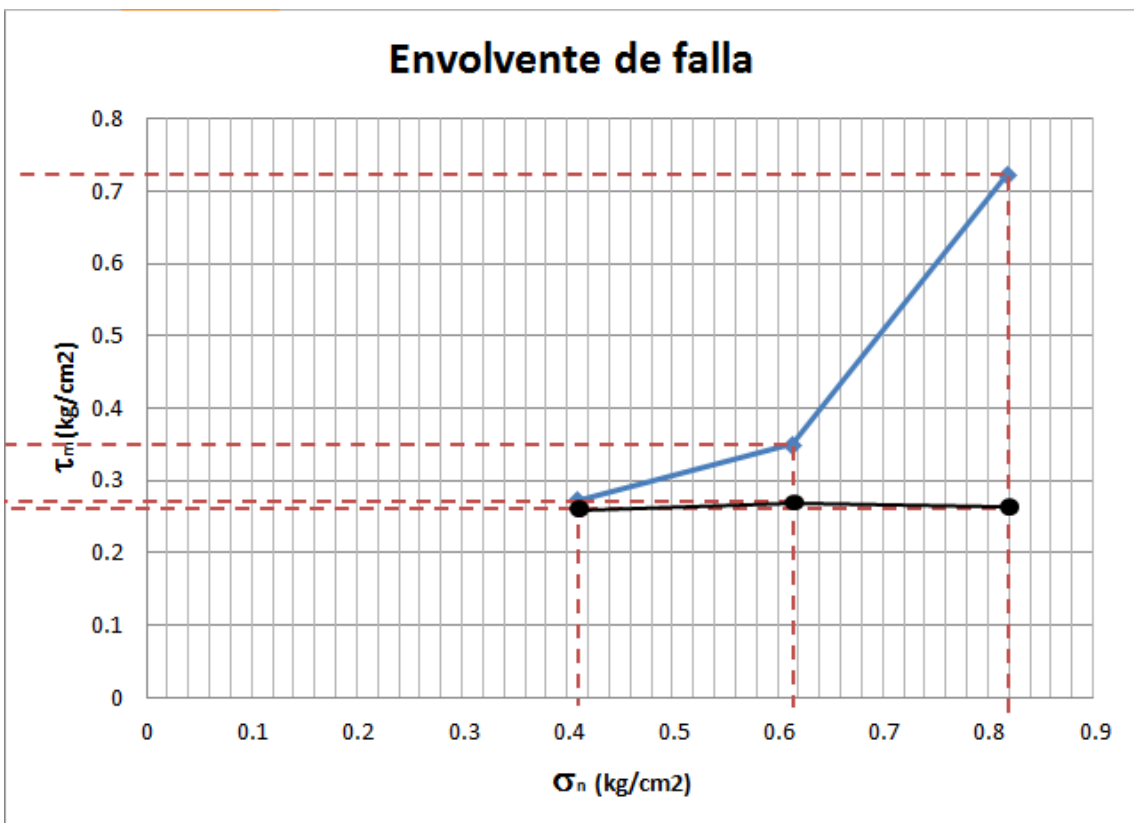


Figura 178: resumen envolvente de falla resistencia máxima y residual pruebas con grieta tipo CD.



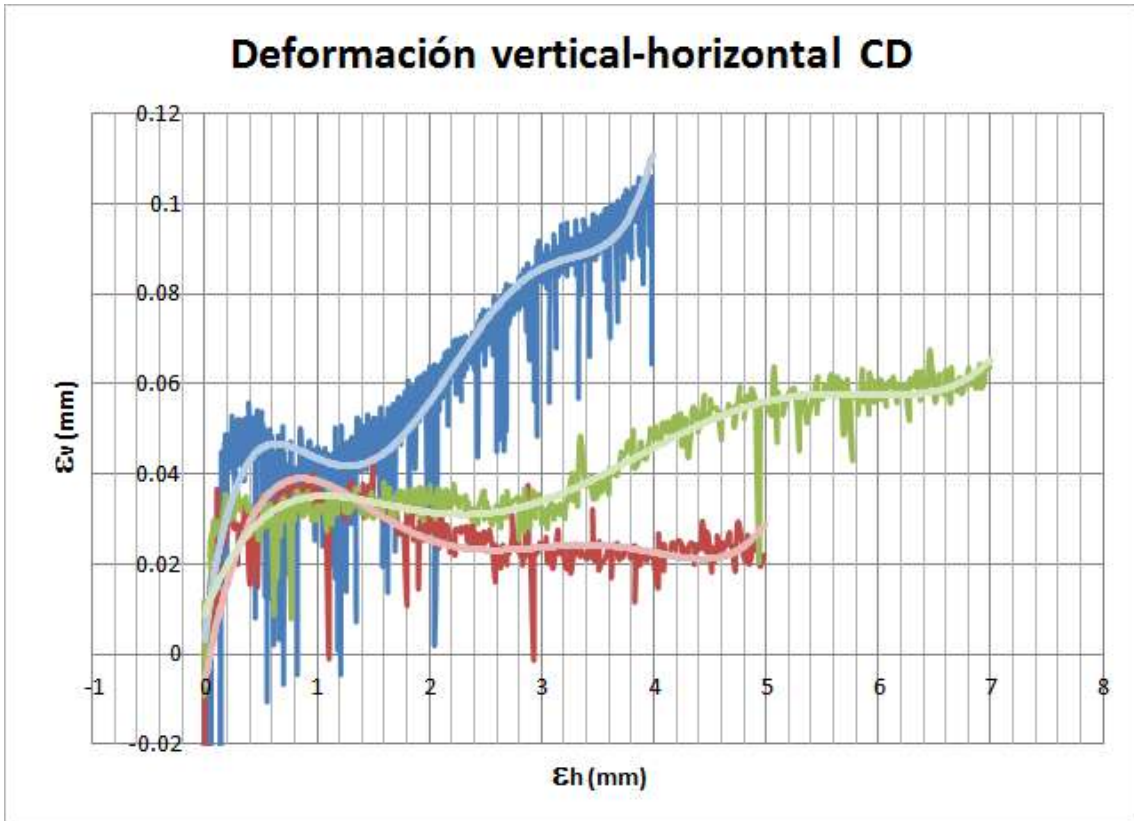


Figura 179: resumen deformación vertical contra horizontal pruebas con grieta tipo CD.

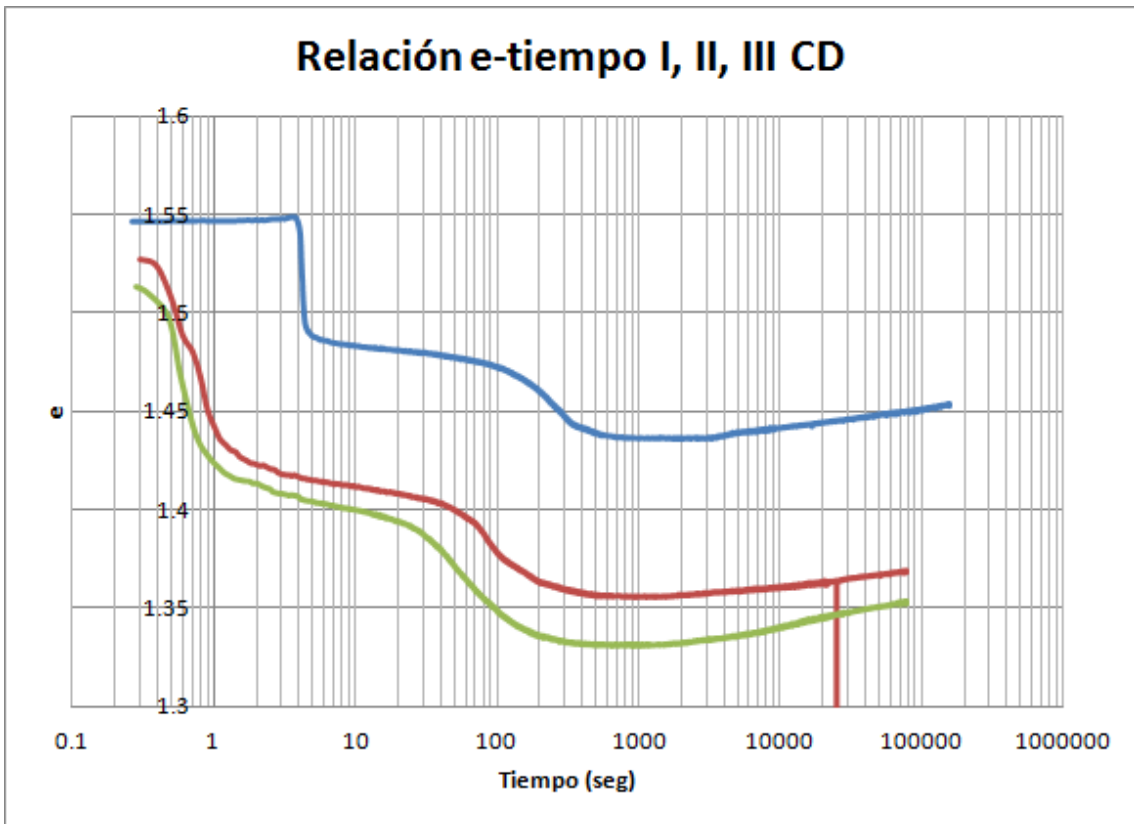


Figura 180: resumen relación de vacíos pruebas con grieta tipo CD.



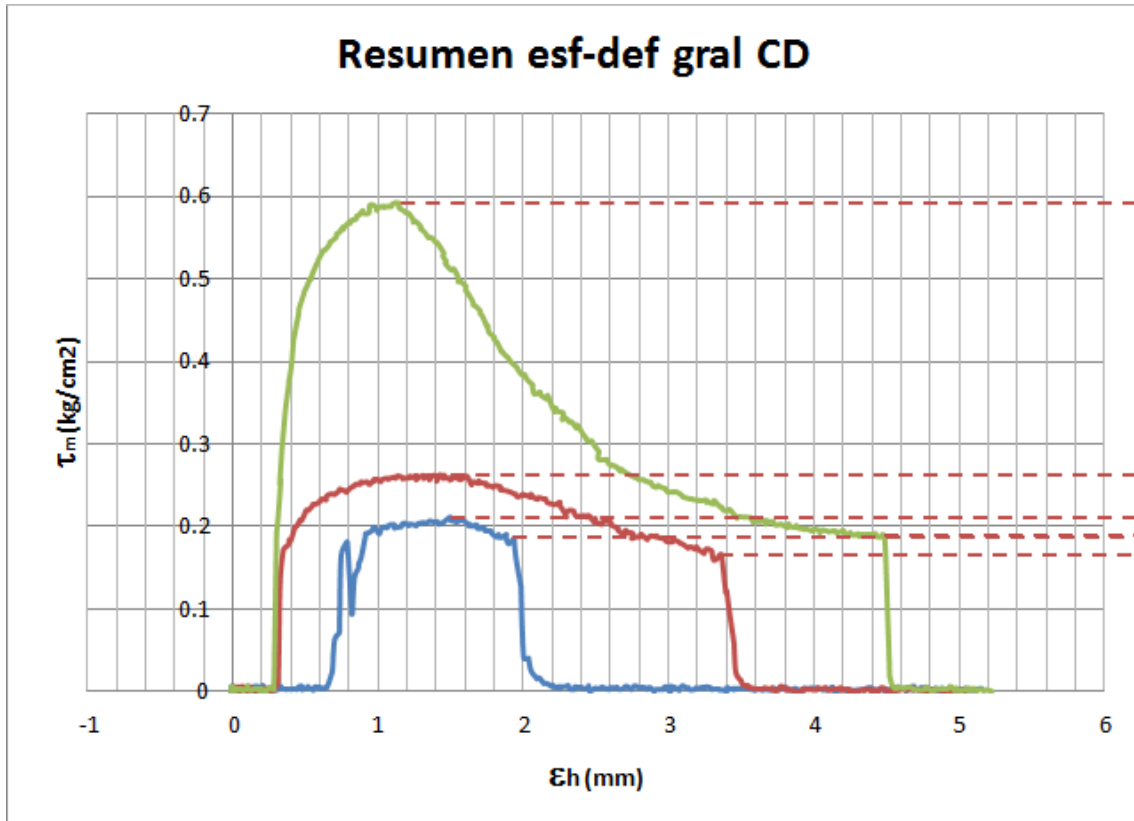


Figura 181: resumen esfuerzo contra deformación pruebas sin grieta tipo CD.

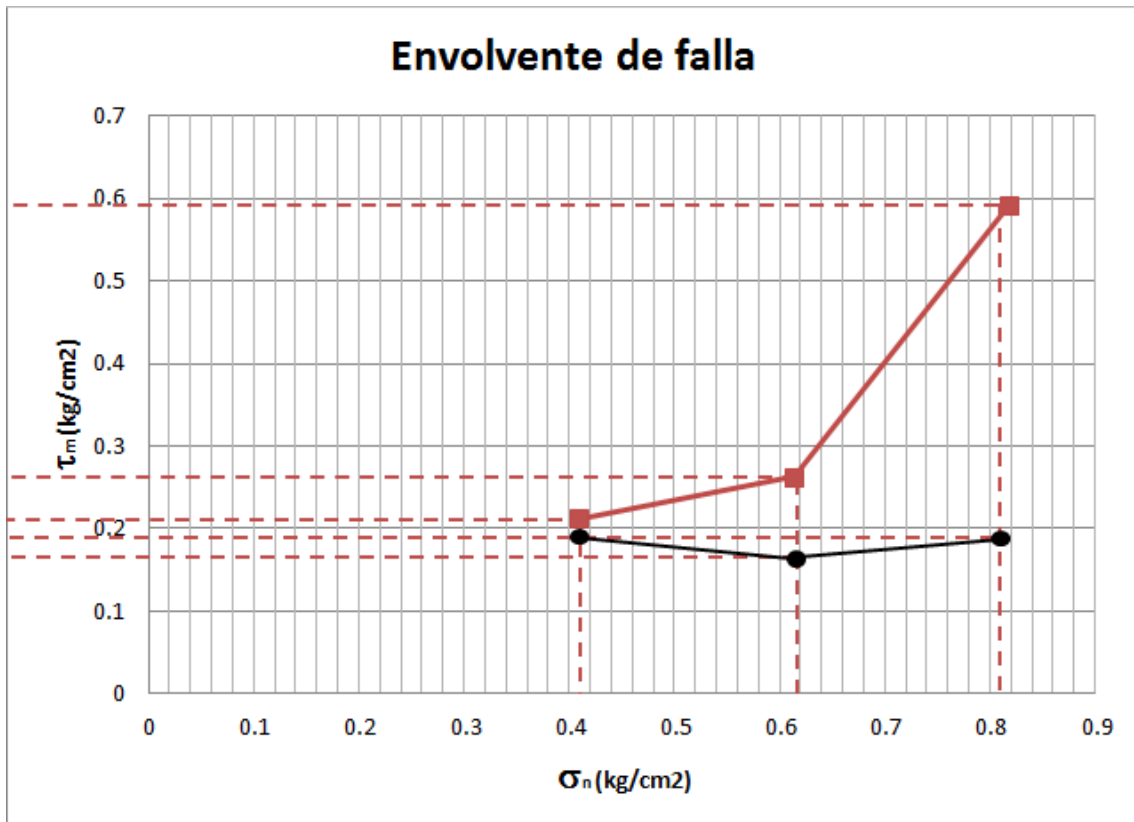
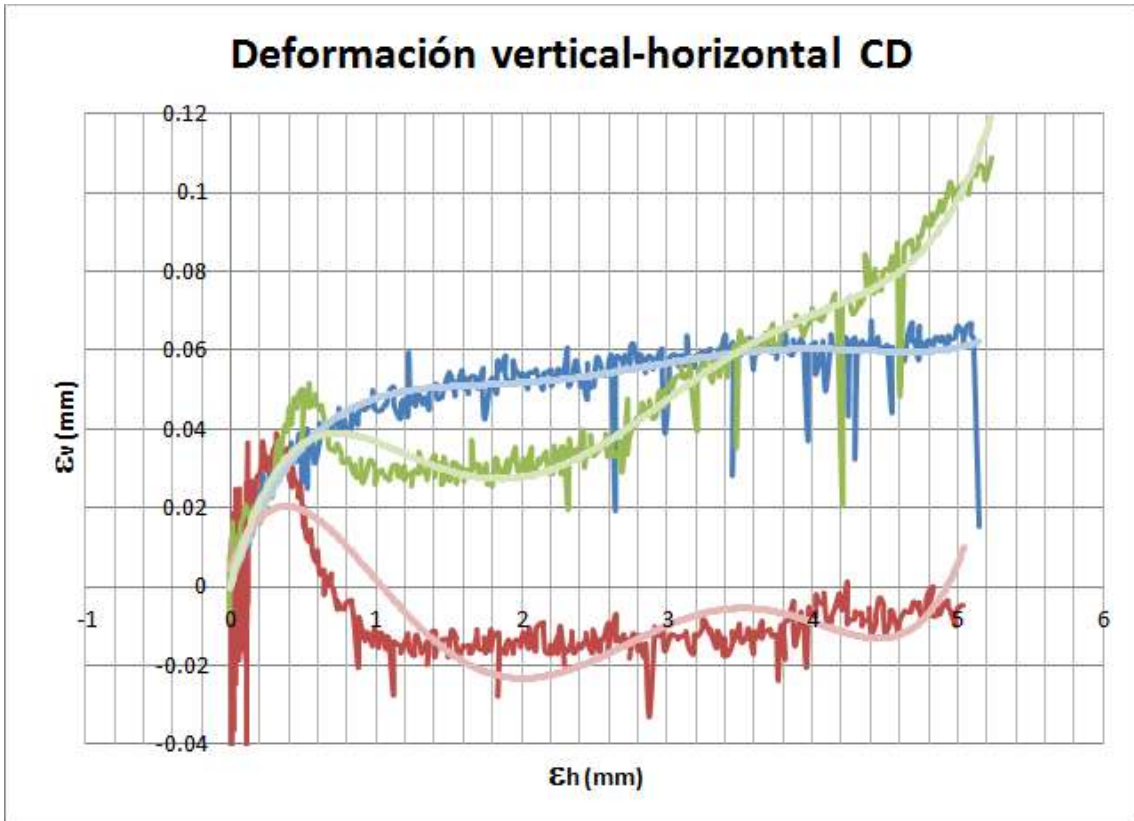


Figura 182: resumen envolvente de falla resistencia máxima y residual pruebas sin grieta tipo CD.





183: resumen deformación vertical contra horizontal pruebas sin grieta tipo CD.

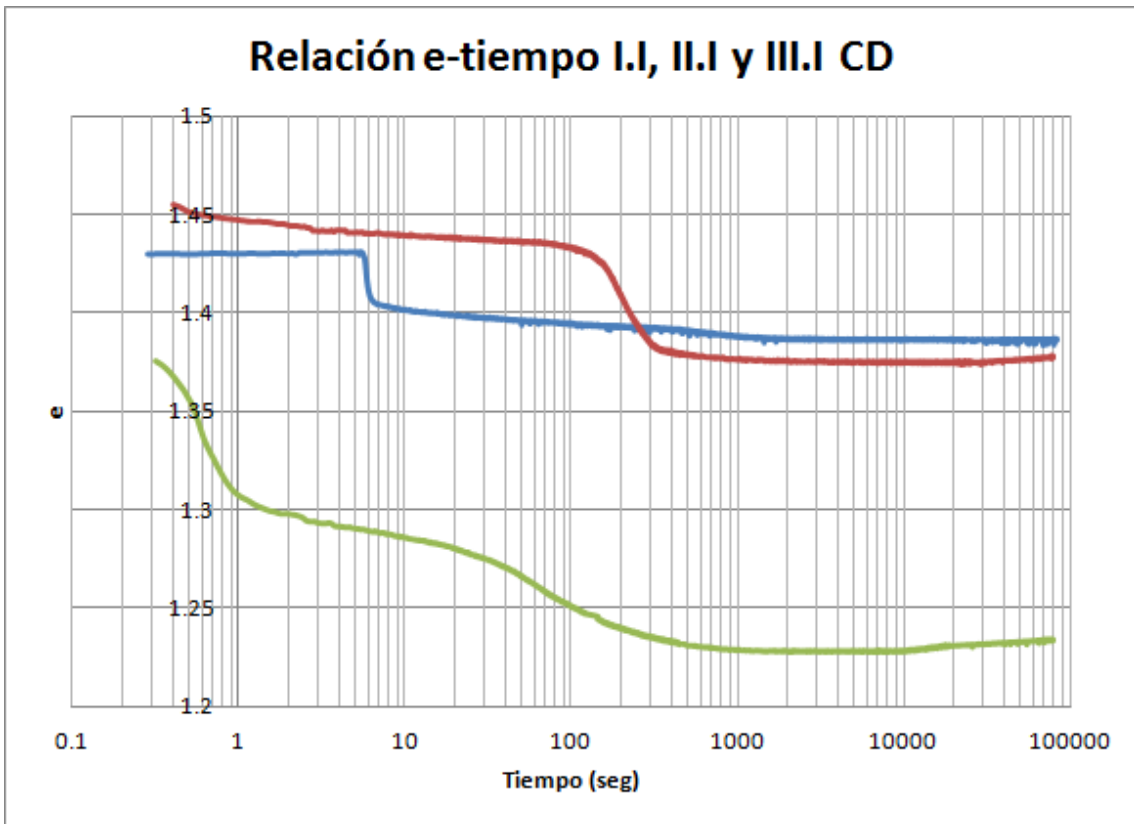


Figura 184: resumen relación de vacíos pruebas sin grieta tipo CD.

