

**Universidad de Costa Rica
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil**

Resistencia residual en suelos finos

Tesis de Graduación

Que para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil

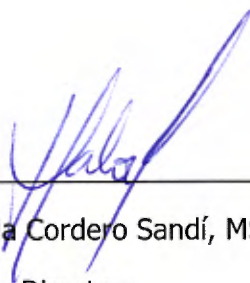
Presenta:

Javier García Mainieri

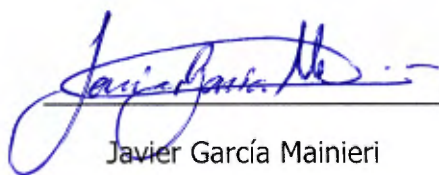
Directora del Proyecto de Graduación:

Ing. Marcia Cordero Sandí, MSc.

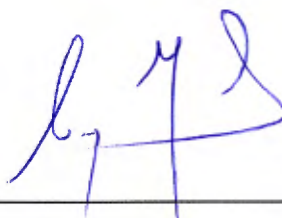
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio



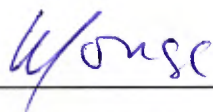
Ing. Marcia Cordero Sandí, MSc.
Directora



Javier García Mainieri



Ing. Sergio Sáenz Aguilar, MSc.
Asesor



Ing. William Vargas Monge, D.Eng.
Asesor



Ing. Óscar Valerio Salas
Asesor

Derechos de autor

Fecha: 2016, Agosto, 17

El suscrito, Javier García Mainieri cédula 1-1517-0983, estudiante de la carrera de Licenciatura en Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica, con número de carné **B02550**, manifiesta que es autor del Proyecto Final de Graduación: **Resistencia residual en suelos finos** bajo la Dirección de la **Ingeniera, Marcia Cordero Sandí**, quien en consecuencia tiene derechos compartidos sobre los resultados de esta investigación.

Asimismo, hago traspaso de los derechos de utilización del presente trabajo a la Universidad de Costa Rica, para fines académicos: docencia, investigación, acción social y divulgación.

Nota: De acuerdo con la Ley de Derechos de Autor y Derechos Conexos N° 6683, Artículo 7 (versión actualizada el 02 de julio de 2001); "no podrá suprimirse el nombre del autor en las publicaciones o reproducciones, ni hacer en ellas interpolaciones, sin una conveniente distinción entre el texto original y las modificaciones o adiciones editoriales". Además, el autor conserva el derecho moral sobre la obra, Artículo 13 de esta ley, por lo que es obligatorio citar la fuente de origen cuando se utilice información contenida en esta obra.

Agradecimientos

Mamá y papá, su apoyo incondicional, guía constante y consejo fueron parte fundamental de este proceso que ahora termina. Los sacrificios que hacen día a día para que sus hijos e hijas y nietas cumplan sus metas y sueños, son y seguirán siendo muestra infinita de amor. Son todo un ejemplo. Mis logros y éxitos son suyos también.

Compañer@s de estudio, ahora colegas y compañer@s de vida, su apoyo y amistad está siempre en mi corazón. Han hecho de este proceso uno más llevadero y divertido. Atesoraré para siempre los momentos que hemos pasado juntos en esta etapa de nuestras vidas y espero compartamos mucho más en el futuro. Gracias.

Ericka, gracias por ser una constante fuente de motivación para ser siempre mejor, por ayudarme a llevar a buen término este trabajo y no dejarme desistir de ser un auténtico caminante:

“El auténtico caminante, escucha, pero luego debe comprobarlo todo por sí mismo. Apunta más allá de toda forma, por ello no se conforma con nada, ni se conforma a nada.” Rumi

Dedicatoria

*A los que somos luz,
para que muchos más brillen.*

"Our deepest fear is not that we are inadequate.

Our deepest fear is that we are powerful beyond measure.

It is our light, not our darkness, that most frightens us.

We ask ourselves, who am I to be brilliant, gorgeous, talented and fabulous?

Actually, who are you not to be?

You are a child of God.

Your playing small does not serve the world.

There's nothing enlightened about shrinking so that other people won't feel insecure around you.

We were born to make manifest the glory of God that is within us.

It's not just in some of us; it's in everyone.

*And as we let our own light shine,
we unconsciously give other people
permission to do the same.*

*As we are liberated from our own fear,
Our presence automatically liberates others."*

-Marianne Williamson

Reconocimientos

Al autor de este documento le gustaría en especial mencionar y agradecer por su participación en este proyecto a:

Steven Carballo

Manrique Vargas

Alfredo Marchena

por su ayuda y orientación en el Laboratorio de Geotecnia.

Geraldine Conejo (Escuela de Química UCR-Unidad de XRD)

Jorge Salazar (Pitra-LanammeUCR)

por su ayuda en la ejecución de ensayos TGA/DTG y XRD.

Marcia Cordero

Óscar Valerio

Sergio Sáenz

William Vargas

por su guía y dirección.

Índice

1	Introducción.....	1-1
1.1	Justificación.....	1-1
1.1.1	El problema específico	1-1
1.1.2	Importancia	1-2
1.1.3	Antecedentes	1-3
1.2	Objetivos.....	1-5
1.2.1	Objetivo general.....	1-5
1.2.2	Objetivos específicos.....	1-5
1.3	Delimitación del problema.....	1-5
1.3.1	Alcance.....	1-5
1.3.2	Limitaciones.....	1-6
1.4	Descripción de la metodología.....	1-9
2	Marco conceptual del estudio.....	2-1
2.1	Resistencia Residual	2-2
2.2	Condición drenada y no drenada	2-3
2.3	Comportamiento residual de los suelos	2-5
2.3.1	Envolvente de resistencia residual.....	2-5
2.3.2	Comportamiento post-pico de la curva esfuerzo deformación	2-9
2.3.3	Relación entre la resistencia residual, la fracción de arcilla, la plasticidad y la mineralogía	2-10
2.3.4	Correlaciones para determinar la resistencia residual	2-14
2.4	Equipos utilizados en este trabajo.....	2-17
2.4.1	Equipo de corte torsional.....	2-17
2.4.2	Equipo de corte directo	2-21
2.4.3	Resultados obtenidos con los equipos (comparación entre ellos y valores de campo)	2-22
2.5	Consideraciones metodológicas	2-23
2.5.1	Fabricación de los especímenes	2-23
2.5.2	Velocidad de falla	2-23
3	Caracterización geotécnica de los suelos estudiados	3-1

3.1	Suelo 1	3-1
3.1.1	Zona de muestreo	3-1
3.1.2	Descripción de la muestra	3-2
3.1.3	Identificación del suelo	3-3
3.1.4	Historia de esfuerzos del suelo 1	3-17
3.2	Suelo 2	3-19
3.2.1	Zona de muestreo	3-19
3.2.2	Descripción de la muestra	3-20
3.2.3	Identificación del suelo	3-20
3.2.4	Historia de esfuerzos del suelo 2	3-28
3.3	Resumen de las características de los suelos estudiados	3-30
4	Metodología de trabajo experimental	4-1
4.1	Calibración de la metodología definitiva	4-1
4.1.1	Análisis de la velocidad de falla para el equipo <i>Shearmatic</i>	4-1
4.1.2	Manejo de la memoria (máquina <i>Shearmatic</i>)	4-6
4.1.3	Cantidad de ciclos de carga (<i>Shearmatic</i>)	4-6
4.1.4	Remoldeo del suelo al utilizar la máquina <i>Torshear</i>	4-7
4.1.5	Implementación de una herramienta para obtener muestras inalteradas y ensayarlas en la máquina <i>Torshear</i>	4-7
4.1.6	Ensayos con distintas densidades (<i>Torshear</i>)	4-9
4.1.7	Esfuerzos normales	4-10
4.1.8	Consolidación	4-10
4.1.9	Cajas de corte (<i>Shearmatic</i>)	4-11
4.2	Procedimiento definitivo recomendado y utilizado	4-11
4.2.2	Totalidad de ensayos realizados	4-22
5	Resultados	5-1
5.1	Suelo 1	5-1
5.1.1	Corte directo residual	5-1
5.1.2	Corte torsional residual	5-15
5.2	Suelo 2	5-22
5.2.1	Corte directo residual	5-22
5.2.2	Corte torsional residual	5-29
6	Análisis de resultados	6-1

6.1	Resultados esperados.....	6-1
6.2	Forma de las curvas esfuerzo-deformación y cambios volumétricos	6-3
6.2.1	Suelo 1.....	6-3
6.2.2	Suelo 2.....	6-5
6.2.3	Contenido de humedad.....	6-7
6.3	Resultados obtenidos en la máquina Shearmatic.....	6-8
6.3.1	Resistencia pico encontrada	6-8
6.3.2	Análisis de caída (en cada ciclo) de resistencia reportada.....	6-9
6.3.3	Resistencia residual encontrada	6-15
6.3.4	Deformación en el momento de la falla y velocidad drenada.....	6-21
6.3.5	Comparación Pico vs. Residual.....	6-22
6.3.6	Comparación entre cajas.....	6-24
6.3.7	Arriba o abajo	6-25
6.3.8	Corrección de área	6-25
6.4	Resultados obtenidos en la máquina <i>Torshear</i>	6-26
6.4.1	Resistencia residual encontrada	6-26
6.5	Comparación entre las máquinas utilizadas.....	6-31
6.5.1	Diferencias en los resultados obtenidos	6-32
6.5.2	Compendio de vivencias, resultados y bibliografía	6-34
6.6	Comentarios finales.....	6-36
6.6.1	Cohesión residual efectiva	6-36
6.6.2	Criterio de falla no lineal	6-38
6.6.3	Valores más representativos de resistencia residual.....	6-39
7	Conclusiones y recomendaciones	7-1
7.1	Verificación de cumplimiento de los objetivos planteados	7-1
7.2	Ideas más importantes que se desprenden de los resultados obtenidos	7-1
7.3	Análisis mineralógicos.....	7-2
7.4	Recomendaciones metodológicas	7-2
7.5	Futuras líneas de investigación.....	7-4
	Referencias bibliográficas.....	a
	Apéndices.....	e

Apéndice 1: Particularidades de funcionamiento de la máquina <i>Shearmatic</i> y manejo de datos de normalización de resultados	e
Apéndice 2: Una herramienta para obtener muestras inalteradas y ensayarlas en la máquina Torshear.....	n

Índice de figuras

Figura 1. Metodología del proyecto	1-10
Figura 2. Resistencia pico y resistencia residual. Fuente: Vargas, s.f. Modificada	2-2
Figura 3. Curvas típicas de ensayos de corte drenado. Fuente: Gonzales de Vallejo et. al., (2002) Modificada.	2-4
Figura 4. Criterio de falla de Mohr-Coulomb Fuente: Leal, Gallegos & Rojas (2012).....	2-5
Figura 5. Envolventes de falla de resistencia pico y residual Fuente: Suárez, 2002 Modificada.....	2-6
Figura 6. Envolvente de falla residual completa. Fuente: Hawkins & Privett (1985). Modificada.....	2-8
Figura 7. Comportamiento típico de un ensayo de resistencia residual en un suelo con (a) una alta fracción arcilla y (b) una baja fracción de arcilla. Fuente: Skempton (1985). Modificada.....	2-10
Figura 8. Ubicación de minerales arcillosos en la carta de plasticidad de Casagrande Fuente: Holtz y Kovacs, 1981; Traducida por Vargas, 2013).....	2-12
Figura 9. Valores de campo y ensayos de anillo de resistencia residual en arenas, kaolin y bentonita Fuente: Skempton, 1985. Modificada	2-14
Figura 10. Correlación propuesta por Stark & Eid (1994). Modificada	2-15
Figura 11. Correlación triangular propuesta con isoclinas de σ_r para la estimación del σ_r con base en la composición mineralógica. Fuente: Tiwari & Marui (2005).....	2-16
Figura 12. Muestra de ensayo de corte torsional en el aparato de Bishop et al. (1971). Modificada.....	2-18
Figura 13. Muestra de ensayo de corte torsional en el aparato de Bromhead. Fuente: Meehan et al. 2007	2-18
Figura 14. Fricción de pared en el aparato de Bromhead. Fuente: Meehan et al. 2007	2-19
Figura 15. Diferencia entre la placa original y la modificada para el aparato de Bromhead. Fuente: Meehan et al. 2007	2-20
Figura 16. Principio del ensayo de corte directo. Fuente: K.H Head (1994) Modificada	2-21
Figura 17. Ubicación de la zona de muestreo del suelo 1	3-1
Figura 18. Talud del que se obtuvo el suelo 1	3-2
Figura 19. Muestra de suelo 1	3-2
Figura 20. Carta de Plasticidad de Casagrande con resultados de la prueba de límites de Atterberg del Suelo 1.....	3-4
Figura 21. Composición granulométrica del suelo 1	3-5

Figura 22. Gráfico de humedad contra tiempo del talud muestreado para el suelo 1	3-6
Figura 23. Curvas del ensayo TGA para el suelo 1 [Muestra seca al aire, pasando por la malla #200]	3-8
Figura 24. Curvas del ensayo TGA para el suelo 1 [Muestra seca al horno, pasando por la malla #200]	3-8
Figura 25. Curvas TGA para caolinita. Fuente: Tonle & Detellier (2008)	3-10
Figura 26. Muestra de suelo 1 antes y después del ensayo de TGA.....	3-11
Figura 27. Patrón de difracción para el suelo pasado por la malla #200	3-12
Figura 28. Patrón de difracción para el suelo completo	3-13
Figura 29. Patrón de difracción para el suelo pasado por la malla #200 y calcinado	3-14
Figura 30. Comparación entre patrones de difracción	3-15
Figura 31. Gráfico del esfuerzo axial (escala log) vs razón de vacíos (completa, con descarga) y gráfico del logaritmo del coeficiente de consolidación vs razón de vacíos para el ensayo de consolidación del suelo 1	3-17
Figura 32. Ubicación de la zona de muestreo del suelo 2	3-19
Figura 33. Talud del que se obtuvo el suelo 2.....	3-20
Figura 34. Carta de Plasticidad de Casagrande con resultados de la prueba de límites de Atterberg del Suelo 2.....	3-21
Figura 35. Composición granulométrica del suelo	3-22
Figura 36. Gráfico de humedad contra tiempo del talud muestreado para el suelo 2 ...	3-24
Figura 37. Curvas del ensayo TGA para el suelo 2 [Muestra seca al aire, pasando por la malla #200]	3-25
Figura 38. Curvas del ensayo TGA para el suelo 2 [Muestra seca al aire, pasando por la malla #200]	3-25
Figura 39. Muestras de suelo 2 antes y después del ensayo de TGA	3-27
Figura 40. Gráfico del esfuerzo axial (escala log) vs razón de vacíos (completa, con descarga) y Gráfico coeficiente de consolidación (escala log) vs razón de vacíos para el ensayo de consolidación del suelo 2.....	3-28
Figura 41. Referencia típica de humedad de saturación, relación de vacíos y peso unitario. (Vargas, 2013) Modificado	3-31
Figura 42. Análisis de velocidad de falla, caso 1	4-2
Figura 43. Análisis de velocidad de falla, caso 2	4-3
Figura 44. Análisis de velocidad de falla, caso 3	4-3
Figura 45. Análisis de velocidad de falla, caso 4	4-4
Figura 46. Análisis de velocidad de falla, caso 5	4-4

Figura 47. Ensayos para la máquina Torshear con y sin procedimiento de molienda (Esfuerzo Normal 199 kPa).....	4-7
Figura 48. Ensayo de muestra inalterada en la máquina Torshear	4-8
Figura 49. Preparación de la muestra de suelo inalterada para la prueba en el equipo Shearmatic	4-12
Figura 50. Superficie de falla de un ensayo en el equipo Shearmatic.....	4-14
Figura 51. Variación del área en el ensayo de corte directo Fuente: Bardet (1997).....	4-15
Figura 52. Preparación de la muestra para el equipo Torshear 1	4-17
Figura 53. Muestra lista para ensayo en el equipo Torshear	4-18
Figura 54. Muestra después del ensayo en el equipo Torshear	4-20
Figura 55. Superficie de falla típica al final de los ensayos del suelo 1 (Shearmatic)	5-1
Figura 56. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 49 kPa).....	5-2
Figura 57. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 49 kPa)	5-3
Figura 58. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 49 kPa)	5-3
Figura 59. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 99 kPa).....	5-4
Figura 60. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 99 kPa)	5-4
Figura 61. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 99 kPa)	5-5
Figura 62. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 196 kPa).....	5-5
Figura 63. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 196 kPa)	5-6
Figura 64. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 196 kPa).....	5-6
Figura 65. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 51 kPa).....	5-7
Figura 66. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 51 kPa)	5-7
Figura 67. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 51 kPa)	5-8
Figura 68. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 98 kPa).....	5-9
Figura 69. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 98 kPa)	5-9

Figura 70. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 98 kPa)	5-10
Figura 71. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 201 kPa)	5-10
Figura 72. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 201 kPa)	5-11
Figura 73. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 201 kPa)	5-11
Figura 74. Explicación del cuadro resumen de resultados de la máquina Shearmatic	5-13
Figura 75. Gráfico esfuerzo - deformación (Esfuerzo Normal 49 kPa)	5-15
Figura 76. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 49 kPa)	5-15
Figura 77. Gráfico esfuerzo - deformación (Esfuerzo Normal 99 kPa)	5-16
Figura 78. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 99 kPa)	5-16
Figura 79. Gráfico esfuerzo - deformación (Esfuerzo Normal 199 kPa)	5-17
Figura 80. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 199 kPa)	5-17
Figura 81. Gráfico esfuerzo - deformación (Esfuerzo Normal Aprox. 300 kPa)	5-18
Figura 82. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal Aprox. 300 kPa)	5-18
Figura 83. Gráfico esfuerzo - deformación (Esfuerzo Normal Aprox. 400 kPa)	5-19
Figura 84. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal Aprox. 400 kPa)	5-19
Figura 85. Superficie de falla típica al final de los ensayos del suelo 1 (Torshear)	5-20
Figura 86. Superficie de falla típica al final de los ensayos del suelo 2 (Shearmatic)	5-22
Figura 87. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 49 kPa)	5-23
Figura 88. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 49 kPa)	5-23
Figura 89. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 49 kPa)	5-24
Figura 90. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 101 kPa)	5-24
Figura 91. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 101 kPa)	5-25
Figura 92. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 101 kPa)	5-25

Figura 93. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 199 kPa).....	5-26
Figura 94. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 199 kPa)	5-26
Figura 95. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 199 kPa).....	5-27
Figura 96. Curvas deformación vertical – deformación horizontal.....	5-29
Figura 97. Curvas deformación vertical – deformación horizontal.....	5-29
Figura 98. Superficie de falla típica al final de los ensayos del suelo 2 (Torshear)	5-30
Figura 99. Envolventes de resistencia pico sin considerar corrección de área	6-8
Figura 100. Envolventes de resistencia pico considerando corrección de área	6-8
Figura 101. Resultado ensayo de corte directo “reversivo” (suelo 1, 99 kPa)	6-10
Figura 102. Envolventes curvas de falla residual (Shearmatic).....	6-16
Figura 103. Envolventes lineales para el suelo 1 (cohesión cero) [caja cuadrada y caja circular].....	6-17
Figura 104. Envolventes lineales para el suelo 2 (cohesión cero)	6-18
Figura 105. Envolventes lineales para el suelo 1 (cohesión de ajuste) [caja circular] ...	6-19
Figura 106. Envolventes lineales para el suelo 1 (cohesión de ajuste) [caja cuadrada]	6-19
Figura 107. Envolventes lineales para el suelo 2 (cohesión de ajuste)	6-20
Figura 108. Comparación resistencia pico con residual (suelo 1).....	6-22
Figura 109. Comparación resistencia pico con residual (suelo 2).....	6-23
Figura 110. Envolventes curvas de falla residual (Torshear)	6-27
Figura 111. Envolventes lineales (cohesión de ajuste)	6-28
Figura 112. Envolventes lineales (cohesión de ajuste) 2	6-29
Figura 113. Envolventes lineales (cohesión cero)	6-29
Figura 114. Envolventes lineales (cohesión cero) 2.....	6-30
Figura 115. Movimiento de la tapa superior de la caja de corte directo	6-31
Figura 116. Posibilidad de envolvente bilineal	6-39
Figura 117. Todos los resultados, suelo 1.....	6-40
Figura 118. Todos los resultados, suelo 2.....	6-41
Figura 119. Máquina Shearmatic, Lanamme-UCR.....	e
Figura 120. Gráfica fuerza-deformación de un suelo sometido a la falla de corte directo en la máquina Shearmatic	f
Figura 121. Gráfica esfuerzo-deformación de un suelo sometido a la falla de corte directo cíclico en la máquina Shearmatic	g

Figura 122. Caja de corte circular después de un ensayo de corte directo residual reversivo	h
Figura 123. Ensamble caja-brazo de máquina Shearmatic.....	i
Figura 124. Motor y pistón que mueve la caja de corte de la máquina Shearmatic	i
Figura 125. Rieles y tiras de balines bajo la caja de corte de la máquina Shearmatic.....	j
Figura 126. Gráfica de posición-tiempo de la caja de corte para un ensayo (hacia adelante y reversa) de corte directo en la máquina Shearmatic	j
Figura 127. Pegas de silicón en la caja de corte de la Shearmatic.....	m
Figura 128. Diseño original de la herramienta	n
Figura 129. Partes de la herramienta confeccionada.....	o
Figura 130. Uso de la herramienta confeccionada 1.....	o
Figura 131. Uso de la herramienta confeccionada 2.....	p
Figura 132. Uso de la herramienta confeccionada 3.....	p
Figura 133. Uso de la herramienta confeccionada 4.....	q

Índice de cuadros

Cuadro 1. Ensayos	1-6
Cuadro 2. Actividad de las arcillas (Skempton, 1953).....	2-11
Cuadro 3. Actividad de algunos minerales arcillosos (Skempton, 1953; Mitchell, 1993; tomado de Vargas, 2013)	2-11
Cuadro 4. Correlaciones publicadas para la resistencia residual Fuente: Tiwari & Marui 2005	2-15
Cuadro 5. Granulometría del suelo 1	3-5
Cuadro 6. Pesos unitarios medidos del suelo 1.....	3-6
Cuadro 7. Interpretación de curvas TGA y DTG para el suelo 1	3-9
Cuadro 8. Condiciones iniciales y finales del ensayo de consolidación unidimensional del suelo 1.....	3-17
Cuadro 9. Resumen de resultados para el ensayo de consolidación del suelo 1.....	3-18
Cuadro 10. Granulometría del suelo 1	3-22
Cuadro 11. Pesos unitarios medidos del suelo 2.....	3-23
Cuadro 12. Condiciones iniciales y finales del ensayo de consolidación unidimensional del suelo 2.....	3-28
Cuadro 13. Resumen de resultados para el ensayo de consolidación del suelo 2.....	3-29
Cuadro 14. Resumen de la caracterización de los suelos investigados.....	3-30
Cuadro 15. Resumen de resultados de ensayos de corte directo residual para análisis de velocidades de falla	4-5
Cuadro 16. Resultados de ensayos de análisis de densidad en las muestras ensayadas en la máquina Torshear.....	4-10
Cuadro 17. Cálculo de velocidad de falla para los suelos ensayados.....	4-13
Cuadro 18. Cantidad de ensayos de corte residual realizados	4-22
Cuadro 19. Resultados de la máquina Shearmatic en el suelo 1.....	5-14
Cuadro 20. Resultados de la máquina Torshear en el suelo 1	5-21
Cuadro 21. Resultados de la máquina Shearmatic en el suelo 2.....	5-28
Cuadro 22. Resultados de la máquina Torshear en el suelo 2.....	5-30
Cuadro 23. Comparación entre el comportamiento obtenido y el esperado para el suelo 1 (Shearmatic).....	6-4
Cuadro 24. Envoltentes de resistencia pico	6-9
Cuadro 25. Análisis de caída de la resistencia para ensayos realizados con el suelo 1..	6-11
Cuadro 26. Análisis de caída de la resistencia para ensayos realizados con el suelo 2..	6-12

Cuadro 27. Ángulos de fricción residual secante (ϕ_{rs}) obtenidos con la máquina Shearmatic	6-15
Cuadro 28. Envolventes lineales con cohesión cero (Shearmatic).....	6-18
Cuadro 29. Envolventes lineales con cohesión de ajuste (Shearmatic).....	6-20
Cuadro 30. Comparación resistencia pico con residual (ambos suelos).....	6-23
Cuadro 31. Ángulos de fricción residual secante (ϕ_{rs}) obtenidos con la máquina Torshear	6-26
Cuadro 32. Datos para la confección de envolventes lineales (Torshear)	6-28
Cuadro 33. Envolventes lineales con cohesión de ajuste (Torshear).....	6-29
Cuadro 34. Envolventes lineales con cohesión cero (Torshear).....	6-30
Cuadro 35. Puntos de comparación entre los equipos.....	6-35
Cuadro 36. Envolventes lineales considerando todos los resultados	6-42

Simbología

w contenido de humedad

w_0 contenido de humedad inicial

w_f contenido de humedad final

τ esfuerzo cortante

τ_{res} esfuerzo cortante residual

τ_{pico} esfuerzo cortante pico

LL límite líquido

LP límite plástico

IP, PI índice de plasticidad

FA, CF fracción de arcilla: porcentaje (peso) de partículas de tamaño $< 2 \mu m$

A actividad

σ' esfuerzo normal efectivo

c_r' cohesión residual efectiva, intercepto

c' cohesión efectiva, intercepto

ϕ' ángulo de fricción efectivo

ϕ_r' ángulo de fricción residual efectivo

ϕ_{rs}' ángulo de fricción residual secante efectivo

ϕ_{rt}' ángulo de fricción residual secante efectivo para 100 kPa de esfuerzo normal

d_f deformación en el momento de la falla

d_r deformación en el momento en el que se alcanza el estado residual

PC pre consolidado(a)

NC normalmente consolidado(a)

ρ_d densidad seca del suelo

e razón de vacíos

S porcentaje de saturación

ϵ deformación axial en porcentaje de la altura

C_v coeficiente de consolidación

García Mainieri, Javier Jesús

Resistencia residual en suelos finos

Tesis de Graduación - Ingeniería Civil – San José, Costa Rica

J.J. García M., 2016

xx, 165, [17] h; ils. col. – 50 refs.

Resumen

El objetivo de este trabajo es lograr determinar la resistencia residual drenada de suelos finos utilizando dos máquinas disponibles: *Shearmatic* (corte directo reversivo) y *Torshear* (corte torsional); para lo que fue necesario generar una metodología experimental suficiente y replicable.

Se hicieron pruebas de calibración de los equipos y los procedimientos con tal de llegar a una metodología definitiva para cada máquina. Luego, se realizaron 35 pruebas para dos suelos diferentes con hasta cinco esfuerzos normales. Finalmente, se realizó una interpretación de los resultados y una presentación de diferentes formas de envolventes de falla residual.

Se logró comparar muchas formas posibles de definir la resistencia residual en el laboratorio; se encontró, entre otras cosas, se determinó que lo más recomendable es utilizar la máquina *Toshear*, siguiendo la tendencia generalizada de los últimos tiempos. Se argumentó y encontró, que indiferentemente del equipo que se use, o la preparación de la muestra, se puede obtener resultados comparables y similares entre sí, y que estos son similares a valores obtenidos de correlaciones generadas por autores referentes del tema.

Es la primera vez que se realiza un estudio como este y se aportan valores de referencia para la resistencia residual en este país. Se espera que trabajos como este, continúen por ser una guía accesible que permita la propagación de este tipo de ensayo y su aplicación en la práctica de la profesión en Costa Rica.

J. J. G. M.

MECÁNICA DE SUELOS; RESISTENCIA RESIDUAL; CORTE DIRECTO; CORTE TORSIONAL;
SUELOS FINOS; CONDICIÓN DRENADA; ENSAYOS DE LABORATORIO

Ing. Marcia Cordero Sandí, MSc.

Escuela de Ingeniería Civil

1 Introducción

La resistencia residual es un concepto relativamente nuevo en la mecánica de suelos y poco estudiado en Costa Rica y la región en general. El desarrollo del concepto y lograr comprender la resistencia residual de un suelo sería de utilidad en casos en los que superada la resistencia pico de un talud, por ejemplo, se debe estabilizar la masa de suelo.

El presente documento es el sucesor de un trabajo de investigación realizado también en el Laboratorio de Geotecnia del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales¹ (en adelante LanammeUCR), que tuvo como objetivo definir una metodología para determinar la resistencia residual de una muestra tanto en la máquina de corte directo como en la de corte torsional. En esta investigación se sigue la metodología propuesta y se determinan y comparan los procedimientos requeridos para determinar la resistencia residual en ambos equipos completando la metodología esbozada por Ugarte (2014).

En este capítulo se introduce el concepto de resistencia residual, se justifica la motivación de investigar este tema, se delimita este proyecto y se definen los objetivos que le dieron forma; finalmente se describe la metodología del proyecto de investigación.

1.1 Justificación

1.1.1 El problema específico

Dadas ciertas condiciones, un suelo tiene una capacidad residual o crítica distinta a la capacidad máxima, al ser sometido a grandes deformaciones. En Costa Rica, la experiencia en la determinación de la resistencia residual se limita a ensayos de campo, que no han sido documentados; el de Ugarte (2014) fue el primer intento de determinarla en el laboratorio.²

Vargas (1998), se refiere a tres fases o estados definidos en la curva esfuerzo-deformación para una muestra de suelo: la fuerza pico, que comprende la deformación pseudo-elástica del suelo hasta alcanzar la resistencia pico; la fase de transformación con o sin caída de fuerza posterior a alcanzar el máximo de esfuerzo y la fase crítica o el estado último. A nivel

¹ Que es parte de la Escuela de Ingeniería Civil (EIC) de la Universidad de Costa Rica (UCR)

² Alberto Méndez (1981), reportó una envolvente de falla residual pero realizó ensayos a deformaciones muy pequeñas como para tomar los valores obtenidos como residuales. Es probable que otros hayan hecho algo similar, pero ningún autor a publicado valores que sirvan de referencia o realizado investigación con este objetivo.

local la primera etapa ha sido ampliamente estudiada, las otras dos no. La teoría define que existen estas dos etapas y justifica su existencia. Los datos experimentales y correlaciones empíricas dan una idea de lo que se puede esperar en estas dos etapas, pero aún no se tienen mediciones experimentales de los suelos existentes en el país para validar su aplicación en el medio.

1.1.2 Importancia

El diseño de un refuerzo para un talud o el diseño de una cimentación parten de las propiedades mecánicas del suelo que soportará las cargas analizadas. El diseño será exitoso en la medida en la cual los datos de entrada sean adecuados y las simplificaciones utilizadas para modelar acertadas. Las simplificaciones son criterio del diseñador, elegir las propiedades de resistencia adecuada también, pero para la determinación de estas últimas hay ensayos de laboratorio, que pueden aplicarse.

Un talud con una superficie de falla definida aún tiene capacidad de resistir deformación; esta es la resistencia residual del suelo en la superficie de falla. En el caso de una arcilla pre consolidada, por ejemplo, es distinta a la resistencia pico. A raíz de esto Das (2012), indica que la resistencia cortante residual de las arcillas es importante en la evaluación de la estabilidad a largo plazo de pendientes nuevas y existentes, en el diseño de medidas correctivas. Por otra parte, Vargas (1998) indica que los deslizamientos son también un ejemplo de grandes deformaciones que acompañan la falla de una masa de suelo. Grandes daños, rupturas o colapso de estructuras son efectos comunes de grandes deformaciones. Si bien la ocurrencia de grandes deformaciones es evitada en muchos problemas de diseño, en algunas estructuras, como diques de río, se permite la deformación mientras la misma mantenga las solicitaciones de servicio, por lo tanto, el estudio de grandes deformaciones tiene importantes aplicaciones a nivel práctico para el diseño en condiciones extremas.

Esto representa la importancia de conocer más al respecto de la resistencia residual de los suelos en general y de los presentes en Costa Rica con mayor importancia para nosotros. ¿Es considerablemente menor la resistencia residual que la resistencia pico? ¿En qué casos? ¿Se estabiliza la fuerza necesaria para deformar el suelo como lo dice la literatura, es decir, existe realmente un valor medible para la resistencia residual? ¿Cuáles ensayos sirven para determinarla? ¿Qué metodología debe seguirse para determinarla? ¿Cuál es el mejor camino?

1.1.3 Antecedentes

Skempton (1964), cuenta que la primera determinación de la resistencia residual de una arcilla inalterada fue publicada por Dr B. Tiedemann en 1937. R. Haefeli introdujo el término "residual" en 1938 (en Alemán) y luego en 1950 (en Inglés). El documento de Skempton (1964), del análisis de estabilidad en el largo plazo de taludes de arcilla es ícono en lo que a resistencia residual se refiere. Es uno, sino el más referenciado, en los documentos consultados durante esta investigación y dio pie a muchos otros a investigar más a fondo el tema. Luego, en 1985, el mismo autor publica un recuento de todo lo que se sabe con respecto a la resistencia residual de suelos finos hasta la fecha. Es este último documento, el que sirve de guía para comprender el comportamiento residual de los suelos finos. En él Skempton plantea que existe relación entre el ángulo de fricción y la fracción de arcilla (FA) (% por peso de partículas más pequeñas que 0,002mm), así como el índice de plasticidad.

A lo largo del tiempo se ha correlacionado la resistencia residual con el límite plástico, con el índice de plasticidad y con la fracción de arcilla. Ya en los últimos tiempos, se han establecido correlaciones entre características mineralógicas y la resistencia residual relacionando el tipo de mineral con ángulos de fricción residuales.

Stark & Eid (1994), como representantes de la ASCE (American Society of Civil Engineers), hacen una revisión amplia de artículos publicados por varios autores, que reportan datos de mediciones de resistencia residual en muestras de suelos cohesivos y/o arcillosos, provenientes de deslizamientos, presas, laderas y taludes en corte; los autores revisan datos de ensayos de 32 sitios de muestreo distintos y concluyen que la resistencia residual está relacionada con el tipo de mineral arcilloso y la cantidad de partículas de tamaño menor a 0,002mm. Además plantean que la envolvente de falla (residual) no se comporta de forma lineal por lo que la resistencia residual depende del esfuerzo normal efectivo.

Más recientemente algunos han planteado correlaciones considerando estos mismos parámetros de composición. Tiwari & Mauri (2005), por ejemplo, exponen que el modelo de Stark & Eid (1994) no funciona para todos los suelos arcillosos, aumentan la cantidad de ensayos analizados y proponen un método de correlación nuevo entre la mineralogía y las propiedades mecánicas residuales del suelo.

La resistencia residual de un suelo se puede obtener con varios aparatos de corte, tales como el de corte anular, de corte directo o con una máquina triaxial. Vargas (1998), utilizó un equipo de corte torsional para estudiar el comportamiento de arenas sometidas a grandes deformaciones y licuación. En este caso la superficie de corte se generaba en el

medio de dos cajas anulares, una que se movía y otra que no. Vithana, Nakamura, Gibo Yoshinaga & Kimura (2012) determinan la resistencia residual de suelos cohesivos aplicando ciclos de carga a la muestra con el equipo del ensayo de corte directo y utilizando el equipo torsional. Se puede entender la resistencia residual al comparar diferencias en los resultados derivados de usar distintos aparatos y diferentes metodologías (como lo hicieron Vithana *et al.* en 2012; Bayin, Cevikbilen & Iyisan en 2012; o Townsend & Gilbert en 1976). En esta investigación se utilizaron dos equipos: uno de corte directo con capacidad de moverse hacia adelante y hacia atrás (*Shearmatic*) y uno de corte torsional (*Torshear*) ambos productos del fabricante Wykeham-Farrance. El equipo de corte torsional utilizado en esta investigación es el de Bromhead, que a diferencia del utilizado por Vargas, genera la superficie de falla en la parte superior de la muestra. Esto se detalla también en el próximo capítulo.

En Ugarte (2014), se incluye un manual para este procedimiento utilizando el equipo que hay disponible en el LanammeUCR, y Vithuana *et al.* (2011) correlacionan los datos obtenidos por ambos ensayos y presentan ventajas y desventajas de utilizar cada uno de los equipos. Vargas, y Ugarte son los únicos autores nacionales, de los que se tiene referencia, en haber reportado datos de ensayos de resistencia residual, además los únicos nacionales también en reportar haber utilizado un equipo de corte torsional, Ugarte siendo la única habiendo puesto a prueba suelos del territorio costarricense.

Existe una latente necesidad de que se introduzca el uso de la resistencia residual en la práctica profesional de la Ingeniería Civil costarricense. Los análisis de estabilidad de taludes en estado residual, por ejemplo, aumentan la posibilidad de solucionar problemas antes no enfrentados o de considerar nuevas soluciones. Un posible caso de aplicación podría ser el sector oeste del volcán Irazú, dónde se encuentra cantidad importante de torres de telecomunicaciones, en peligro, dado que la inestabilidad de la ladera en la que están cimentadas se manifiesta como un deslizamiento. Cómo este hay otros casos; para realizar una intervención ingenieril es necesario conocer las características mecánicas del material especialmente la resistencia, específicamente la residual.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Determinar la resistencia residual drenada de suelos finos utilizando dos equipos distintos disponibles.

1.2.2 Objetivos específicos

- Realizar una revisión bibliográfica para conocer: al respecto del comportamiento residual de los suelos finos, cómo encontrar la capacidad residual en el laboratorio y correlaciones que se han planteado para determinarla.
- Caracterizar ingenierilmente los suelos utilizados con tal de asociar sus propiedades con la resistencia residual.
- Definir una metodología experimental replicable a seguir que permita determinar envolventes de resistencia residual con los equipos disponibles.
- Determinar la resistencia residual drenada de los suelos en el equipo de corte torsional *Torshear* (Modelo 27-WF2202).
- Determinar la resistencia residual drenada de los suelos utilizando ciclos de avance y retroceso en el equipo de corte directo *Shearmatic* (Modelo 27-WF2180).
- Reportar la resistencia residual en los términos más utilizados en la literatura consultada, para así enfrentar los resultados de los ensayos realizados con lo publicado al respecto por distintos autores.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos en los distintos equipos.

1.3 Delimitación del problema

Este es el segundo trabajo de un programa de investigación sobre la revisión de los parámetros de resistencia al esfuerzo cortante de los suelos a grandes deformaciones, para lo cual se tienen los siguientes alcances y limitaciones:

1.3.1 Alcance

Este trabajo fue orientado a obtener gráficas esfuerzo-deformación con distintos esfuerzos normales para determinar envolventes de falla, para estudiar la fase de transformación, con o sin caída de resistencia, y la resistencia residual y/o pico de los suelos finos. Para ello se realizó trabajo experimental. Se indican a continuación los ensayos realizados en el laboratorio:

Cuadro 1. Ensayos

Propiedades	Ensayo	Norma ASTM	Cantidad
Físicas	Granulometría	D422	6
	Gravedad específica	B854	12
	Peso Unitario	D7263	12
	Límites de consistencia	D4318	9
Mecánicas	Consolidación unidimensional	D2435	2
	Corte directo "reversivo"	D3080	13
	Corte torsional	D6467	22
Análisis Mineralógico	XRD		3
	TGA/DTG		4

Con tal de entender y explicar el comportamiento residual del suelo se consultaron varias fuentes bibliográficas, que datan desde 1937 hasta la fecha. Siendo a partir de 1964 que se publican artículos específicos del tema que desarrollaran realmente el concepto; antes de esto se hablaba de equipos que posibilitaran el análisis del suelo sometido a grandes deformaciones para conseguir un estado acuñado como residual.

1.3.2 Limitaciones

1.3.2.1 Horario

Los ensayos debieron realizarse en el LanammeUCR por lo que hubo que respetar los horarios establecidos para este tipo de actividades.

1.3.2.2 Poca experiencia del laboratorista

El autor de este documento y ensayista de laboratorio contaba con poca experiencia en la realización de los primeros ensayos de laboratorio, por lo que fue necesario repetir algunos ensayos y moldeos de muestras para solventar errores y ratificar resultados.

1.3.2.3 Limitaciones de la máquina Shearmatic

- El equipo no tiene la posibilidad de alcanzar grandes deformaciones de forma continua, por lo que se trabajó con varios ciclos de ensayo con deformaciones menores a 1cm, hacia adelante y en reversa. Se utilizó una deformación de 1cm, no

porque el equipo no se pudiera deformar más, sino para evitar que en algún momento la parte superior de la pastilla estuviera fuera de la caja de corte. Se consideró que el espesor del borde de las cajas es de 1cm, de modo que si se deforman más las muestras, se corre el riesgo de que la muestra se desacomode y se pierda material durante los ensayos.

- El área de contacto de la muestra cambia conforme avanza el ensayo, por lo que en este trabajo se evaluó en 6.3.8 si sería adecuado el uso de una corrección del área a la hora de calcular los esfuerzos a partir de las fuerzas medidas por el equipo.
- La máquina tiene poca capacidad de almacenamiento por lo que hubo que ajustar la cantidad de datos registrados y la duración de los ensayos a esto.
- Los ensayos son sumamente largos por lo que se buscaron formas de aumentar la velocidad (manteniendo la condición drenada) o reducir el tiempo de ensayo (como consolidar hasta llegar a la consolidación secundaria y no hacerlo por 24h)
- Se deshabilitó una parte³ de la máquina para lograr un mejor funcionamiento: No hay un brazo de palanca para la fuerza normal, de modo que el peso colocado es el que produce el esfuerzo normal a la hora de ensayar. Esto implica que, por ejemplo, al fallar con un esfuerzo normal de 200 kPa (caja cuadrada) se deben montar pesas con un peso equivalente a 72,5 kilos. Por esta razón se limitó el esfuerzo normal de los ensayos a 200 kPa.
- Algunas limitaciones de la máquina son generadas por los desperfectos⁴mencionados:
 - Se puede indicar a la máquina cuánta deformación se requiere en el ensayo pero la caja de corte se mueve una menor distancia. Si se indica un mayor desplazamiento que 10mm la caja de corte se mueve alrededor de 10mm, en ciclos de avance y retroceso el mayor desplazamiento logrado fue de 9mm por lo que se tuvo que trabajar con esto.
 - Por otro lado, la velocidad es menor a la que se indica y no es constante ya que la caja de corte deja de moverse en algunos momentos, pero se aproxima lo suficiente al valor deseado por que no se considera esto una limitación tan importante.

³ Esto, algunos años antes del inicio de esta investigación, durante esta y antes se utilizó la máquina así; sin parte neumática de carga normal, con un marco de carga.

⁴ Se detalla al respecto de estas particularidades de funcionamiento de este equipo y cómo se enfrentaron, en el Apéndice 1: Particularidades de funcionamiento de la máquina *Shearmatic* y manejo de datos de normalización de resultados

- Hay falsos contactos en algunos puntos del mecanismo por lo que se generan “valles” que no deberían existir en las gráficas de resultados.

1.3.2.4 Limitaciones de ambos equipos (Shearmatic & Torshear)

- No se sabe con certeza si el ensayo realizado se puede considerar drenado o no. El saber esto con certeza podría explicar y esclarecer algunas inquietudes. Como alternativa se determinó si los ensayos fueron drenados comparando resultados y respaldos normativos y/o teóricos. Esto no quita valor a los resultados obtenidos. Esta es una limitación de la mayoría de los equipos utilizados para obtener valores de resistencia residual.
- Como indican Tiwari & Marui (2005), la salinidad del líquido en los poros del suelo puede influir en el valor medido de ϕ_r , en este trabajo se utilizó agua destilada como el líquido de los poros. Se considera fuera del alcance de este trabajo determinar la influencia del tipo de líquido de poro.

1.3.2.5 Limitaciones del equipo Torshear

- Existe la posibilidad de que se incluya fricción como parte del esfuerzo medido. Se trata el tema en detalle y cómo se enfrentó más adelante.

1.3.2.6 Limitaciones de los ensayos de análisis mineralógico (XRD y TGA/DTG)

- Tiwari & Mauri (2005) recomiendan, además de la forma de preparación de las muestras realizadas en este proyecto, preparar la muestra antes de la difracción humedeciéndola con etilenglicol, de modo que se hagan 4 ensayos distintos de difracción. Esto no fue posible. Además recomiendan 5 ensayos por etapa o preparación, solo fue posible hacer 1 en 3 etapas. (XRD)
- Estos ensayos se consideran semi cuantitativos y difíciles de interpretar.
- Se pudo realizar ensayos en pocas muestras ya que se hicieron sin costo alguno y no alcanzó el tiempo por un defecto que sufrió uno de los equipos requeridos.
- No se tenía experiencia alguna en la interpretación de estos ensayos por lo que se recurrió a la ayuda de Geraldine Conejo, laboratorista de XRD de la Escuela de Química de la UCR.

1.4 Descripción de la metodología

La elaboración del trabajo final de graduación estuvo compuesto por seis partes que se trabajaron de forma coordinada, avanzando progresivamente al mismo tiempo en todas las partes:

- Revisión bibliográfica: Búsqueda de metodologías para la determinación de resistencia residual sin pruebas experimentales (ya sean empíricas o teóricas), ventajas y desventajas de los equipos de corte torsional y corte directo, familiarización con las normas y procedimientos que se deben seguir para realizar los ensayos. Revisión bibliográfica de las características de las muestras elegidas.
- Reconocimiento del equipo: Familiarización con normas y procedimientos. Posterior capacitación para el uso del equipo del LanammeUCR, calibraciones y verificaciones de ser necesarias.
- Caracterización de las muestras: Realización de los ensayos de caracterización para validar lo estipulado en estudios anteriores con respecto a las muestras elegidas: Análisis granulométrico (ASTM D422), Límites de consistencia (ASTM D4318), Gravedad específica (ASTM D854), Gravedad específica natural (ASTM D7263), y clasificación SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)
- Pruebas: Ensayos de corte directo y torsional. (ASTM D3080 y D6467)
- Análisis: Determinación de envolventes de falla, relaciones, datos destacables, análisis de la caída de fuerza pasada la resistencia pico y análisis de los datos de resistencia pico y residual.
- Redacción del documento final.

La metodología seguida para la elaboración del proyecto se muestra en la *Figura 1*.

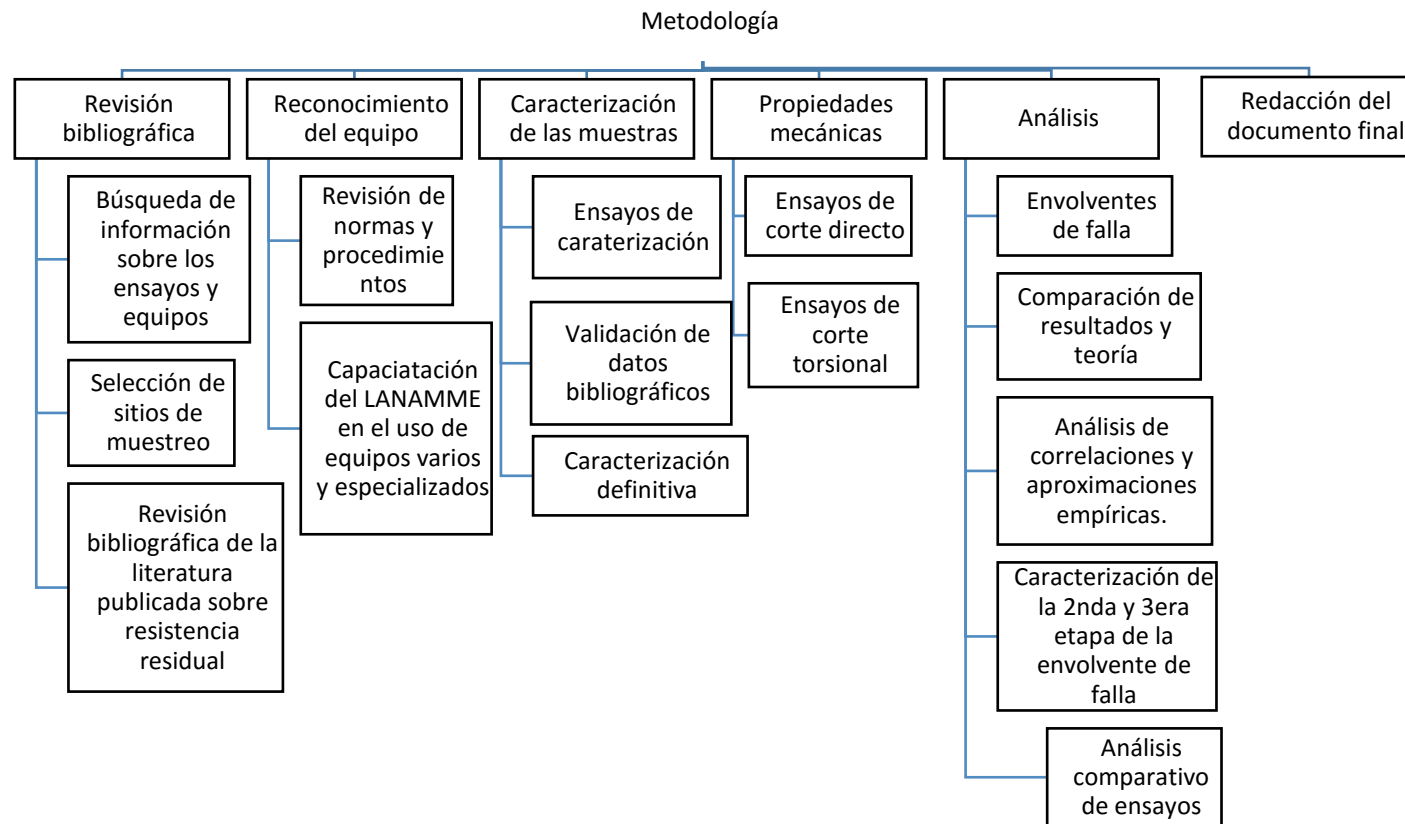


Figura 1. Metodología del proyecto

2 Marco conceptual del estudio

En este capítulo se define la resistencia residual, con qué equipos encontrarla en el laboratorio, y en qué condiciones se puede dar. Se describe el comportamiento residual de la curva esfuerzo-deformación de los suelos finos y la envolvente de resistencia residual. Se tratan las correlaciones que han sido planteadas entre la resistencia residual y algunas características de los suelos y se discuten los temas de debate expuestos en esta pequeña introducción. Una vez generado el sustento necesario se detallan algunas consideraciones metodológicas necesarias.

La resistencia pico de un suelo se ha definido en la práctica de la ingeniería, siguiendo el criterio de falla Mohr-Coulomb, como una recta con una pendiente (asociada con el ángulo de fricción) y un intercepto con el eje ordenado (cohesión). La resistencia residual como concepto no puede aceptar que exista cohesión en un plano de falla ya que en él dos sólidos distintos se rozan, el suelo deja de poder considerarse un sólido después de la falla. Resultados de laboratorio sugieren que existe un intercepto con el eje ordenado, al considerar la envolvente residual de falla una recta. Como respuesta a esto algunos autores han optado por concebir la envolvente residual de falla como no lineal. Aún no se tiene certeza de por qué esto sucede ni a que se debe, ni hay aún consenso al respecto de si realmente es así.

Asimismo, existen diferencias de criterios con respecto a cuál equipo de laboratorio es mejor para determinar la resistencia residual. Cuál es el que da los resultados reales de los valores de resistencia residual existente en un plano de falla de un cierto tipo de suelo. No se sabe con certeza la respuesta a esta pregunta; ciertamente esto puede ser por la ambigüedad aún existente de la curvatura de las envolventes de falla de los suelos, especialmente las arcillas, y que (por esta razón) aún no hay una forma correcta de reportar la resistencia residual. De modo que un autor puede reportar un dato que es tan correcto como otro pero considera partes distintas de la envolvente de falla, y al pensar en la envolvente de falla como una recta reportan ángulos de fricción distintos.

2.1 Resistencia Residual

La definición de la resistencia residual⁵ de un suelo se representa en la Figura 2.

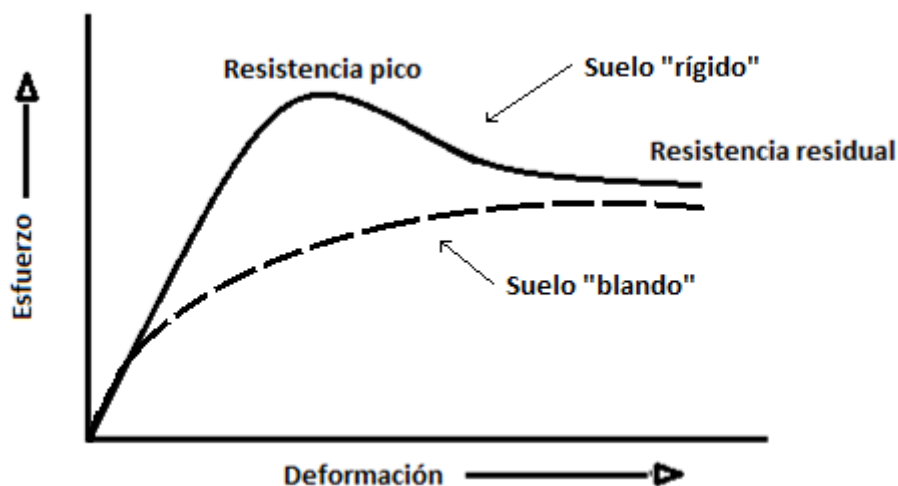


Figura 2. Resistencia pico y resistencia residual. Fuente: Vargas, s.f. Modificada

Siempre con un esfuerzo normal constante. Si un suelo "rígido", arena densa o arcilla preconsolidada (PC) se somete a una carga, este presenta esfuerzos que aumentan conforme aumenta la carga, cuando la carga es tal que la resistencia en cortante del suelo se ve superada por los esfuerzos sometidos, el suelo falla. Si el mismo suelo se somete a deformaciones de corte, este se resiste al movimiento con una fuerza que aumenta conforme aumenta la deformación, hasta un punto en el cual esta fuerza resistiva llega al máximo, disminuye y se estabiliza. La fuerza final que el suelo opone al movimiento, estable, corresponde a la resistencia residual, por lo general asociada a grandes deformaciones. El comportamiento del suelo "blando" o normalmente consolidado (NC) es tal que la diferencia entre la resistencia pico y la residual no es tan considerable, y no hay una loma que acentúa el pico de resistencia, antes de la falla, en la gráfica esfuerzo-deformación.

La resistencia residual o última llegará a ser la misma, independientemente de la historia de esfuerzos del suelo o la densidad; es decir que si el suelo es normalmente consolidado o preconsolidado, se encuentra denso o suelto, la resistencia residual será la misma.

⁵ En esta sección se parafrasea, sin citar textualmente, a Vargas (s.f) como fuente principal. Como fuente secundaria de respaldo se consultó Gonzales de Vallejo (2002) y Das (2012)

Una muestra densa o PC experimenta un aumento de volumen durante el corte, mientras que una muestra suelta o normalmente consolidada sufre una contracción. A este fenómeno se le conoce como dilatación.

2.2 Condición drenada y no drenada

Los suelos, como cualquier otro material, fallan en algún momento cuando son cargados o solicitados con incrementos de los esfuerzos normales, tales como los que producen las construcciones. Los suelos cargados en compresión fallan por corte, en superficies claramente definidas. (Vargas, 2013)

Cuando se aplican tales cargas al suelo y aumentan los esfuerzos totales que actúan sobre el suelo, lo postulado por Terzaghi dicta que, pueden aumentar los esfuerzos efectivos o la presión intersticial y así cumplirse siempre la ecuación fundamental de la mecánica de suelos:

$$\sigma + \Delta\sigma = (\sigma' + \Delta\sigma') + (u + \Delta u) \quad (1)$$

Las cargas que típicamente transmiten al suelo las obras de ingeniería, con excepción de los sismos y el impacto, inducen una condición drenada en gravas y arenas y una condición no drenada en limos y arcillas. (Vargas, s.f). Esto por la alta permeabilidad (capacidad de drenaje) de las gravas y arenas y la baja permeabilidad de las arcillas y limos. Al colocarse una carga en suelo saturado (condición de menor resistencia) en la condición drenada, el agua fluye en poco tiempo (al ponerse la carga) y el aumento de esfuerzo lo toman las partículas de suelo aumentando el esfuerzo efectivo ($\sigma' + \Delta\sigma$) y dejando la presión de poro estable ($u + \Delta u = u + 0 = u$) lo que se traduce, en las gravas y arenas, en un reacomodo de las partículas y asentamientos o deformaciones rápidas. En la condición no drenada, particular de los suelos cohesivos (finos con altas fuerzas intersticiales) sucede algo distinto, al no poder fluir el agua rápidamente, la carga la toma la presión de poro ($\sigma + \Delta\sigma = (\sigma' + 0) + (u + \Delta u)$), al fluir lentamente el agua dado el reacomodo de las partículas que se adaptan a los nuevos esfuerzos totales. Una vez finalizado el proceso de relevo de carga ($\sigma + \Delta\sigma = (\sigma' + \Delta\sigma) + (u_0)$) la carga la toman las partículas de suelo. A este proceso de deformación del suelo que consiste en el relevo de carga por parte del agua (que disipa sus esfuerzos fluyendo) hacia el suelo *per se*, se le denomina consolidación.

Según lo anterior, se puede comprender que, en un suelo fino, la resistencia medida es efectiva o depende de parámetros efectivos si la carga que generara la falla se aplica más lentamente que la velocidad con la que fluye el agua por el suelo; y parámetros totales si

la velocidad de carga es mayor a la velocidad del flujo. La velocidad a la que se aplica deformación a la muestra es importante a la hora de la determinación de la resistencia en el laboratorio, pues esta determina la condición del esfuerzo se obtiene con el ensayo. Siempre se miden los esfuerzos totales; lo que pasa, en el caso primero, es que los esfuerzos totales (medidos) son iguales a los efectivos.

La resistencia drenada en una superficie de falla que ha sido sometida al desplazamiento es llamada la resistencia residual, y es el valor más bajo de resistencia que puede ser medido para un suelo arcilloso. (Skempton, 1985).

A continuación se esquematiza el comportamiento de los resultados típicos de ensayos de corte en estado drenado. En la Figura 3, τ_f el esfuerzo máximo de corte resistido, Δx la deformación horizontal y ΔV la deformación vertical. El 1 es un comportamiento de un suelo blando o normalmente consolidado (NC) ($OCR=1$), el 2 es el de uno sobre o pre consolidado (PC) ($OCR>1$) y el 3 también ($OCR_3>OCR_2$). El comportamiento del suelo rígido (3 y 2) presenta un cambio positivo en altura, es decir que su volumen crece; en el comportamiento del suelo NC, (1) sucede lo contrario.

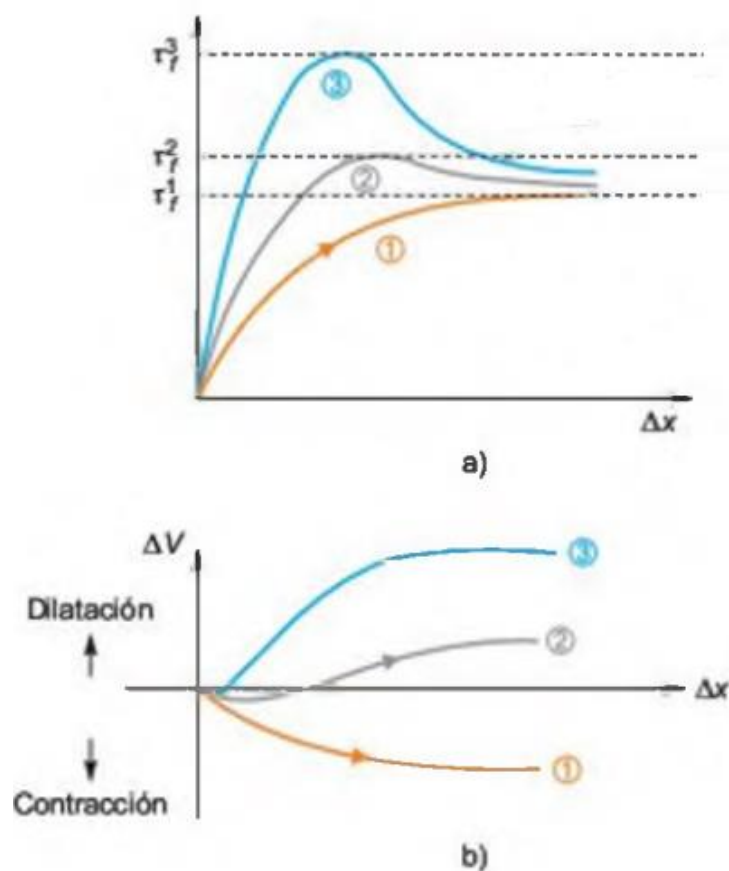


Figura 3. Curvas típicas de ensayos de corte drenado. Fuente: Gonzales de Vallejo et. al., (2002) Modificada.

Skempton (1964), indica que la expansión o dilatación en ensayos de corte drenados en arcillas sobre consolidadas (PC) inicia en el d_f (deformación que coincide con el momento de la falla). Esto no contradice lo ilustrado en la Figura 3, pero si lo aclara.

En los ensayo de corte cíclico se puede esperar este comportamiento en el primer movimiento, no así en el retroceso o ciclo sucesivos.

2.3 Comportamiento residual de los suelos

2.3.1 Envoltante de resistencia residual

Tanto el diseño de deformaciones como el análisis de taludes se apoyan en el *criterio de falla de Mohr-Coulomb*, en el cual la resistencia al corte de un suelo, en términos del esfuerzo total, se define en la ecuación (2), la Figura 4 muestra en representación gráfica el criterio de falla.

$$\tau = c + (\sigma - u_a) \tan \phi \quad (2)$$

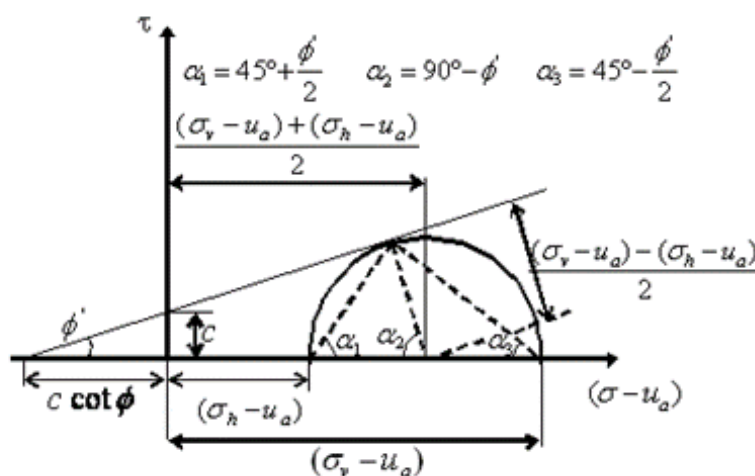


Figura 4. Criterio de falla de Mohr-Coulomb Fuente: Leal, Gallegos & Rojas (2012)

Los suelos granulares como gravas, las arenas y los limos no plásticos, son suelos con pocas fuerzas de atracción química, su resistencia es de carácter friccionante: $c=0$, según Das (2012) el ángulo de fricción suele variar entre 26° y 45° . La resistencia depende entonces de la forma y tamaño de las partículas, de su composición mineralógica y densidad. En suelos plásticos, finos como las arcillas y los limos plásticos, el ángulo de fricción depende de la densidad relativa, es decir qué tan juntas estén las partículas, Das (2012) propone que el ángulo toma un valor de 30° con una densidad relativa de 20% y de 45° con una densidad relativa de 80% y varía linealmente entre estos valores.

Las arcillas y los limos plásticos se pueden encontrar normalmente consolidados (NC) cuando la carga que reciben es la mayor que nunca han recibido o preconsolidados (PC) cuando la carga que reciben es menor a aquella que han recibido en algún momento. Das (2012) explica que los suelos NC no tienen cohesión. Se puede considerar que no la han desarrollado, los preconsolidados (o sobreconsolidados) sí la tienen.

En suelos arcillosos se ha visto que la envolvente de falla a resistencia pico es distinta a la resistencia última o residual; tal como se muestra en la Figura 5.

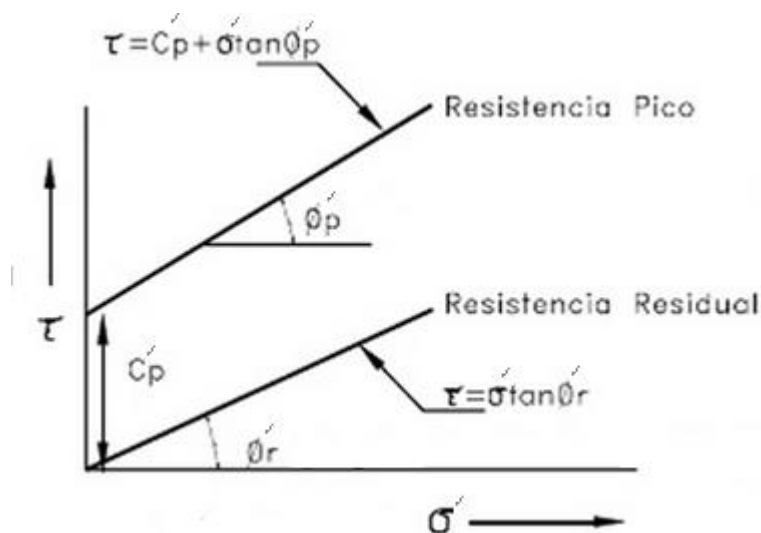


Figura 5. Envolventes de falla de resistencia pico y residual Fuente: Suárez, 2002 Modificada

Los resultados de ensayos disponibles en el momento (1964) muestran de forma casi invariable que c'_r es muy pequeño y probablemente no significativamente diferente de cero (Skempton, 1964), como lo indica la Figura 5.

De modo que se han reportado valores de ángulos de fricción asumiendo que:

$$s'_r = \sigma'_r \tan(\theta'_r) \quad (3)$$

Skempton (1985), indica que en la mayoría de las arcillas la relación entre la resistencia residual y la presión normal es no lineal, a diferencia de lo sugerido en 1964 e ilustrado en la Figura 5. Sin embargo, para propósitos de diseño es útil tomar el mejor ajuste lineal en el rango de cargas normales involucradas en el problema, como la envolvente de falla. Es decir, que se puede tomar un valor de cohesión (como una herramienta matemática y no como una cohesión real) y un ángulo de fricción válidos para el rango de esfuerzos en cuestión, como en la ecuación (4):

$$s'_r = c'_r + \sigma'_r \tan(\theta'_r) \quad (4)$$

Vithana *et al.* (2011) y Lupini *et al.* (1981), utilizan esta simplificación, indicando que es la mejor aproximación lineal para sus resultados.

Son varios los autores que defienden que el ángulo de resistencia residual depende del esfuerzo normal efectivo (Lupini *et al.* 1981; Skempton 1985, Schmertmann 2012, entre otros), a diferencia de los que piensan que, cómo el sentido común lleva a pensar, la envolvente residual de falla es una recta como la envolvente de resistencia pico.

Por esta razón, Skempton (1985) propone hablar de la resistencia residual del suelo a un esfuerzo normal efectivo (σ'), como el ángulo de fricción residual secante (ecuación (5)): la tangente inversa del coeficiente de fricción residual (τ_r/σ'). Meehan *et al.* (2007) y Stark & Eid (1994), siguiendo a Skempton, así lo hacen.

$$\phi'_r = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_r}{\sigma'} \right) \quad (5)$$

Hawkins & Privett (1985), sugieren como mejor método para determinar un valor de resistencia residual para diseño, la envolvente recta (como Skempton) o utilizar graficas (como la superior de la Figura 6) del coeficiente de fricción residual contra σ' para identificar el ϕ'_r para un esfuerzo particular.

Para Hawkins & Privett, (1985), la envolvente de falla completa de un suelo cohesivo es típicamente curva. Esta curvatura es más pronunciada debajo de los 200 kPa de esfuerzo normal efectivo. Esto genera una pendiente mayor, y por eso valores mayores de ϕ'_r en valores de σ' más bajos (Figura 6). La causa real de la curvatura de las envolventes de resistencia residual sigue siendo oscura.⁶

El ángulo de fricción es independiente del esfuerzo normal y la cohesión nula, cuando la carga normal es mayor a 2kgf/cm². Otros investigadores han indicado que para esfuerzos menores a 2kgf/cm² (196 kPa) la envolvente de resistencia residual es curva, el ángulo de fricción residual es dependiente del esfuerzo normal. (Townsend & Gilbert 1976)

Conforme el esfuerzo normal efectivo aumenta la envolvente de falla se vuelve recta; los valores del coeficiente de fricción residual disminuyen y se estabilizan. El coeficiente de fricción residual se vuelve constante (Figura 6). Este es el *Lowest Residual Strength* (resistencia residual más baja). (Hawkins & Privett, 1985)

⁶ Schmertmann (2012) provee una explicación. No se hace mención formal puesto que se considera fuera del alcance de esta investigación esclarecer este fenómeno.

Cuanto más alto es el esfuerzo normal aplicado es más lógico pensar que las partículas de zona de corte van a acomodarse y alinearse más, se puede desarrollar de forma más concentrada, más lisa y más plana la superficie de falla; por lo que el ϕ'_r será menor que en valores de σ' más bajos. Es lógico pensar que para distintos suelos el σ' requerido para que esto suceda es distinto, de modo que también depende del suelo o los minerales arcillosos qué tan pronunciada sea esa curvatura del inicio de la envolvente de falla. Es por esto que Skempton (1985), indica que existen grandes variaciones en la curvatura de la envolvente de falla entre distintas arcillas.

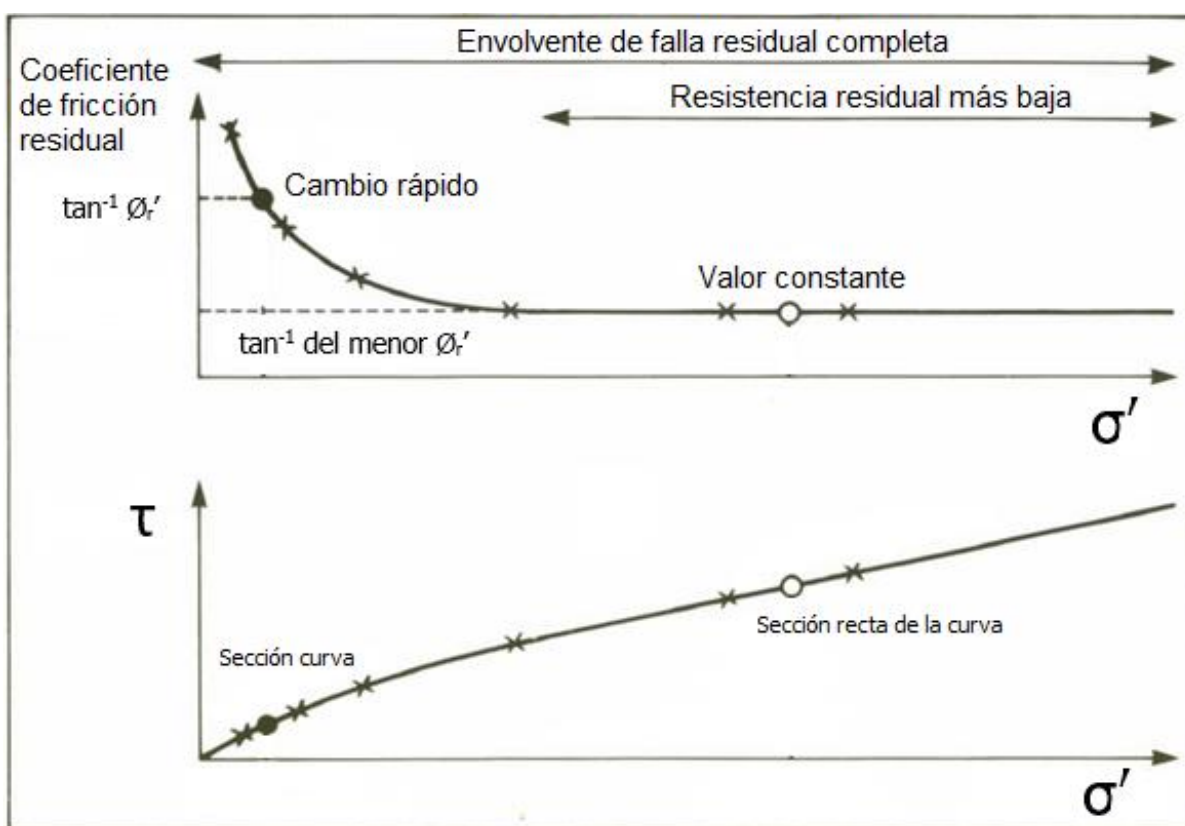


Figura 6. Envolvente de falla residual completa. Fuente: Hawkins & Privett (1985). Modificada

Dada la naturaleza curva de la envolvente de falla residual, correlaciones y determinaciones de la resistencia residual deben determinarse y relacionarse para los valores de esfuerzo específicos y no de forma general. (Hawkins & Privett, 1985)

2.3.2 Comportamiento post-pico de la curva esfuerzo deformación

Al someter una muestra de suelo a deformación, una vez definida una falla, si el suelo es PC se puede esperar una caída en el esfuerzo efectivo de corte resistido por la muestra. A medida que aumenta el nivel de deformaciones de corte, las partículas se reorientan progresivamente, terminando por disponerse en paralelo, disposición más débil que la original (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño & Oteo, 2002).

Skempton (1985), describe esta caída como una de dos partes: dilatancia y luego reorientación de las partículas en paralelo a la dirección del corte (Figura 7 a). Cuando la fracción de arcilla es mayor al 50%, la resistencia residual pasa a ser controlada casi por completo por la fricción deslizando entre las partículas minerales arcillosas. En este caso, sirva de referencia lo siguiente: el ϕ'_r es de 15° para la kaolinita, 10° para Illita y 5° para montmorillonita.

Además,⁷

- Si la fracción de arcilla (partículas pequeñas, capaces de reorientación) es menor que un 25% la segunda etapa no es notable (Figura 7 b), el comportamiento del suelo es más como de un limo o arena y el ángulo de resistencia residual es típicamente superior a 20° y la reorientación de las partículas se vuelve poco notable.
- Cuando la fracción de arcilla se encuentra entre 25% y 50% existe un tipo de comportamiento transitorio.
- Cuando el suelo es NC⁸, la caída se da únicamente por la reorientación de las partículas (Figura 7 a y b).

⁷ Todavía parafraseando a Skempton (1985)

⁸ Una diferencia de comportamiento (NC o Sobreconsolidada) no se puede apreciar si se trabaja con muestra remoldeada. El comportamiento sería esencialmente NC.

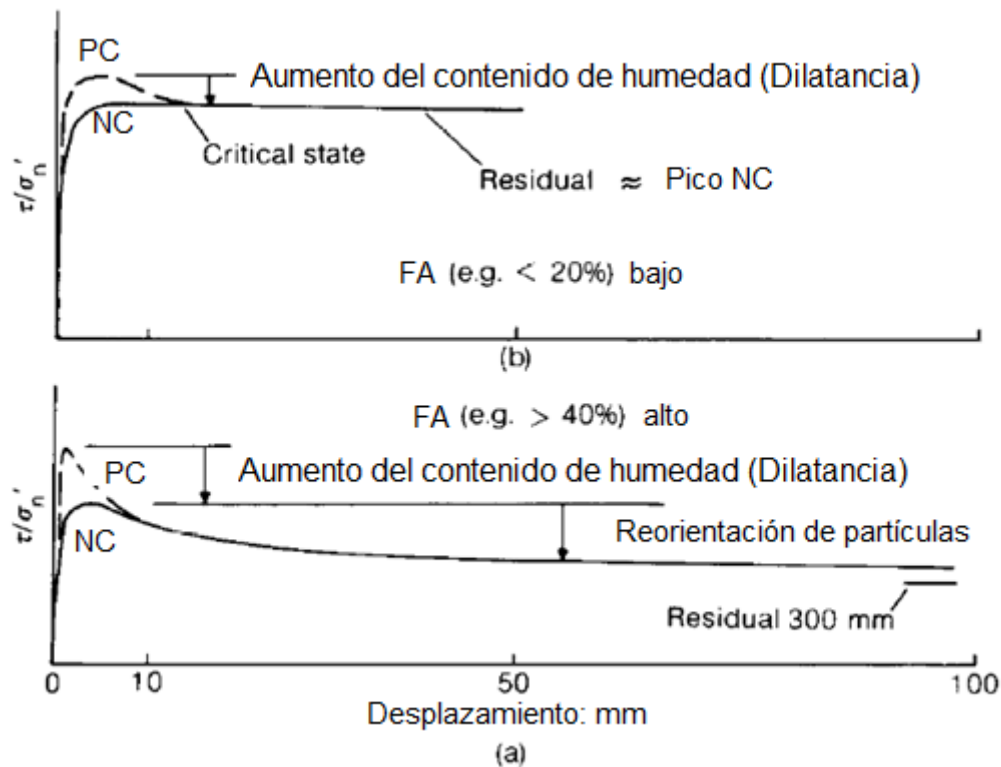


Figura 7. Comportamiento típico de un ensayo de resistencia residual en un suelo con (a) una alta fracción arcilla y (b) una baja fracción de arcilla. Fuente: Skempton (1985). Modificada

Lupini *et al.* (1981) reportan tres tipos de comportamiento residual asociados a la fricción entre partículas de suelo. Uno turbulento, cuando las partículas que controlan la falla son redondas o planas pero existe alta fricción entre partículas, uno deslizante cuando las partículas son planas y tienen poca fricción entre ellas y uno de transición, cuando no hay un tipo de partícula dominante. De modo que el comportamiento residual y finalmente el ángulo de fricción residual son dependencia de la mineralogía del material.

2.3.3 Relación entre la resistencia residual, la fracción de arcilla, la plasticidad y la mineralogía

La plasticidad de los suelos se puede medir mediante los límites de Atterberg: Límite de Contracción (LC), Límite Plástico (LP) y Límite Líquido (LL). Siguiendo la teoría de la mecánica de suelos y en específico lo planteado por Casagrande, para valores de IP menores a 7, el suelo ensayado es de baja plasticidad, cuando el IP está entre 7 y 17, el suelo medianamente plástico; y para valores de IP mayores a 17 la plasticidad es alta.

Los límites de consistencia son medidas que describen la parte fina del suelo. Miden la capacidad del suelo de retener agua sin dejar de ser un cuerpo sólido y la cantidad de agua mínima necesaria para que los finos tengan la capacidad de sostener la estructura del suelo como un sólido. Esto está asociado con la afinidad electroquímica de las partículas de suelo

con el agua, que crece con la superficie específica de las partículas que constituyen el suelo. Al ser la superficie mayor en partículas más pequeñas, estas se vuelven más importantes e influyentes. La fracción de arcilla es la parte del suelo con tamaños de partícula más pequeños, es el porcentaje del suelo con partículas menores a 2µm.

La Actividad (A) es otro parámetro útil para evaluar la plasticidad de una arcilla. Fue definida por Skempton (1953) como:

$$A = \frac{IP}{FA}$$

La relación entre actividad y el tipo de material arcilloso aun no es precisa, debido a la influencia de los iones en los fluidos intersticiales y la materia orgánica. Pero es un indicador de la capacidad de reaccionar químicamente y se correlaciona con la capacidad de intercambio de cationes. (Vargas, 2013).

El Cuadro 2 asocia el valor numérico A con una descripción cualitativa y el Cuadro 3 provee una referencia de la actividad de diferentes minerales arcillosos conocidos.

Cuadro 2. Actividad de las arcillas (Skempton, 1953)

Descripción	Actividad
Inactiva	<0,75
Normal	0,75 -1,25
Activa	1,25 -2
Muy activa	>2
Extremadamente activa	6 o más

Cuadro 3. Actividad de algunos minerales arcillosos (Skempton, 1953; Mitchell, 1993; tomado de Vargas, 2013)

Mineral	Actividad
Montmorillonita – Na	4 -7
Montmorillonita – Ca	1,5
Illita	0,5 – 1,3
Clorita	0,3 – 0,5
Caolinita	0,3 - 0,5

SUCS⁹ basa su clasificación de suelos finos en la carta de plasticidad de Casagrande. Holtz & Kovacs (1981), ubican varios minerales de arcilla en la carta de plasticidad para indicar como se relaciona la mineralogía de la arcilla con sus límites de consistencia (ver Figura 8).

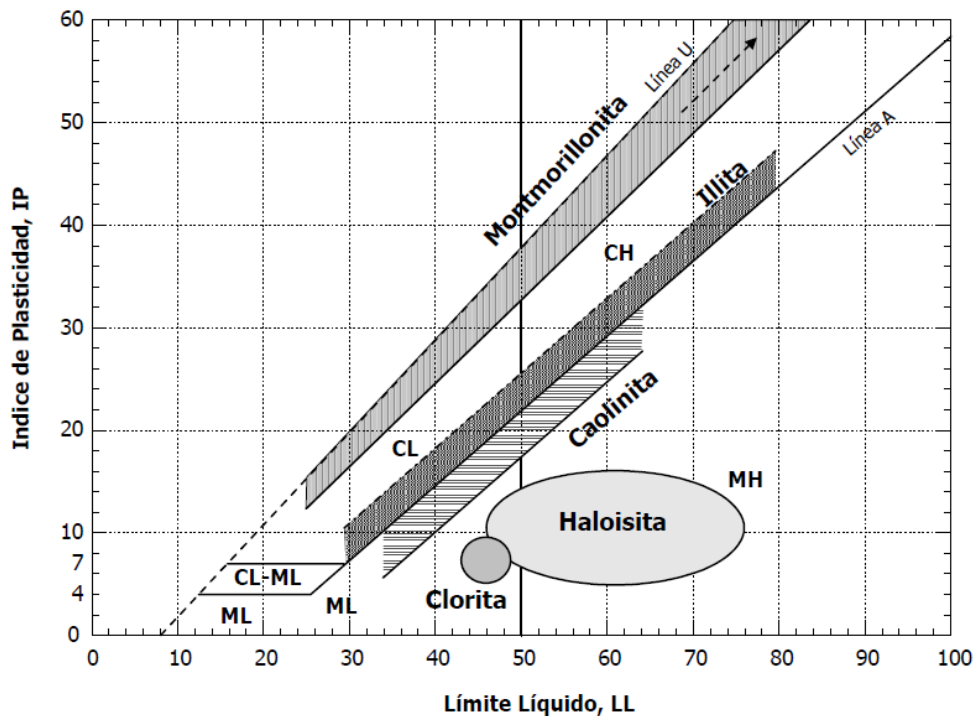


Figura 8. Ubicación de minerales arcillosos en la carta de plasticidad de Casagrande Fuente: Holtz y Kovacs, 1981; Traducida por Vargas, 2013)

Las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arcillosos están relacionadas con su mineralogía. Para suelos CL, ML, CH, MH se pueden esperar altos contenidos de Montmorillonita, Caolinita, Illita y Haloisita. La composición mineralógica de las arcillas permite comprender la compresibilidad, resistencia, drenaje y reacción a cambios de humedad por parte del suelo. Esto se puede explicar por la capacidad de cada tipo de mineral de retener agua, absorberla o adsorberla, por su tamaño y forma.

En las secciones anteriores se aclaró como la mineralogía define la resistencia residual de los suelos y ahora se ha comentado al respecto de la relación entre la fracción de arcilla y los límites de consistencia con la mineralogía, lo que da pie a que la fracción de arcilla describa la predominancia de la presencia de estas partículas y los límites su mineralogía, siendo estos dos valores referentes cuantitativos de la mineralogía, o en fin del tamaño y la forma de las partículas que componen el suelo.

⁹ Sistema unificado de clasificación de suelos o Soil Unified Classification System

Lupini *et al.* (1981) sugieren que la resistencia residual depende del tamaño, forma y textura de las partículas presentes en la superficie de falla. Tiwari & Marui (2005) respaldan esta posición. Es entonces prudente interpretar la plasticidad, la fracción de arcilla y la mineralogía del suelo como descriptores del tamaño, forma y textura de las partículas del suelo.

2.3.3.1 *Análisis mineralógico*

Siendo tan influyente la mineralogía del suelo en su resistencia residual, se justifica ahondar en la composición mineralógica del suelo. Es posible determinar los minerales presentes en el suelo mediante ensayos de laboratorio, entre otros, como los siguientes:

- XRD: *x-ray diffraction*, o difracción con rayos x. Consta de disparar rayos x a una muestra de suelo y medir los ángulos (θ) de difracción de los rayos. Cada material puro genera un patrón de difracción; por comparación se puede determinar los minerales presentes en un suelo.
- Microscopía electrónica de barrido: similar al XRD, pero se disparan electrones en vez de rayos x.
- Análisis de temperatura
 - TGA/DTG: análisis del cambio de la masa de la muestra al ser sometida a un aumento controlado de la temperatura.
 - DTA: análisis del cambio energético o cambio de temperatura de la muestra al ser sometida a un aumento controlado de la temperatura. Este permite diferenciar cambios o reacciones endotérmicas y exotérmicas.

La interpretación correcta de estos ensayos depende de la capacidad del analista de cotejar su curva o patrón con la de otros materiales. Por esto es importante la experiencia: tener un ojo entrenado que sea capaz de reconocer comportamientos de distintos materiales en las curvas obtenidas.

En general los minerales arcillosos presentan en resultados de DTA o TGA, una reacción endotérmica entre 100°C y 200°C mientras el agua absorbida se pierde, la deshidroxilación (la pérdida de iones OH que completan la estructura cristalina se desprenden) sucede entre 500°C y 1000°C, causando la completa destrucción de la estructura mineral. La temperatura a la que sucede con más incidencia este proceso es la propiedad más indicativa para identificar un mineral. Luego entre 800°C y 1000°C se da una reacción de recristalización exotérmica. Cada material o mineral puro tiene una curva de TGA (y DTG), el

comportamiento de esta curva no necesariamente será igual para una matriz de suelo que contenga este mineral, ya que el suelo es heterogéneo por naturaleza. (Mitchell, 1993)

Además, dependiendo del suelo su composición y proporciones puede haber más de un material manifestándose en los cambios de masa registrados o en el patrón de difracción obtenido. Esto hace difícil la interpretación a partir de resultados de los ensayos de los minerales presentes en el suelo. Para el TGA/DTG, cuando hay varios materiales es poco práctico buscar un comportamiento que se asemeje al suelo, parece más factible analizar cada pérdida y el rango de temperaturas en el que se da y asociarlo a un proceso característico de un material o mineral probablemente presente en el suelo.

Se tiene referencia de que estos ensayos son cualitativos y nunca cuantitativos. El único considerado semicuantitativo es el de difracción con Rayos X. Existen distintos esfuerzos y formas de realizar estimaciones que hacen cada vez más posible cuantificar los resultados obtenidos en estos ensayos. En términos prácticos, según Mitchell (1993) los resultados de estos ensayos son suficientes para interpretarlos de forma cuantitativa; pero aún esto no es generalmente aceptado.

En este proyecto se echó mano a ensayos de XRD y TGA/DTG para ahondar en la composición mineralógica del suelo.

2.3.4 Correlaciones para determinar la resistencia residual

Lo anterior da pie a que se correlacionen estas variables del suelo con su resistencia residual como lo hace Skempton (siguiendo a Lupini *et al.*) con la Figura 9.

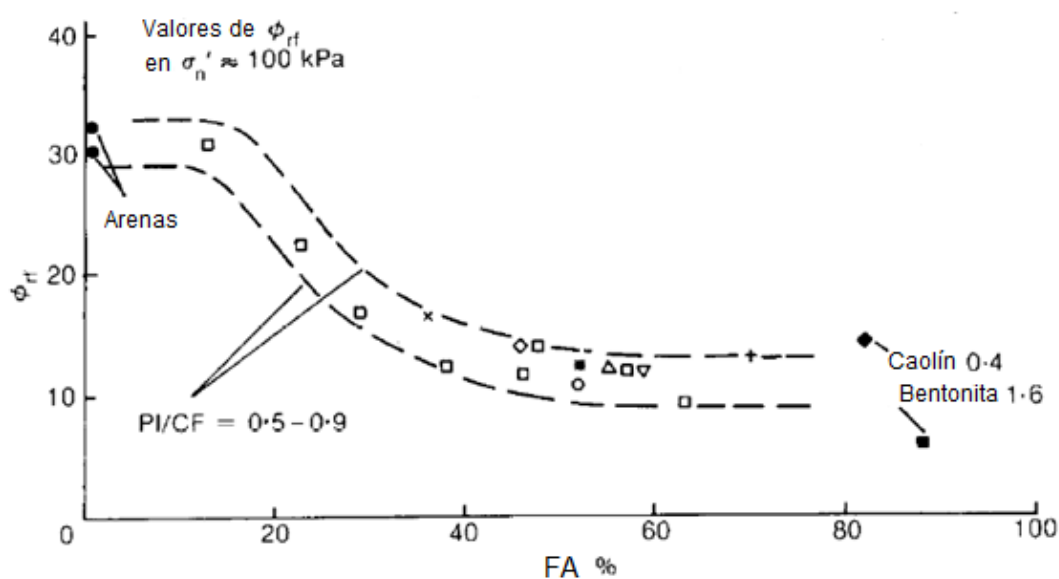


Figura 9. Valores de campo y ensayos de anillo de resistencia residual en arenas, kaolín y bentonita Fuente: Skempton, 1985. Modificada

La Figura 10 ilustra lo reportado por Stark & Eid (1994) con respecto a la relación entre el ángulo secante de fricción residual drenada, la fracción de arcilla y el límite líquido:

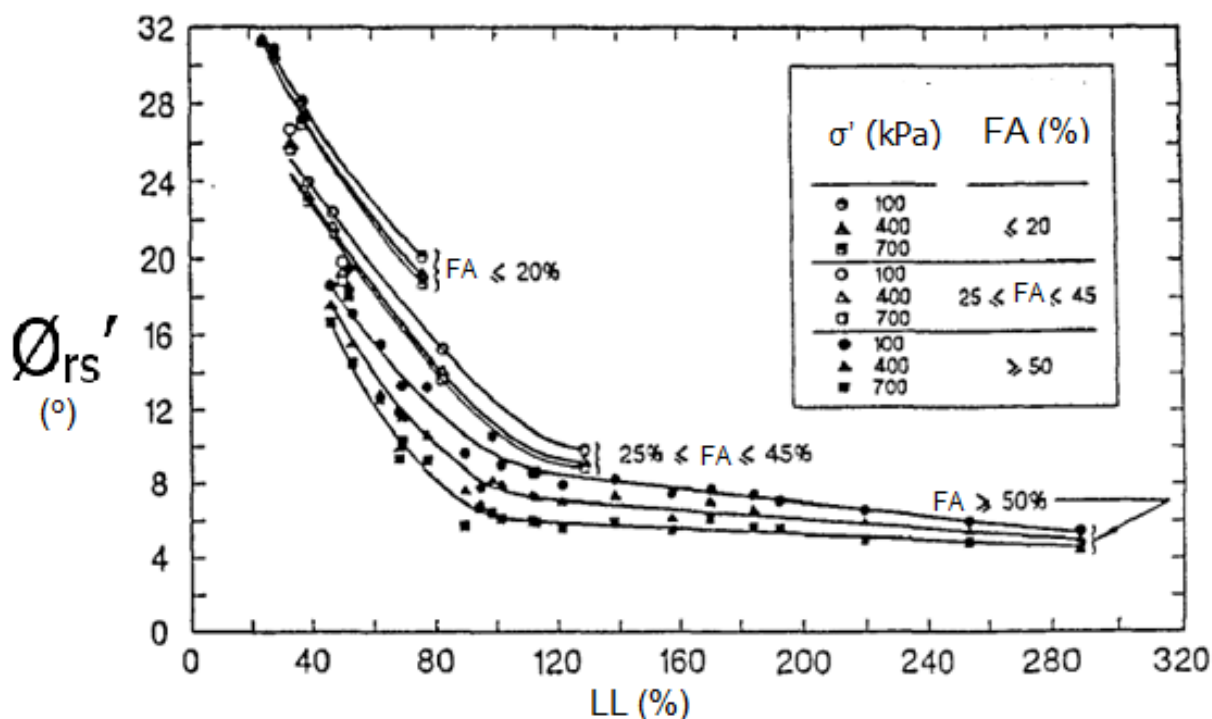


Figura 10. Correlación propuesta por Stark & Eid (1994). Modificada

Stark & Eid (1994) explican que la influencia mineralógica es descrita por el límite líquido, ya que el límite líquido es un indicador de la actividad del suelo

Como estos hay otros autores que han correlacionado estas variables, como lo muestra el Cuadro 4.

Cuadro 4. Correlaciones publicadas para la resistencia residual Fuente: Tiwari & Marui 2005

ϕ_r con fracción de arcilla		ϕ_r con límite líquido		ϕ_r con índice de plasticidad	
Skempton	1964	Haefeli	1951	Voight	1973
Borowicka	1965	Bishop <i>et al.</i>	1971	Kanji & Wolle	1977
Binnie <i>et al.</i>	1967	Mesri & Cepeda-Diaz	1986	Seycek	1978
Kenney	1977	Stark & Eid	1994	Vaughan <i>et al.</i>	1979
Lupini <i>et al.</i>	1981	Collotta <i>et al.</i>	1989	Lambe	1985
Skempton	1985			Wisley	2003
Collotta <i>et al.</i>	1989				

Tiwari & Marui (2005), hacen una revisión de las correlaciones propuestas antes que ellos e indican que:

- El gráfico de Stark & Eid (1994) es popularmente usado en la práctica, pero al correlacionar los datos de otros autores (Skempton 1964, Bishop *et al.* 1971, Lupini *et al.* 1981, entre otros) los valores de ϕ_r eran sobrestimados por el gráfico hasta en un 400%. Esto pudo haber sido causado por la diferencia en la mineralogía de las arcillas o por la diferencia en la interpretación de la resistencia residual (ϕ_r secante o lineal)
- La fracción de arcilla puede ser subestimada ya que es probable que los finos no se despeguen de los limos y la arena durante el proceso de dispersión (Mesri & Cepeda-Diaz 1986, Bishop *et al.* 1971)
- Varios autores han encontrado que no existe una regla de comportamiento para la curvatura de la envolvente de falla residual (Bishop *et al.* 1971, Kenney 1977, Skempton & Petley 1967).
- Sería mejor una correlación del ϕ_r (lineal) con la composición mineralógica del suelo.

Y proponen la correlación de la Figura 11:

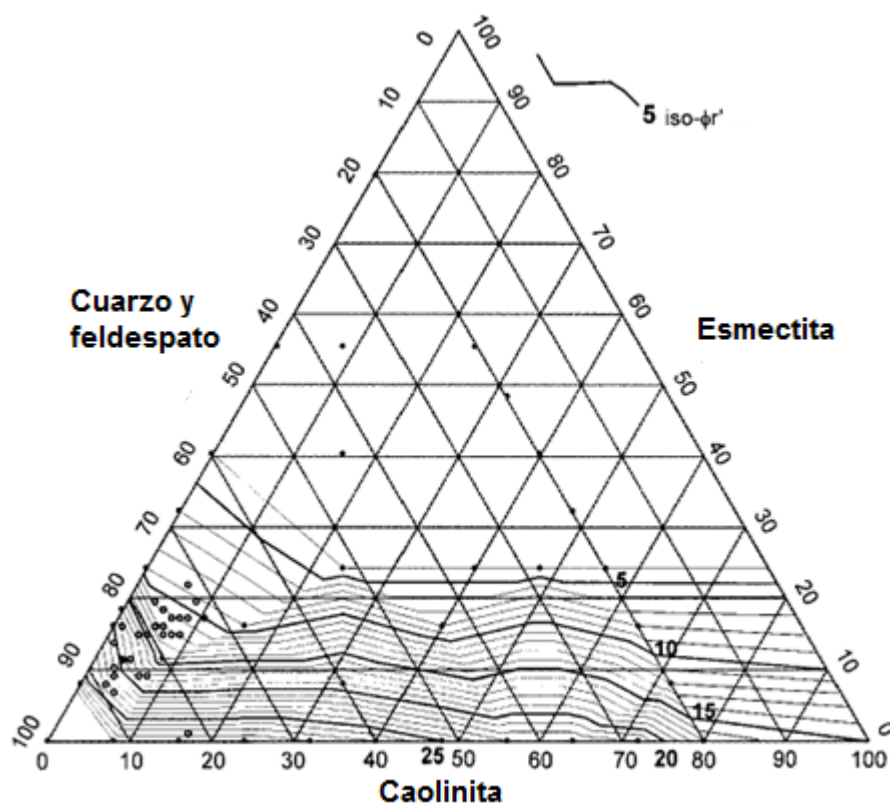


Figura 11. Correlación triangular propuesta con isocurvas de ϕ_r para la estimación del ϕ_r con base en la composición mineralógica. Fuente: Tiwari & Marui (2005)

Que se puede utilizar con coordenadas ortogonales de la siguiente forma:

$$Y = \%smectita \sin 60^\circ \quad (7)$$

$$X = \%kaolinita + \%smectita \cos 60^\circ \quad (8)$$

Este método resulta práctico ya que 50g del suelo son suficientes para medir la composición mineralógica del suelo.

2.4 Equipos utilizados en este trabajo

2.4.1 Equipo de corte torsional

Existen varios tipos de aparatos anulares de corte torsional que han sido utilizados, e.g. Hvorslev (1937 & 1939), La Gatta (1970), Bishop *et al.* (1971) y Bromhead (1979), se han utilizado cilindros, y círculos (área transversal de la muestra) y anillos, siendo la anular la más utilizada. Bishop *et al.* (1971) hacen un recuento de los distintos dispositivos que se había utilizado hasta el momento.

Las dos ventajas más importantes de utilizar un equipo torsional de muestra anular son que no hay cambio del área durante el ensayo y que se puede someter a la muestra a una deformación ilimitada, a diferencia de la muestra circular o cuadrada en el aparato de corte directo.

El aparato propuesto por el Instituto Geotécnico Noruego y el *Imperial College* en Bishop *et al.* (1971), está diseñado para una muestra anular que se somete a un esfuerzo normal constante en toda su área, es confinado lateralmente y falla en un plano de movimiento rotacional relativo (Figura 12). Los diseñadores demostraron que las fuerzas de fricción en el aparato son mínimas y que el diámetro interior (4in) es suficientemente grande en comparación con el exterior de 6in, *i.e.* la distribución del esfuerzo en el plano de movimiento rotacional relativo se puede considerar uniforme. Uno así utilizó Vargas en 1998. En 1996, Stark & Contreras proponen un diseño similar que no cambia de volumen a la hora del ensayo de modo que se puede determinar la resistencia residual no drenada que, según Stark & Contreras, sería la resistencia que se podría aplicar en evaluaciones que contemplen fuerza sísmica.

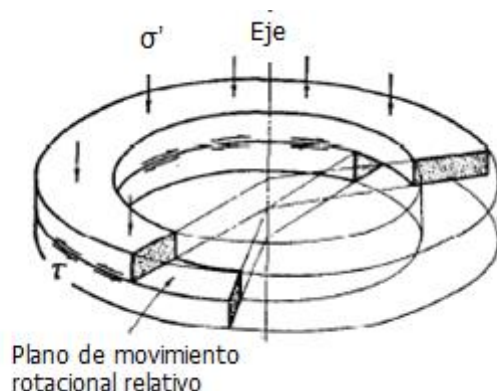


Figura 12. Muestra de ensayo de corte torsional en el aparato de Bishop et al. (1971). Modificada

El aparato de Bromhead (1979) se ha convertido en el más usado por una cuestión de costos, disponibilidad, y facilidad de operación. (Stark & Vettel, 1992) En el caso de este trabajo, se utiliza el aparato de Bromhead modificado porque es el disponible en el LanammeUCR.

El aparato de corte torsional de Bromhead (1979), (ver Figura 14) es anular con un diámetro interno de 7cm y uno externo de 10cm (área de 40cm²). Se provee drenaje por dos piedras porosas, una en la placa superior y otra en el fondo de la caja contenedora. La muestra, de 5mm de espesor, queda confinada radialmente. Al aplicarse esfuerzo normal y rotación a la placa superior, se genera una superficie de falla entre el suelo que se adhiere a la placa superior y el que se queda en la caja contenedora (Figura 13).

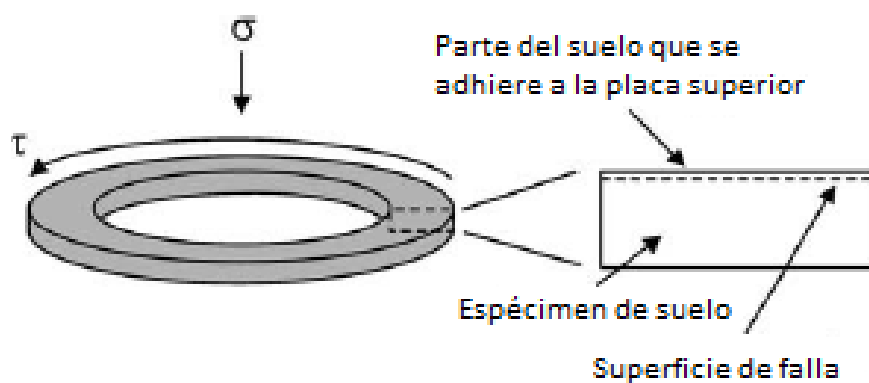


Figura 13. Muestra de ensayo de corte torsional en el aparato de Bromhead. Fuente: Meehan et al. 2007¹⁰

En este aparato la placa superior del sistema transmite la carga normal al espécimen, cuando este se consolida, la placa superior entra en la caja que alberga la muestra y parte de la muestra sale por el espacio que queda entre la caja y la placa (Figura 14). Si el tamaño

¹⁰ Traducida

de las partículas que salen es suficientemente grande, estas quedan atrapadas y se genera fricción que se mide como resistencia del suelo. Stark & Vettel (1992) proponen un procedimiento en el cual la muestra se consolida sin que la placa entre en la caja. Esta y otras medidas de reducción de la fricción de las paredes se han aplicado en diferentes ocasiones. Stark & Eid (1993) proponen modificar la caja de corte para poder extraer la muestra después de la consolidación, hacer un precorte y limpiar sus lados antes de proseguir con el ensayo. En la norma ASTM D 6467¹¹ se establece que se muele el suelo hasta pasar por la malla #200 y sugiere eliminar el suelo atrapado durante la prueba pero esto resulta difícil dada la configuración del equipo y se considera que el procedimiento puede afectar los resultados.

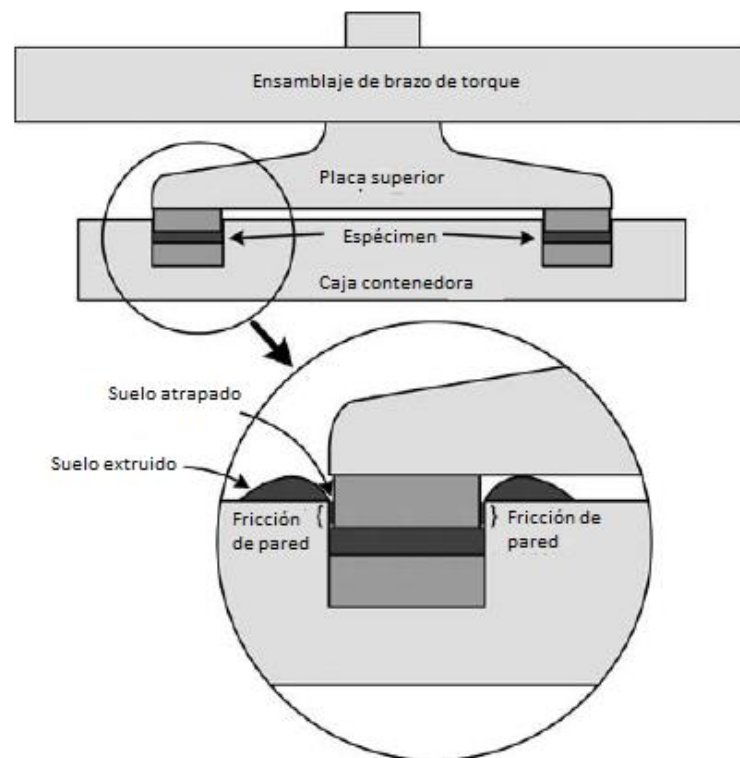


Figura 14. Fricción de pared en el aparato de Bromhead. Fuente: Meehan *et al.* 2007¹²

Meehan *et al.* (2007) proponen tres cambios al procedimiento ASTM D 6467 y uno al dispositivo de Bromhead (1979), con tal de reducir la fricción de pared:

¹¹ Designación de la normativa para ensayos para determinar la resistencia drenada residual de suelos cohesivos con un aparato de corte anular torsional, del *American Society for Testing and Materials* (ASTM)

¹² Traducida

- Preparar los especímenes en un contenido de agua menor al límite líquido. Esto reduce la magnitud de la consolidación. Se puede lograr esto preconsolidando la muestra por aparte, antes de fabricar los especímenes.
- No realizar el precorte a los especímenes. Se considera que se extruye menos material al realizar el corte lento durante el ensayo que haciendo un precorte rápido antes.
- Cada ensayo se realice en una sola etapa, ensayando un nuevo espécimen para cada esfuerzo normal. De esta forma se evita el efecto acumulado de la intrusión de la placa superior en la caja, la extrusión de material y el material atrapado.
- Cambiar el disco poroso superior (izquierda, Figura 15) utilizado por Bromhead (1979), por uno modificado (derecha, Figura 15)



Figura 15. Diferencia entre la placa original y la modificada para el aparato de Bromhead. Fuente: Meehan et al. 2007

Meehan *et al.* (2007) concluyen que los cambios metodológicos reducen considerablemente la fricción de pared; pero que (sin los cambios metodológicos) sólo el cambiar la placa superior por la modificada elimina la fricción de pared debido a la intrusión de la placa superior en la caja que alberga la muestra. Finalmente, recomiendan realizar los cambios metodológicos y el cambio de placa.

En este trabajo se realizaron ensayos de una sola etapa y se utilizó la placa modificada descrita arriba y abajo¹³, que es la disponible en el LanammeUCR. En algunos ensayos se redujo el contenido de humedad con tal de aumentar la densidad de las muestras y no de reducir la fricción de pared, no se preconsolidó fuera de la máquina por buscar ensayos más simples, y sí se realizó el precorte como establece ASTM D 6467, puesto que se considera más valioso reducir el tiempo del ensayo que reducir la extrusión de material; entendiéndose que se está utilizando la placa modificada.

¹³ Se considera que la placa de abajo puede ser la modificada o no, que no influye en el ensayo ni los resultados; no hubo en esta investigación motivación para averiguarlo.

2.4.2 Equipo de corte directo

La prueba de corte directo se realiza en condición consolidada-drenada. Se lleva a cabo deformando una muestra a una velocidad controlada en un plano de falla inducido (Figura 16). Los esfuerzos de corte y deformaciones se dan en un área variable: no se puede determinar el módulo de deformación. Según Townsend & Gilbert (1976), en 1976 el ensayo de corte directo repetido era el método más comúnmente utilizado para medir la resistencia residual.

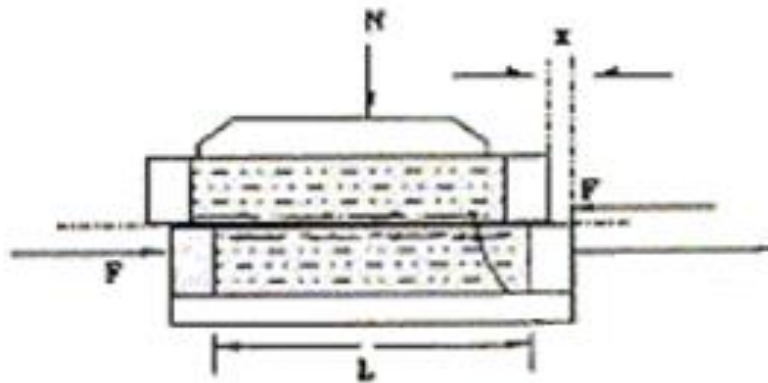


Figura 16. Principio del ensayo de corte directo. Fuente: K.H Head (1994) Modificada

El equipo de corte directo se puede utilizar para medir la resistencia residual de una muestra de suelo llevándola la caja de corte hasta cierta deformación, devolviéndola al origen y volviendo a fallar, repetidas veces hasta que se estabiliza el valor de corte registrado. Otro camino, es deformando la muestra en una dirección y luego en la opuesta, varios ciclos (Townsend & Gilbert, 1976). El primero en registrar estos procedimientos fue Skempton (1964). No se tiene referencia de investigaciones al respecto de la validez o el efecto de la repetición adelante-atrás en comparación con la deformación en una sola dirección. De cualquiera de las dos formas se requiere más trabajo que al utilizar la máquina de corte torsional. Los ensayos, en este trabajo, se realizaron deformando las muestras en una dirección y en reversa 1cm.

La limitación principal del uso de este equipo es que el suelo no se somete a deformación cortante continua en una sola dirección por lo que sólo una reorientación parcial de las partículas se puede lograr (esto es especialmente importante en arcillas). Además el área del espécimen está cambiando y una cantidad considerable de suelo se pierde durante el ensayo. (Stark & Eid, 1992)

Hay cajas de corte de diferentes tamaños. En este caso se utilizaron una cuadrada (6mm x 6mm; h=2cm) de 36,24cm² y una circular (r=31,64mm; h=2cm) de 31,45cm².

La norma designada por ASTM para este ensayo es la D3080; sin embargo, no se especifica nada del proceder para obtener resultados a grandes deformaciones repitiendo el corte.

2.4.3 Resultados obtenidos con los equipos (comparación entre ellos y valores de campo)

Diferencias significativas son observadas en algunas ocasiones entre resistencias medidas con en el aparato de corte directo (con capacidad de movimiento en reversa) y el dispositivo de corte anular torsional (Bishop *et al.* 1971):

- Stark & Eid (1994) indican que las varias limitaciones que presenta el equipo de corte directo hacen que los valores de resistencia residual utilizando este equipo sean mayores a los encontrados con un dispositivo de corte torsional anular.
- Bayin *et al.* (2012), fallaron distintas arcillas (CH y CL) en tres equipos distintos (triaxial, corte anular, corte directo) y concluyen que el ángulo de fricción medido es mayor en la triaxial, luego en el corte directo repetido y el más bajo es el del corte anular torsional.
- Vithana *et al.* (2011), reportan haber encontrado valores de cohesión y ángulo de fricción (residuales) en ensayos drenados siempre más grandes en el equipo de corte directo que en el de corte torsional.
- Skempton (1985), indica que materiales con fracción de arcilla altos, los valores obtenidos con la máquina de corte directo son mayores que con el anillo torsional.

Por otro lado,

- Townsend & Gilbert (1976) indican que, luego de analizar ensayos hechos en esquisto arcilla dura, las diferencias entre los resultados de los ensayos de corte directo repetido y corte anular son muy pequeñas; sin embargo otros han indicado diferencias más grandes en arcilla suave.
- Bromhead & Curtis (1983), reportan resultados similares de ambos tipos de ensayo.
- Hawkin & Privett (1985), concluyen a partir de su estudio que el corte directo y torsional producen envolventes de falla muy similares, pero que el corte torsional es mejor herramienta dado que es menos propensa a errores.
- Bromhead & Curtis (1983) demuestran que los resultados obtenidos con el aparato de Bromhead (1979), están en buena concordancia con aquellos obtenidos en el aparato de Bishop *et al.* (1971).

Algunos autores comentan al respecto de los ensayos anulares torsionales de resistencia residuales, que los valores de ϕ'_r subestimaban los valores de campo (Skempton, 1985) y que los de corte directo los sobrestimaban (Chandler *et al.*, 1973). Según Skempton (1985), no se puede esperar tener un error menor a $\pm 10\%$ al comparar resultados de laboratorio y de análisis de estabilidad o retro-cálculo. Sin embargo, Stark & Eid (1994) y Bromhead & Dixon (1986) comprobaron que los resultados medidos en el equipo torsional (Bromhead) están en buen acuerdo con resultados retro-calculados de análisis de estabilidad de laderas con desplazamientos.

2.5 Consideraciones metodológicas

2.5.1 Fabricación de los especímenes

El ángulo de fricción residual es, en términos prácticos, independiente del procedimiento de preparación del espécimen y de su densidad, ya sea la muestra intacta, con precorte o remoldeada. (Townsend & Gilbert, 1976)

En este trabajo las muestras ensayadas en el equipo de corte directo fueron intactas (densidad de falla=densidad de sitio), se dejaron reposar en cámara húmeda con tal de conseguir saturación. Como parte de la metodología experimental acostumbrada se dejaban saturar al menos 16h previo inicio de la consolidación. Las muestras ensayadas en la máquina de corte torsional fueron remoldeadas en altos contenidos de humedad y bajas densidades.

2.5.2 Velocidad de falla

La velocidad de falla para obtener un ensayo drenado depende del desplazamiento a la falla d_f y el tiempo a la falla t_f . Se considera que d_f lo define el suelo, el t_f el laboratorista, al ser el t_f controlable este es el que se debe estimar.

ASTM propone dos formas de calcular el tiempo a la falla para una falla drenada t_f :

1. A partir de una curva tiempo-deformación con el tiempo en escala logarítmica. Con el método gráfico de Casagrande se calcula el t_{50} y a partir de este se calcula el t_f , pero esta no siempre calza apropiadamente con el método de Casagrande, es decir: la curva debería tomar forma de "s" y no es así. El caso de arcillas sobreconsolidadas es este.
2. A partir de una curva raíz del tiempo-deformación. Con el método de Taylor se calcula el t_{90} y luego el t_f . Este procedimiento es no recomendado para

arcillas sobreconsolidadas ya que se obtienen velocidades de falla muy altas (mayores a la velocidad requerida para realizar un ensayo drenado).

Por otro lado, Gibson & Henkel (1954), proponen que para la caja de corte directo:

$$t_f = \frac{H^2}{2c_b(1 - U_c)} \quad (6)$$

Donde $2H$ es el espesor de la muestra, c_b se puede tomar como el coeficiente de consolidación y U_c es el grado de consolidación.

El primer método de ASTM resulta en algunos casos, inapropiado y el segundo no es recomendado para algunos tipos de suelos. En este caso ASTM recomienda basarse en el coeficiente de consolidación de la parte virgen de la curva de consolidación calculado a partir de un t_{50} (esto no es posible, ya que el primer método no se puede aplicar). Sin embargo, se puede calcular uno a partir de un t_{90} , con el método de Taylor y utilizar la propuesta de Gibson & Henkel (1954) para la caja de corte directo. En el caso de la máquina de corte torsional se podría utilizar la misma fórmula de la caja de corte directo, como lo hicieron Stark & Eid (1994). En todo caso, se considera que lo mejor es presentar los tres (o los dos, si alguno de los primeros métodos no se puede aplicar) y elegir el más conservador. Este párrafo describe como se procedió en este trabajo.

Gibson & Henkel proponen que después de un grado de consolidación del 95% (en su ecuación propuesta) no hay cambios en la resistencia residual o se ha alcanzado un tiempo de falla que garantiza un estado residual. Otra forma de verlo es que si se utiliza un grado de consolidación se está en una "zona segura" y hay cierto margen de error en la predicción del d_f .

Por otro lado, Skempton (1985) reporta que los valores de resistencia residual drenada de las arcillas varían menos de un 5% al usar velocidades de falla tan diferentes como 0,001mm/min y 0,35mm/min. Este comportamiento se mantiene hasta los 100mm/min cuando el comportamiento de la resistencia residual cambia. Esto implica que cambios pequeños en la resistencia pueden ocasionar grandes cambios en la velocidad del desplazamiento.

El desplazamiento a la falla es el desplazamiento en el cual se alcanza el pico de resistencia en una muestra que se falla a un esfuerzo menor que el de preconsolidación. En una muestra que se falla en su esfuerzo máximo experimentado o NC, el desplazamiento a la falla no se puede medir, si no es identificar cuando se genera la superficie de falla. Skempton (1985) dice que es 0,5-3mm en arcillas sobreconsolidadas y 3-10mm en arcillas normalmente consolidadas. ASTM recomienda usar 5mm en caso de que no se sepa y así se hizo en este trabajo.

3 Caracterización geotécnica de los suelos estudiados

En el presente capítulo se describen las características de los suelos considerados en esta investigación, se detalla de dónde provienen, se presentan algunas de sus propiedades físicas y mecánicas y se indica su clasificación y se describe su composición mineralógica. Esto para determinar, en un marco de la ingeniería civil, con qué suelo se está tratando y aportar algunos datos valiosos para el análisis de los resultados de resistencia residual obtenidos, y presentados más adelante. En este capítulo se han enumerado los suelos para referencia dentro de este documento.

Según los mapas de zonificación del Código de Cimentaciones de Costa Rica, los suelos 1 y 2 provienen de la zona V3, descrita como suelos residuales de origen volcánico. Al ser las muestras utilizadas predominantemente suelo fino, tomado a nivel superficial, se puede asegurar que son de la parte más alterada o desarrollada del perfil de suelo residual.

3.1 Suelo 1

3.1.1 Zona de muestreo

El suelo 1 se obtuvo a las márgenes de la autopista Florencio del Castillo (Ruta Nacional 2 o Carretera Interamericana), en Ochomogo. El sitio de muestreo se encuentra a 600m de la estación de pesaje en sentido San José-Cartago, como se puede ver en la Figura 17; en las coordenadas $9^{\circ}53'56.8''N$ $83^{\circ}56'45.9''W$.



Figura 17. Ubicación de la zona de muestreo del suelo 1
Fuente: Google Maps; Modificada

Se obtuvo la muestra a nivel superficial, de un talud expuesto. Se muestra el talud en la Figura 18. La altura del punto de muestreo a la cresta es de 2m.



Figura 18. Talud del que se obtuvo el suelo 1

3.1.2 Descripción de la muestra

El suelo 1, tiene una coloración café claro con un tono casi amarillo, el suelo presenta vetas de color blanco y algunos puntos de color morado y rojizo (ver Figura 19).



Figura 19. Muestra de suelo 1

El suelo 1 es fino y no se percibe en él partículas de carácter granular. En el sitio de muestreo el suelo se encuentra en terrones: no suelto sino adherido formando bloques, como es típico en suelos arcillosos. Por esta razón se degradó y secó al aire el suelo destinado a los ensayos de caracterización y las muestras alteradas, para las muestras inalteradas se extrajo un bloque que posteriormente se mantuvo en la cámara húmeda para iniciar el proceso de saturación.

En sitio, el material presenta alta resistencia aparente en estado seco y su afinidad al agua es evidente; el suelo 1 es arcilloso; su olor deja saber que el suelo no es orgánico.

3.1.3 Identificación del suelo

De acuerdo con las metodologías descritas en las normas ASTM¹⁴ D6026, D2216, D421, D4318, D422, D854, D2487 y D7263 se encontró lo siguiente con respecto al suelo 1:

3.1.3.1 Límites de consistencia¹⁵

En la Figura 20, se presentan, en azul, los resultados de la prueba de límites de Atterberg en la carta de plasticidad de Casagrande. Los resultados límite líquido (LL %), límite plástico (LP %), e Índice de Plasticidad (IP %) de las distintas repeticiones del ensayo se encuentran sobre la línea "A" y tienen un LL superior al 50%, por lo que están dentro de lo esperado para una arcilla inorgánica de alta plasticidad (CH).

¹⁴ Se fue un poco más flexible con los criterios de aceptación de precisión y margen de error descritos en la norma, que lo exigido por la norma como tal; ya que el laboratorista y autor de este documento no poseía experiencia previa relevante de trabajo en laboratorio. Por la misma razón, y para garantizar la validez de los resultados, se realizaron varias veces los mismos ensayos. En el caso de la gravedad específica, se contó con un resultado de un ensayo realizado por un laboratorista del LANAMME acreditado por el ECA (Ente Costarricense de Acreditación) bajo la norma INTE-ISO/IEC-17025:2005.

¹⁵ Se utilizó el método seco y método A de la norma ASTM

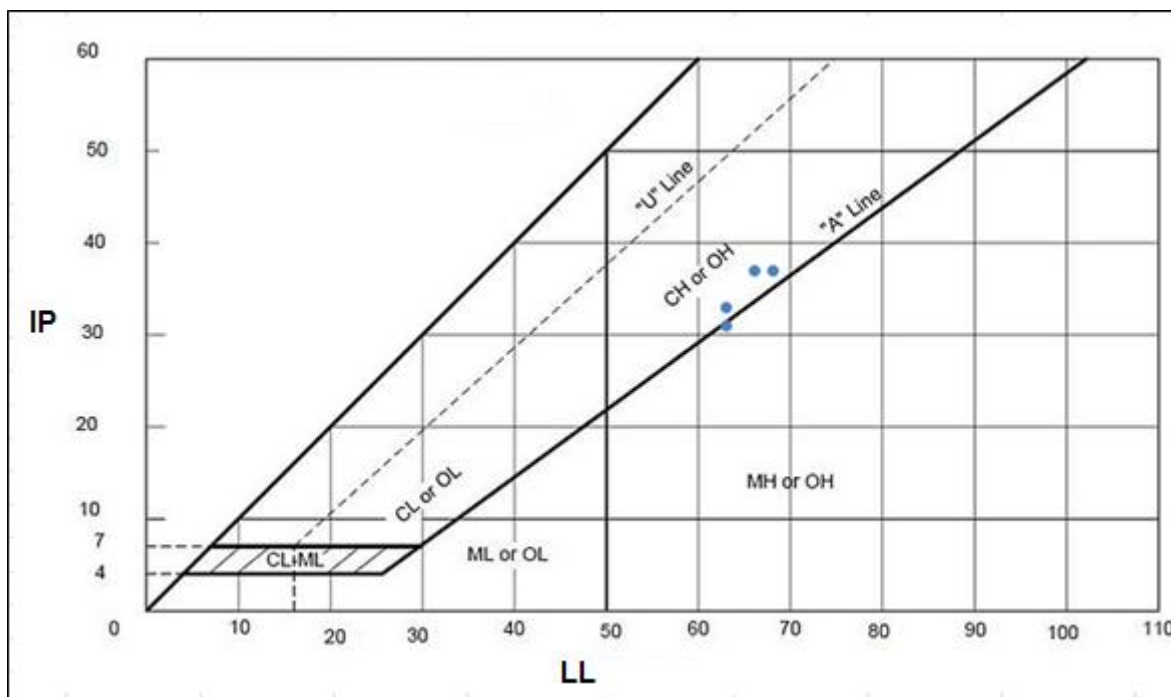


Figura 20. Carta de Plasticidad de Casagrande con resultados de la prueba de límites de Atterberg del Suelo 1
Fuente: Norma ASTM D2487; Modificada

3.1.3.2 Gravedad específica

Para obtener la gravedad específica del suelo 1 se siguió el método A, para especímenes húmedos, detallado en la norma ASTM D854. No se excluyó de la prueba parte del material. La gravedad específica del suelo 1, de referencia y para los cálculos respectivos, es de **2,705**; obtenido promediando los valores obtenidos en 5 repeticiones, eliminando el más alto y más bajo (desviación estándar: 0,05). En un ensayo de comparación realizado por el técnico del LanammeJCR Manrique Vargas se obtuvo un valor de 2,715.

3.1.3.3 Granulometría

El tamaño máximo de las partículas del suelo 1 es de 2mm; Por lo general todo el material pasa sin problemas la malla #10, sin lavar ni dispersar.

Las partículas más grandes que 0,075mm (retenidas en la malla #200): las arenas y gravas, son de forma angular y son duras y durables cuando no son friables, es decir: algunas partículas no se pueden degradar más, son duras y durables, pero otras son friables por la gran adherencia de partículas más pequeñas que las componen.

Se presenta en el gráfico de la Figura 21 el resultado de tres repeticiones del ensayo estipulado en ASTM D422.

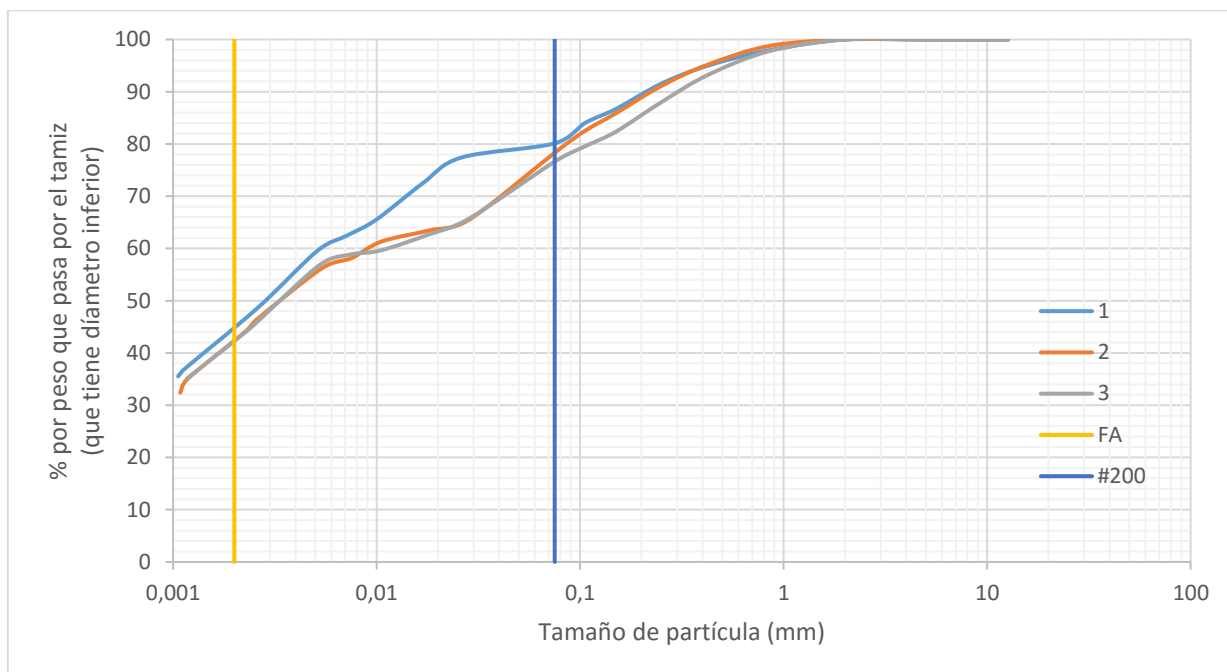


Figura 21. Composición granulométrica del suelo 1

Del gráfico anterior se puede leer lo establecido en el siguiente cuadro (Cuadro 5):

Cuadro 5. Granulometría del suelo 1

Tamaño de partícula	Porcentaje
Gravas, pasando la malla 3in y retenido en la malla #4	0
Arenas, pasando la malla #4 y retenido en la #200	20,4
Arenas gruesas, pasando la malla #4 y retenida en la #10	0
Arenas medianas, pasando la malla #10 y retenida en la #40	4,6
Arenas finas, pasando la malla #40 y retenida en la #200	15,8
Limos, 0,074 a 0,005mm	21,8
Arcillas, más pequeño que 0,005mm	57,8
Coloides, más pequeño que 0,001mm	32,4
FA (más pequeño que 0,002mm) ¹⁶	42,7

¹⁶ Existe diferencia entre los tamaños de partícula que definen un tipo de suelo, *i.e* arena, limo o arcilla, se muestran en el cuadro los criterios de ASTM, pero se reporta la FA según el criterio británico, que es el comúnmente utilizado en la literatura de resistencia residual.

Esto confirma el carácter arcilloso del material del suelo 1 y evidencia la presencia de limos y arenas finas en su composición, cómo es usual en un suelo residual.

3.1.3.4 Densidad in situ

Se obtuvo el peso unitario húmedo del suelo 1, según lo establecido en la norma ASTM D7263. Los resultados de varias repeticiones fueron los mostrados en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Pesos unitarios medidos del suelo 1

Repetición	w (%)	γ_m (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e
1	16,47	20,32	17,45	0,45
2	17,71	18,59	15,79	0,48
3	19,99	17,48	14,57	0,54
4	19,03	18,32	15,39	0,51
5	19,59	17,46	14,6	0,53
6	22,09	16,57	13,57	0,60
Promedio	19,15	18,12	15,23	0,52
σ	1,94	1,29	1,33	

3.1.3.5 Humedad natural

El suelo se muestreó el día 02/09/2015 y desde entonces, hasta finalizar esta investigación se dio seguimiento (al menos mensualmente) a la humedad in-situ del talud muestreado. El gráfico de la Figura 22, indica el porcentaje de humedad del suelo 1 para cada fecha.

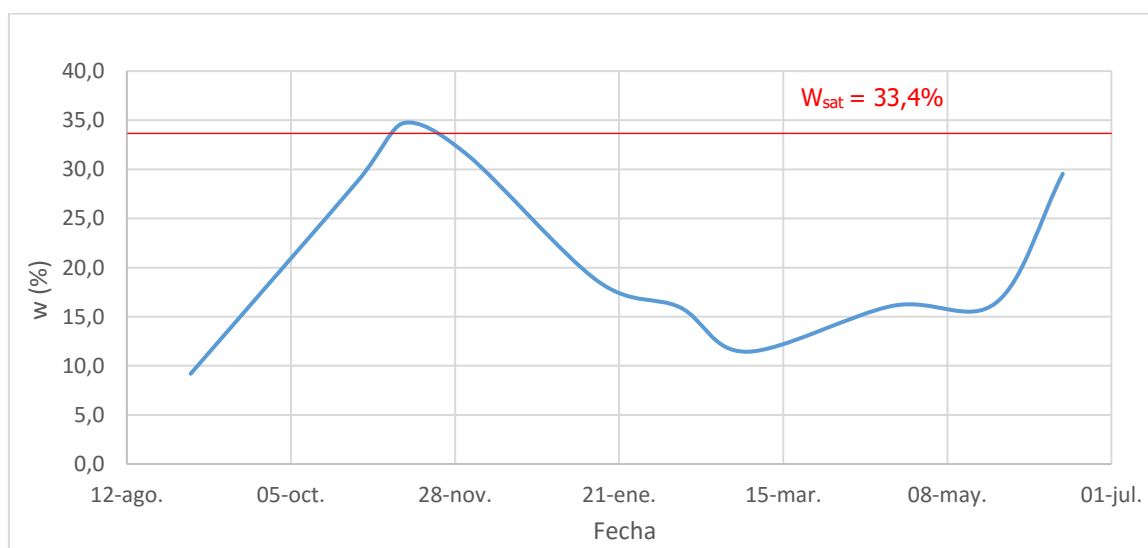


Figura 22. Gráfico de humedad contra tiempo del talud muestreado para el suelo 1

La humedad se calculó siempre siguiendo la metodología descrita en ASTM D2216. Se puede ver como la humedad aumentó hasta los días finales de noviembre 2015 cuando se

alcanzaron valores cercanos a la saturación, luego el contenido de humedad bajó hasta un mínimo cercano al 10% a inicios de marzo 2016 y luego se mantuvo hasta un repentino aumento en julio 2016. El invierno entró particularmente fuerte y de golpe a inicios de junio, este año.

3.1.3.6 Mineralogía

Según Holtz y Kovacs (1981), siguiendo lo establecido en la Figura 8, se puede esperar que el suelo 1 tenga minerales arcillosos de Illita, o Caolinita que se encuentra cerca en el gráfico propuesto.

La actividad del suelo 1 es de 0,82; según el Cuadro 2 esto asocia al suelo a una actividad normal y según el Cuadro 3 se podría pensar que el valor de actividad de este suelo es otro indicio de que el mineral arcilloso predominante es la Illita o algún otro mineral de baja actividad.

Las vetas de color blanco evidenciadas en la Figura 19 y los colores rojos o morados posiblemente ocasionados por la presencia de óxidos de hierro, dan un indicio de que el mineral arcilloso predominante en el suelo es la Caolinita.

Se pueden realizar distintos ensayos para determinar con más certeza y detalle cuáles son los minerales arcillosos presentes en el suelo. En este caso se realizaron los siguientes:

3.1.3.6.1 Ensayo Termogravimétrico (TGA)

Se presentan en la Figura 23 y Figura 24 los resultados de los ensayos de TGA. Los ensayos se realizaron en uno de los laboratorios del Pitra LanammeUCR con la ayuda del Quím. Jorge Salazar.

En ambas figuras se presenta la curva de masa como función de la temperatura (TGA), en verde, y la derivada de esta con respecto a la temperatura (DTG) en azul. Una es para cuando la muestra fue preparada pasando por la malla #200 y seca al aire y la otra para cuando la muestra fue preparada pasando por la malla #200 y seca al horno. La forma de las curvas es igual, salvo por el primer pico que se debe a la evaporación de agua libre o superficial. La diferencia en magnitud de los valores porcentuales de la pérdida depende del agua libre que tenía la muestra al inicio del ensayo.

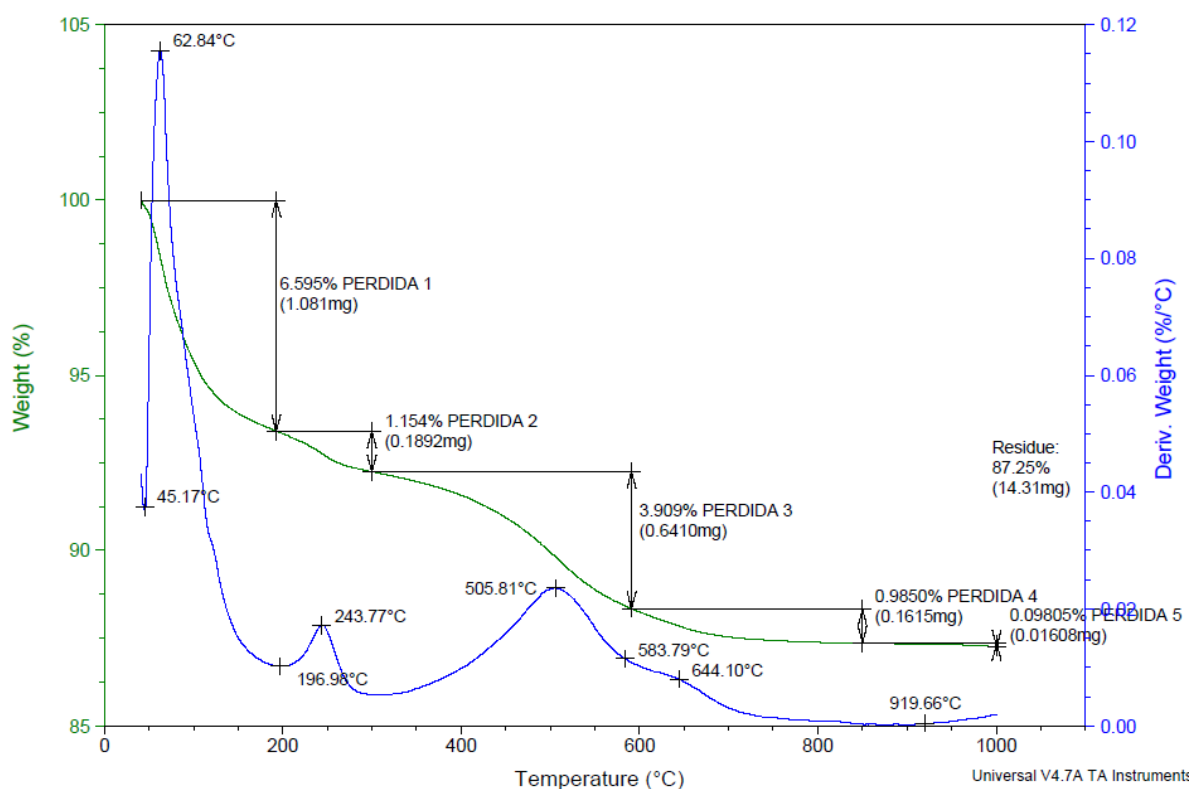


Figura 23. Curvas del ensayo TGA para el suelo 1 [Muestra seca al aire, pasando por la malla #200]

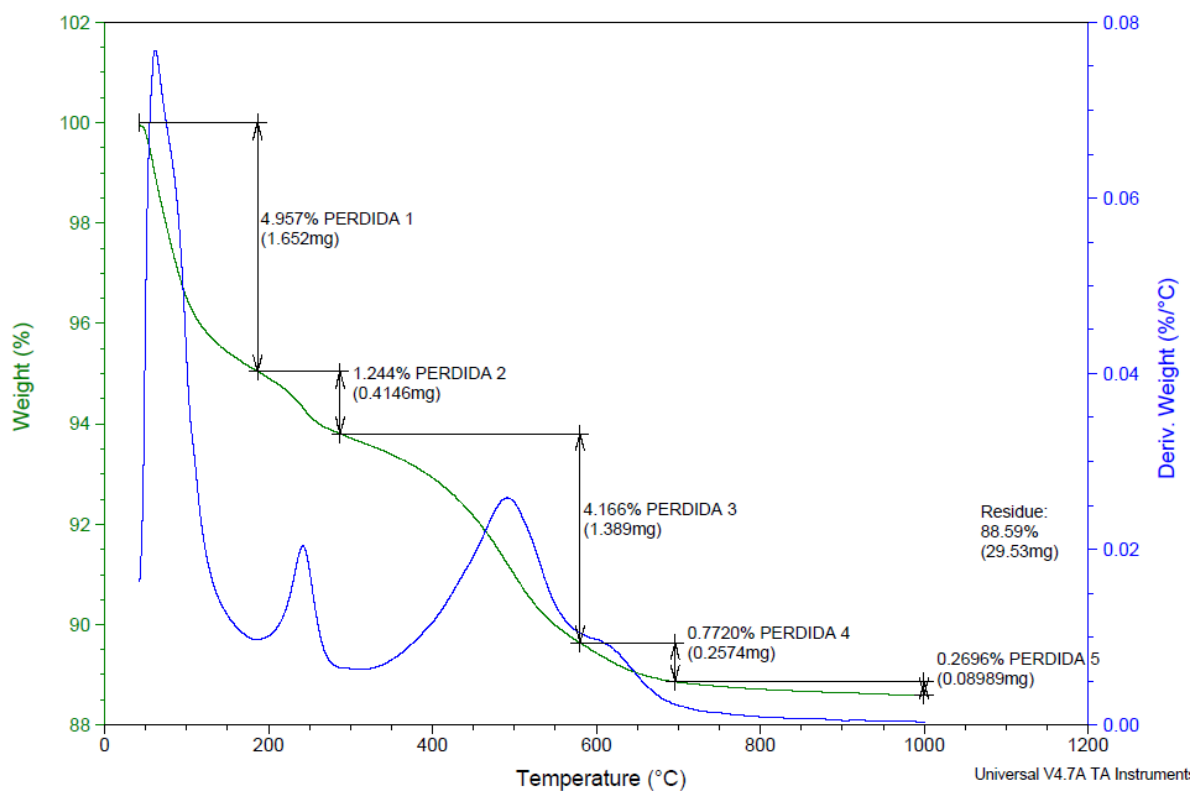


Figura 24. Curvas del ensayo TGA para el suelo 1 [Muestra seca al horno, pasando por la malla #200]

Se puede ver en ambas curvas, que existen 5 pérdidas y un residuo. A continuación se detalla una interpretación para estos resultados:¹⁷

Cuadro 7. Interpretación de curvas TGA y DTG para el suelo 1

Rango de temperatura (°C)	Pérdida (%)		Fenómeno y/o material que genera el comportamiento	Observaciones
	Seca al horno	Seca al aire		
50-100	5,0	6,6	Deshidratación (agua superficial). Pérdida de agua interlamilar de Montmorillonita o Halloysita expandida.	Diferencia más grande entre muestras (1,6%)
200-300	1,2	1,2	Oxidación de materia orgánica. La Montmorillonita, la Illita y la Perclorita sufren reacciones endotérmicas.	
350-550	4,2	3,9	Deshidroxilación de arcillas	Rango y pico de temperatura especialmente coincidente con Caolinita (de caolinita a metacaolinita)
550-650	0,8	1	Cambios de fase del Cuarzo	Traslapado bajo el anterior pico de cambio de masa
750-1000	0,3	0,1	Recristalización exotérmica o cambios endotérmicos de Carbonatos o metales pesados	Recristalización es típica en arcillas, especialmente en Caolinita (de metacaolinita a <i>mullite</i>)

Se puede, al analizar los cambios de masa y la temperatura a la que suceden, ver que el comportamiento es el típico de un suelo arcilloso. Se detallan los minerales arcillosos que pueden estar manifestándose en el Cuadro 7, esto asociando la temperatura específica (pico y rango) de los fenómenos con comportamientos de curvas de los minerales puros.¹⁸

¹⁷ Como toda interpretación esta es subjetiva, esta en particular debería ser revisada en caso de querer utilizarla de referencia ya que el autor no tiene experiencia previa.

¹⁸ Las referencias principales fueron Mitchell (1993), Tonle & Detellier (2008) y Gillott (1968)

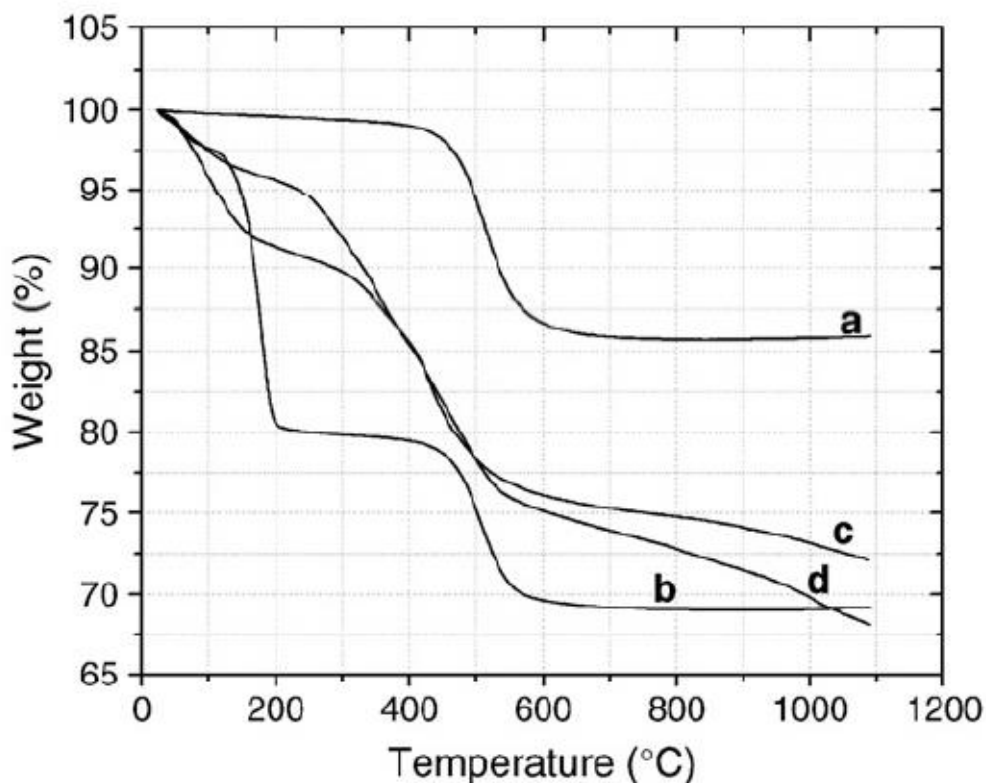


Figura 25. Curvas TGA para caolinita. Fuente: Tonle & Detellier (2008)

Las curvas TGA presentadas en la Figura 25, son para caolinita pura (a) o tratada de distintas formas, saturada o hecha reaccionar con distintos elementos químicos (b,c y d). Es evidente como existe un cambio importante asociado a una temperatura de 500°C. Los residuos de los ensayos realizados para este trabajo se pueden asociar con los de la curva a, de caolinita pura.

Se encuentra posible a partir de este análisis que exista en la matriz fina del suelo: Clorita¹⁹, Illita, Montmirillonita, Halosita, Cuarzo y Caolinita (siendo este el más notable).

Antes y después del ensayo de la segunda muestra se tomaron fotografías para notar el cambio del color del suelo. La Figura 26 muestra estas fotografías. La muestra es de color café claro inicialmente, el cambio asociado a la exposición a altas temperaturas va de lo ultravioleta a lo visible en el espectro de colores y finalmente se ve rojizo. La temperatura

¹⁹ Gillot (1968) indica que la Clorita se comporta de forma muy similar a la Caolinita en los análisis mineralógicos y que es difícil diferenciar estos dos minerales; de modo que también es posible que no haya Clorita en la matriz del suelo, sino que sólo sea Caolinita.

cambia el suelo químicamente, cambia su pH y cambia su color. El cambio a color rojo se puede relacionar con la presencia de hierro que se oxida al subir la temperatura.²⁰



Figura 26. Muestra de suelo 1 antes y después del ensayo de TGA

3.1.3.6.2 Prueba de difracción de rayos X

Se muestran a continuación los patrones de difracción del suelo 1 para una muestra del suelo completo (*Figura 28*), una pasado por la malla #200 (*Figura 27*) y una pasando por la malla #200 calcinada a 550°C por dos horas (*Figura 29*); y las tres comparadas (*Figura 30*). Estos ensayos y patrones de difracción fueron generados por Geraldine Conejo, de la Escuela de Química de la UCR. Ella también ayudó con la interpretación y comparación de los ensayos. En la *Figura 27*, *Figura 28* y *Figura 29*, se muestran los patrones de difracción encontrados comparables con el del suelo 1, que por lo tanto están presentes en el suelo. En la *Figura 30*, hay una comparación entre los tres ensayos realizados. Se presenta en el eje "x" una medida arbitraria de la intensidad con la que se midieron rayos difractados con un ángulo θ , (en este caso la cuenta de las veces que se midió) en el eje "y" se muestra el valor 2θ .

En cada patrón se graficaron también los patrones de difracción de los minerales arcillosos o materiales que se interpretó pueden formar parte del suelo.

²⁰ Referencia consultada: Geraldine Conejo encargada del uso del laboratorio de difracción de la escuela de química de la UCR

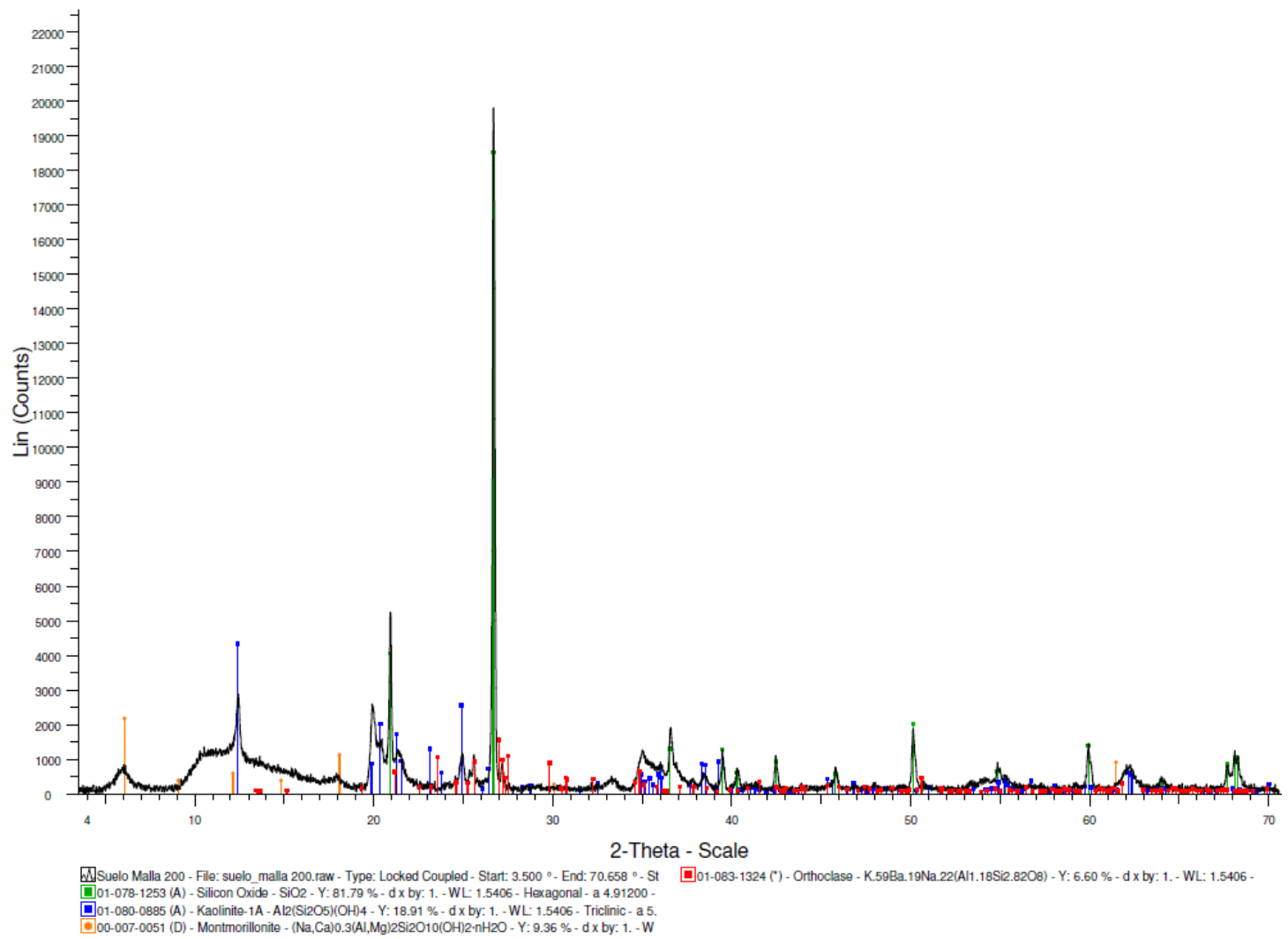


Figura 27. Patrón de difracción para el suelo pasado por la malla #200

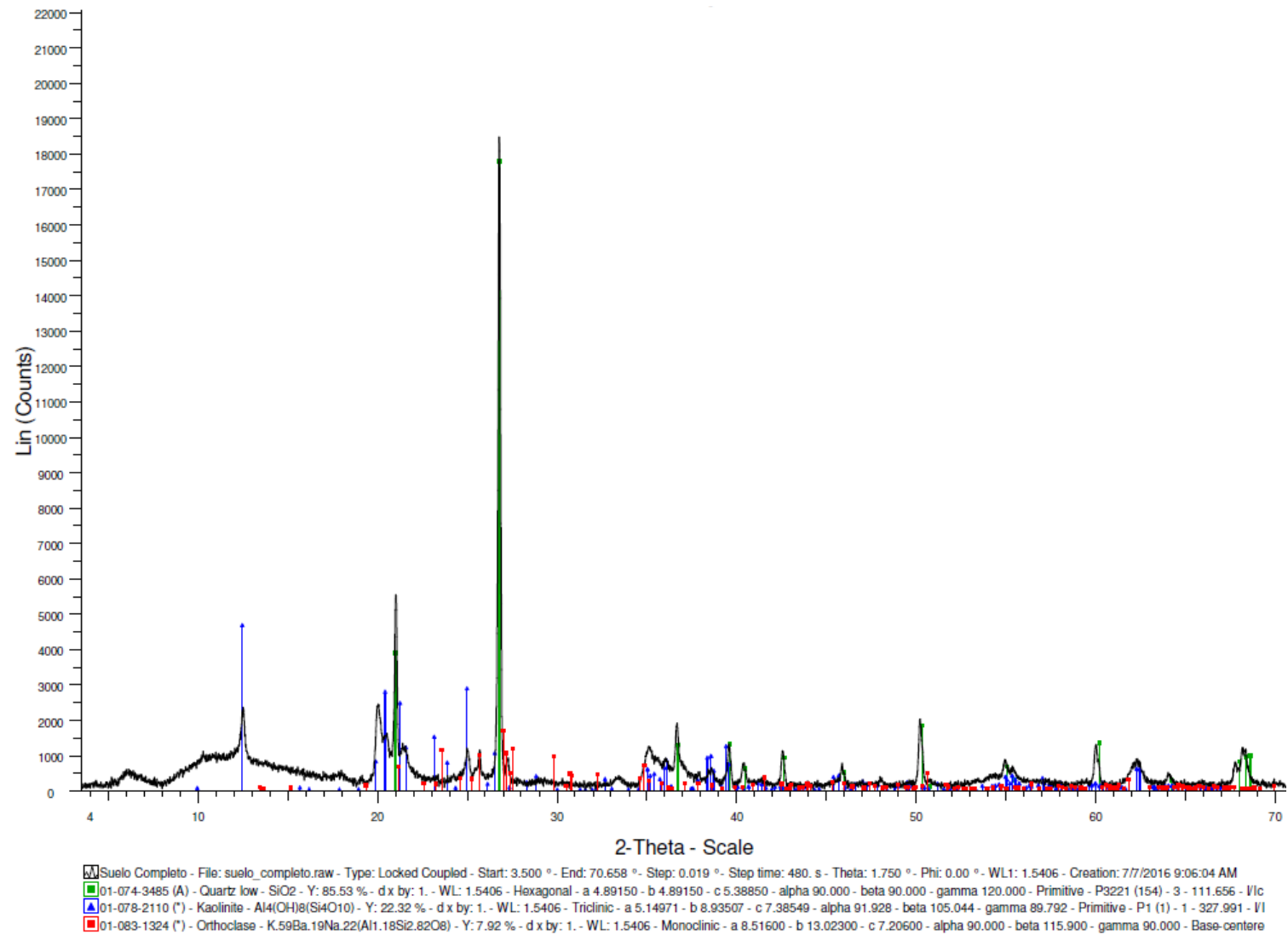


Figura 28. Patrón de difracción para el suelo completo

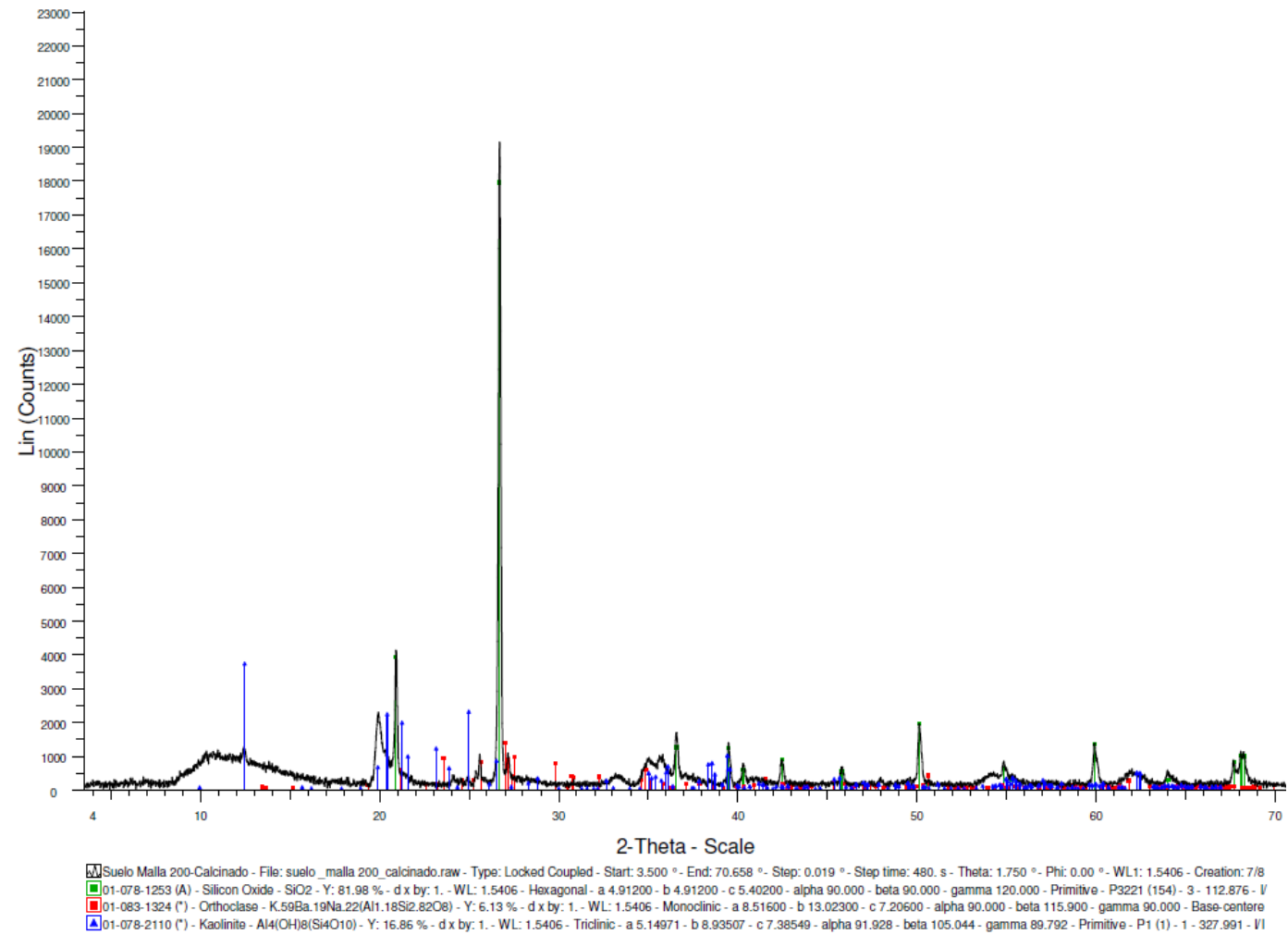


Figura 29. Patrón de difracción para el suelo pasado por la malla #200 y calcinado

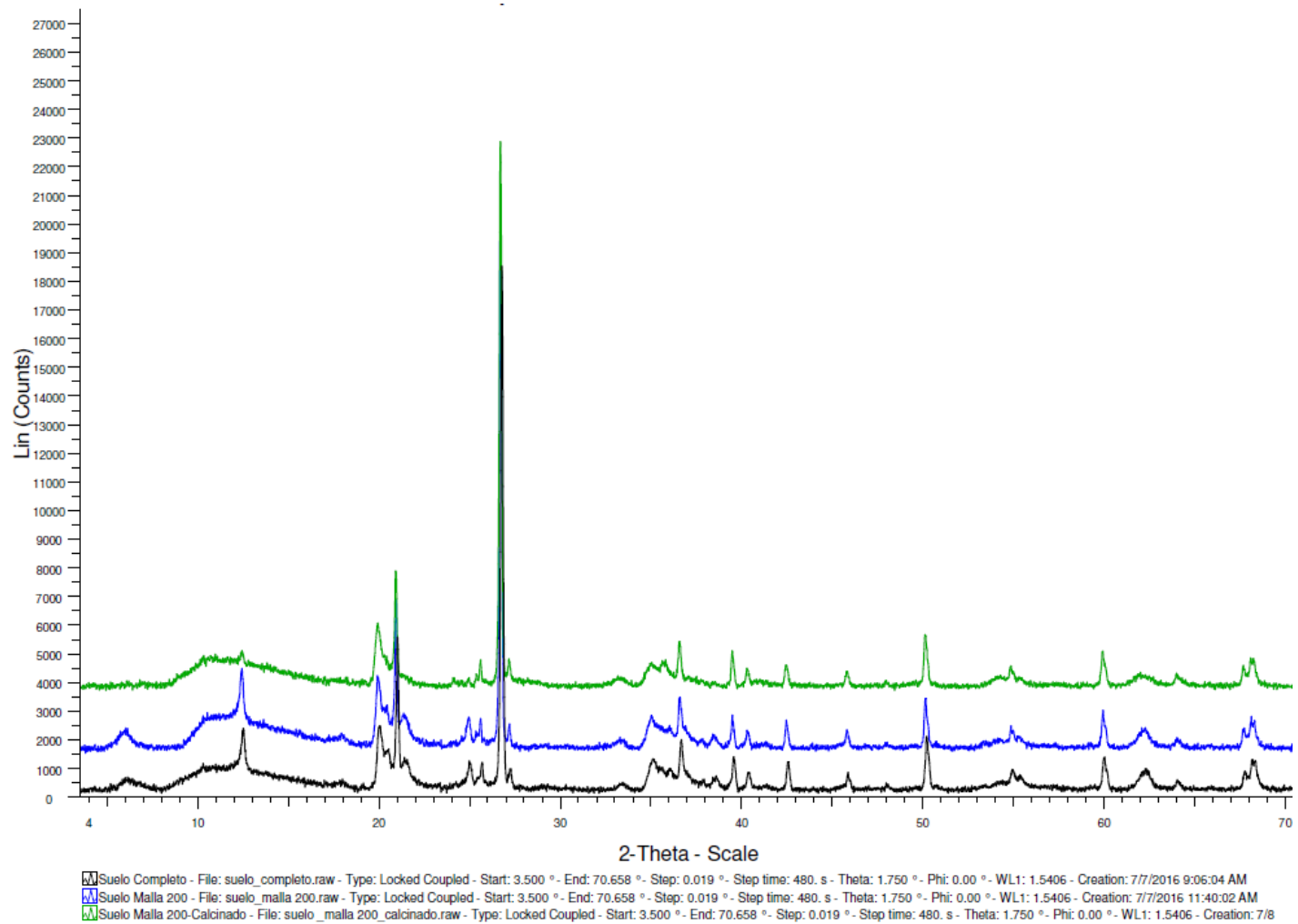


Figura 30. Comparación entre patrones de difracción

A partir de los patrones de difracción se puede ver que:

- La muestra analizada tiene esencialmente estructuras cristalinas, una muestra amorfa se ve en un patrón de difracción como curvas y no picos como los obtenidos.
- El suelo tiene en su matriz una estructura de Sílice, Ortoclasa (Feldespatos), Montmorillonita, Caolinita y Cuarzo como tal.
- Era de esperarse que al pasar el suelo por la malla #200 parte del Cuarzo desapareciera (que el conteo bajara) pero se mantuvo igual. Esto puede dar un indicador de la meteorización que ha sufrido el suelo.
- El suelo puede tener otros minerales no considerados en esta interpretación.
- Fue posible ver el pico de la Montmorillonita solo al analizar la muestra pasando por la malla #200, donde se acentuó el pico. Este también desapareció en la muestra calcinada, lo que era de esperarse: según Mitchell (1993) al secarse en exceso el piso de la Montmorillonita cae debido al desprendimiento de agua entre capas del mineral. Esto podría confirmar la observación del Cuadro 7, para 50-100°C. Los fenómenos en los que se manifestó la Montmorillonita no fueron tan evidentes como los utilizados para identificar la presencia de Caolinita en el suelo.
- Se puede ver en la Figura 30, que al comparar el suelo calcinado a 550°C con los otros dos, los picos del patrón de la Caolinita desaparecen. Esto confirma la presencia de la Caolinita; que sufre un proceso de deshidroxilación cerca de los 500°C.
- Es posible haber confundido el patrón de Caolinita con Illita, el hecho de que el pico para $2\theta=13^\circ$ desaparezca puede ser evidencia que respalde la decisión tomada ya que si bien la Illita se ve afectada a temperaturas de 500°C se rehidrata rápidamente. Un pico característico de la Illita se asoma entre los picos de la Montmorillonita y la Caolinita en $2\theta=10^\circ$ lo que evidencia que sí existe en el suelo pero en una proporción pequeña.
- Es posible confundir la Halosita con la Caolinita también pero se descarta esta posibilidad dados los valores de actividad medidos.

3.1.3.7 Clasificación SUCS

Teniendo en cuenta todo lo presentado antes, en esta sección, y siguiendo lo estipulado en ASTM D2487, se concluye que el suelo 1 es un suelo de grano fino, perteneciente al grupo de las arcillas de alta plasticidad (CH) con arena y limos. Más del 50% del suelo pasa la malla #200, el LL es superior a 50, no hay presencia de orgánicos, el IP está apenas sobre la línea "A" de la carta de plasticidad de Casagrande, lo que sugiere gran influencia de los

limos presentes, y más del 15% pero menos del 30% es retenido en la malla #200, y casi un tercio del suelo son partículas limosas.

3.1.4 Historia de esfuerzos del suelo 1

Realizando la prueba de consolidación unidimensional (ASTM D2435) del suelo se obtuvo las características de compresibilidad del suelo; se presentan a continuación:

Cuadro 8. Condiciones iniciales y finales del ensayo de consolidación unidimensional del suelo 1

Condición	Inicial	Final
w	23,0%	33,4%
ρ_d (g/cm ³)	1427	1494
e	0,90	0,81
S	88%	100%

A partir de los resultados se concluye que el esfuerzo de preconsolidación del suelo y esfuerzo máximo al que ha sido expuesto el suelo es de 140 kPa. Se presentan a continuación los resultados finales del ensayo (Cuadro 9 y Figura 31)

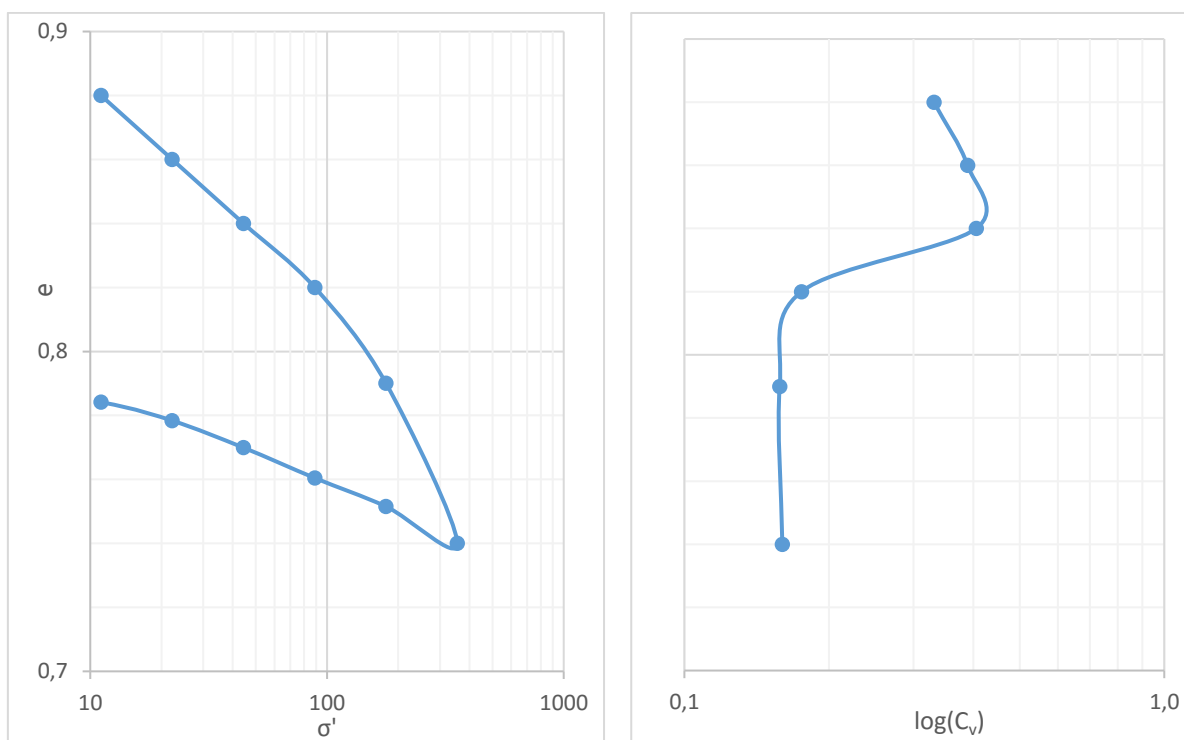


Figura 31. Gráfico del esfuerzo axial (escala log) vs razón de vacíos (completa, con descarga) y gráfico del logaritmo del coeficiente de consolidación vs razón de vacíos para el ensayo de consolidación del suelo 1

Cuadro 9. Resumen de resultados para el ensayo de consolidación del suelo 1

Método de la raíz cuadrada del tiempo	
t_{90} (s)	C_v (mm ² /s)
260	0,331
211	0,389
198	0,406
446	0,175
479	0,158
454	0,160

3.2 Suelo 2

3.2.1 Zona de muestreo

El suelo 2 también se obtuvo a las márgenes de la autopista Florencio del Castillo (Ruta Nacional 2 o Carretera Interamericana), en Ochomogo, pero en el lado del sentido Cartago-San José. El sitio de muestreo se encuentra a 500m antes de la tienda Protecto, como se puede ver en la Figura 32; cerca de las vías del tren, en las coordenadas $9^{\circ}54'05.1''N$ $83^{\circ}56'47.9''W$.



Figura 32. Ubicación de la zona de muestreo del suelo 2

Fuente: Google Maps; Modificada

Se obtuvo la muestra a nivel superficial, de un talud expuesto. Se muestra el talud en la Figura 33. La altura del punto de muestreo a la cresta es de 1m.



Figura 33. Talud del que se obtuvo el suelo 2

3.2.2 Descripción de la muestra

El suelo 2, tiene una coloración café oscuro, tiene tonos de color naranja oscuro o negro. El suelo 2 es fino, se encuentra adherido en bloques secos y se percibe en él partículas de carácter granular, pocas pero las tiene. El suelo, destinado a los ensayos de caracterización y las muestras alteradas, por estar conglomerado se degradó y secó al aire, para las muestras inalteradas se extrajo un bloque que posteriormente se mantuvo en la cámara húmeda para iniciar el proceso de saturación.

En sitio, el material presenta algo de resistencia en estado seco pero se desmorona fácilmente y su afinidad al agua es evidente; el suelo 2 tiene presencia de limos, retiene humedad y presenta alta plasticidad; su olor, a pesar de ser más fuerte que el suelo 1 (notable olor a "tierra mojada")²¹, deja saber que el suelo no es orgánico.

3.2.3 Identificación del suelo

De acuerdo con las metodologías descritas en las normas ASTM²² D6026, D2216, D421, D4318, D422, D854, D2487 y D7263 se encontró lo siguiente con respecto al suelo 1:

²¹ Puede estar asociado a que el suelo 2 retiene más humedad que el suelo 1; pensando en que el olor está asociado a la presencia, más notable en el suelo 2, de bacterias como la geosmina.

²² Ídem

3.2.3.1 Límites de consistencia

En la Figura 34, se presentan, en verde, los resultados de la prueba de límites de Atterberg en la carta de plasticidad de Casagrande. Los resultados límite líquido (LL %), límite plástico (LP %) e Índice de Plasticidad (IP%) de las distintas repeticiones del ensayo se encuentran bajo la línea "A" y tienen un LL superior al 50%, por lo que están dentro de lo esperado para un limo elástico (MH).

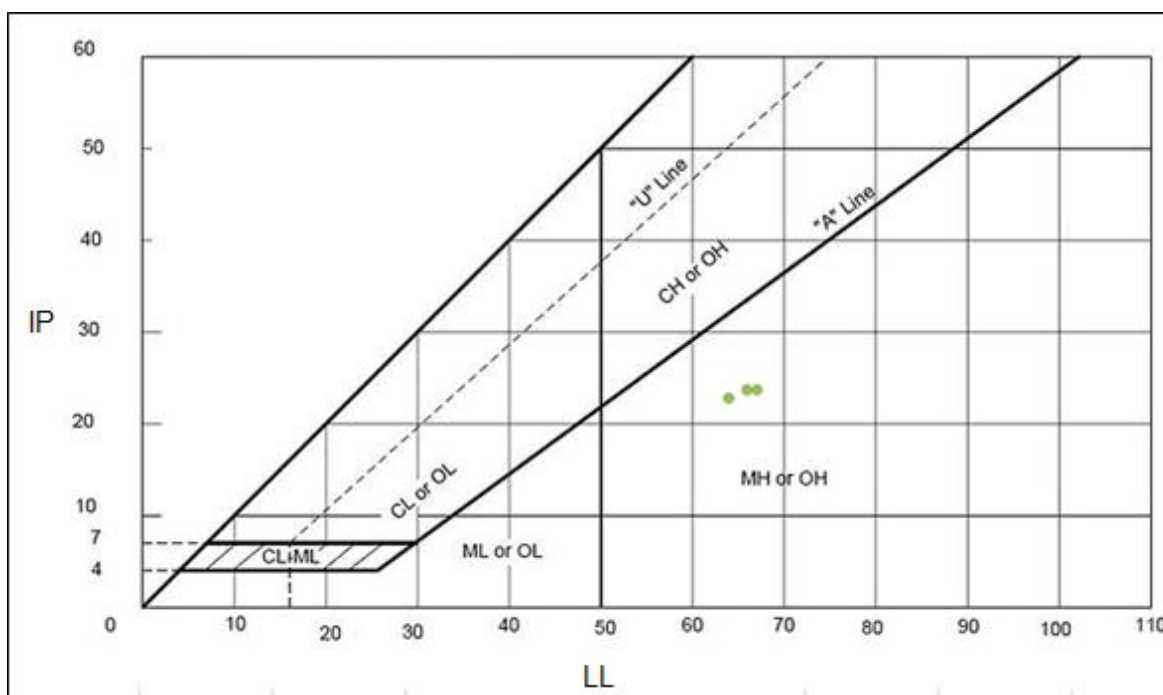


Figura 34. Carta de Plasticidad de Casagrande con resultados de la prueba de límites de Atterberg del Suelo 2
Fuente: Norma ASTM D2487; Modificada

3.2.3.2 Granulometría

El tamaño máximo de las partículas del suelo 2 es de 2mm; sin embargo la matriz de suelo tiene partículas granulares que quedan retenidas en la malla #4 (4,75mm) que se han identificado espaciadas aleatoriamente por la muestra.

Las partículas más grandes que 0,075mm (retenidas en la malla #200), las arenas y gravas, son de forma angular y son duras y durables.

Se presenta en el gráfico de la Figura 35, el resultado de tres repeticiones del ensayo estipulado en ASTM D422. Del gráfico anterior se puede leer lo establecido en el siguiente cuadro (Cuadro 5).

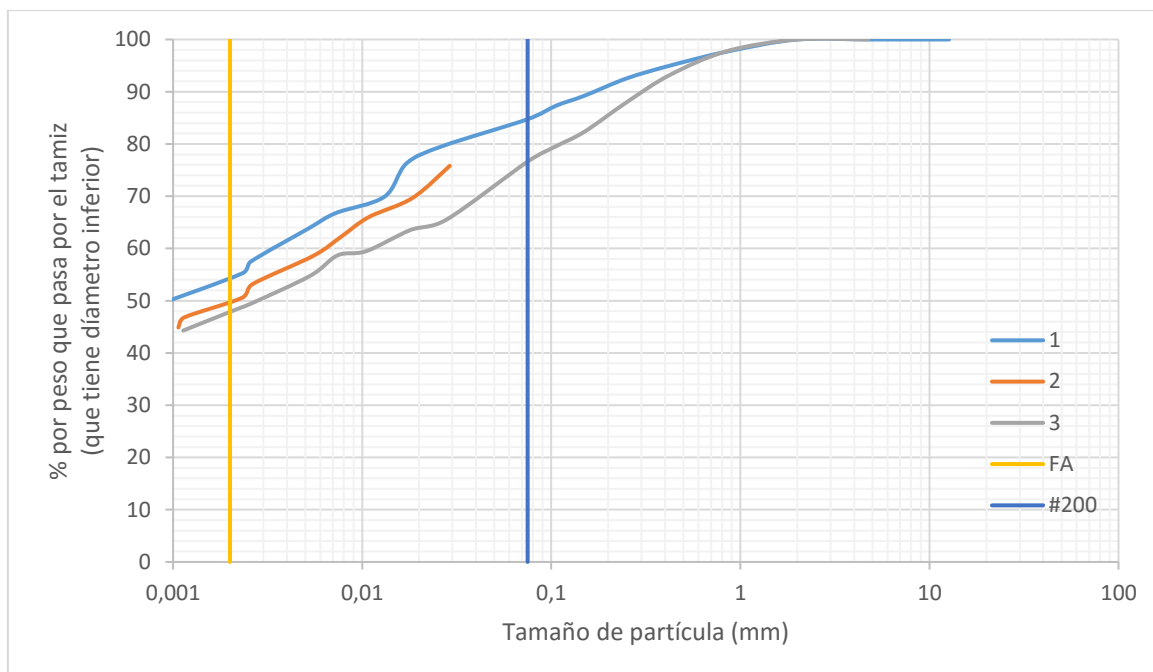


Figura 35. Composición granulométrica del suelo

Cuadro 10. Granulometría del suelo 1

Tamaño de partícula	Porcentaje
Gravas, pasando la malla 3in y retenido en la malla #4	0
Arenas, pasando la malla #4 y retenido en la #200	19,3
Arenas gruesas, pasando la malla #4 y retenida en la #10	0
Arenas medianas, pasando la malla #10 y retenida en la #40	2,3
Arenas finas, pasando la malla #40 y retenida en la #200	17
Limos, 0,074 a 0,005mm	21,7
Arcillas, más pequeño que 0,005mm	59
Coloides, más pequeño que 0,001mm	44,9
FA (más pequeño que 0,002mm) ²³	50,4

²³ Existe diferencia entre los tamaños de partícula que definen un tipo de suelo, *i.e* arena, limo o arcilla, se muestran en el cuadro los criterios de ASTM, pero se reporta la FA según el criterio británico, que es el comúnmente utilizado en la literatura de resistencia residual.

Esto indica la presencia predominante de limos en el suelo 2, pero también la presencia de arcillas y arenas en la matriz del suelo 2, como lo es usual en un suelo residual.

3.2.3.3 Gravedad específica

Para obtener la gravedad específica del suelo 2 se siguió el método A, para especímenes húmedos, detallado en la norma ASTM D854. No se excluyó de la prueba parte del material. La gravedad específica del suelo 2, de referencia y para los cálculos respectivos, es de **2,658**; obtenido promediando los valores obtenidos en 6 repeticiones, eliminando el más alto y más bajo (desviación estándar: 0,07). En un ensayo de comparación realizado por el técnico del LanammeUCR Manrique Vargas se obtuvo un valor de 2,706.

3.2.3.4 Densidad

Se obtuvo el peso unitario del suelo 2, según lo establecido en la norma ASTM D7263. Los resultados de varias repeticiones fueron los mostrados en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Pesos unitarios medidos del suelo 2

Repetición	w (%)	γ_m (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	e
1	53,17	15,56	10,16	1,41
2	55,75	15,66	10,05	1,48
3	67,82	13,27	7,91	1,80
4	64,6	14,12	8,58	1,72
5	67,67	14,2	8,47	1,80
Promedio	61,8	14,56	9,03	1,64
σ	6,89	1,02	1,01	

Se puede ver que el suelo 2 es considerablemente más liviano que el suelo 1, esto puede deberse a la génesis y al proceso más avanzado de meteorización de este suelo.

3.2.3.5 Humedad natural

El suelo se muestreó el día 02/09/2015 y desde entonces, hasta finalizar esta investigación se dio seguimiento (al menos mensualmente) a la humedad in-situ del talud muestreado. El gráfico de la Figura 36, indica el porcentaje de humedad del suelo 2 para cada fecha. La humedad se calculó siempre siguiendo la metodología descrita en ASTM D2216. El comportamiento de la humedad es igual que en el otro talud, del suelo 1; sin embargo es notable que en este los valores de humedad son siempre mayores y que nunca se estuvo cerca de valores de saturación.

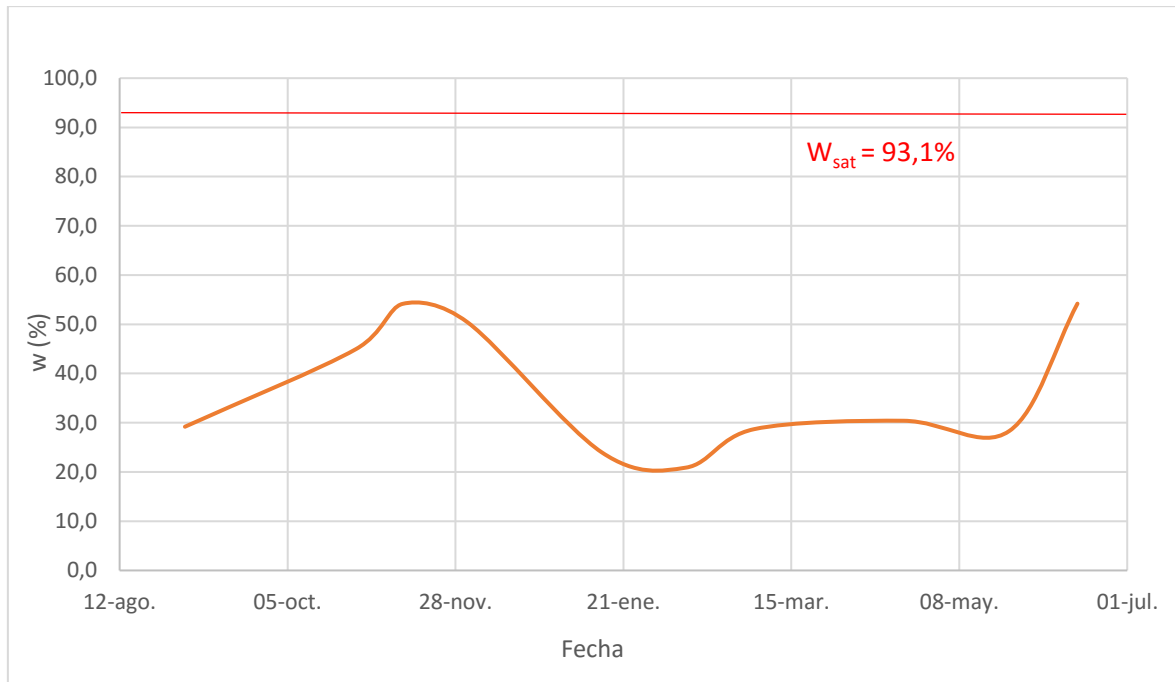


Figura 36. Gráfico de humedad contra tiempo del talud muestreado para el suelo 2

3.2.3.6 Mineralogía

Según Holtz y Kovacs (1981), de forma similar que para el suelo 1 se puede esperar que este suelo tenga minerales arcillosos de Caolinita, o de Illita (Figura 8) que se encuentra cerca en el gráfico propuesto.

La actividad del suelo 1 es de 0,48; según el Cuadro 2 esto asocia al suelo a la descripción de inactivo y según el Cuadro 3 se podría pensar que el valor de actividad de este suelo es Caolinita o Illita o Clorita, o algún otro mineral de baja actividad.

Para este suelo se realizaron ensayos de TGA/DTG para ahondar en la caracterización mineralógica del mismo. No fue posible para este suelo obtener patrones de difracción porque hubo algunos problemas con el difactor por algún tiempo y el tiempo se convirtió en la limitante que dejó por fuera esta posibilidad.

3.2.3.6.1 Ensayo Termogravimétrico (TGA)

Se presentan en la Figura 37 y Figura 38 los resultados de los ensayos de TGA. Los ensayos se realizaron en uno de los laboratorios del Pitra LanammeUCR con la ayuda del Quim. Jorge Salazar.

En ambas figuras se presenta la curva de masa como función de la temperatura (TGA), en verde, y la derivada de esta con respecto a la temperatura (DTG) en azul. Una es para cuando la muestra fue preparada pasando por la malla #200 y seca al aire y la otra para

cuando la muestra fue preparada pasando por la malla #200 y seca al horno. La forma de las curvas es igual, salvo por el primer pico que se debe a la evaporación de agua libre o superficial. La diferencia en magnitud de los valores porcentuales de la pérdida depende del agua libre que tenía la muestra al inicio del ensayo.

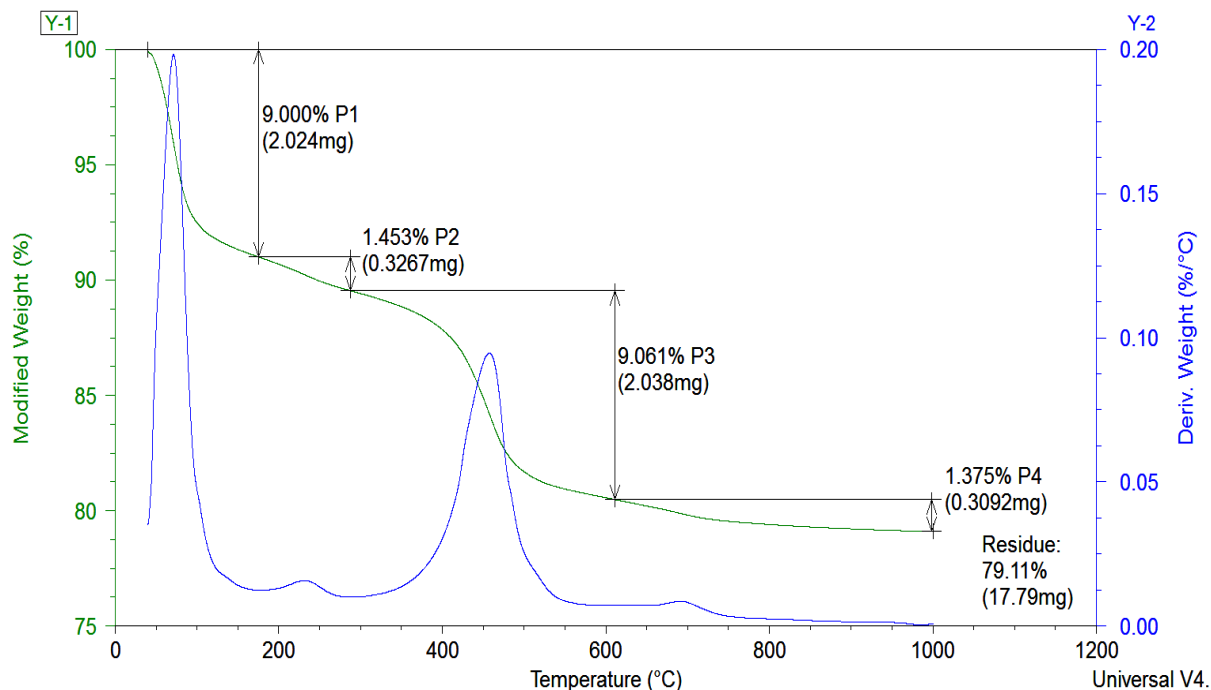


Figura 37. Curvas del ensayo TGA para el suelo 2 [Muestra seca al aire, pasando por la malla #200]

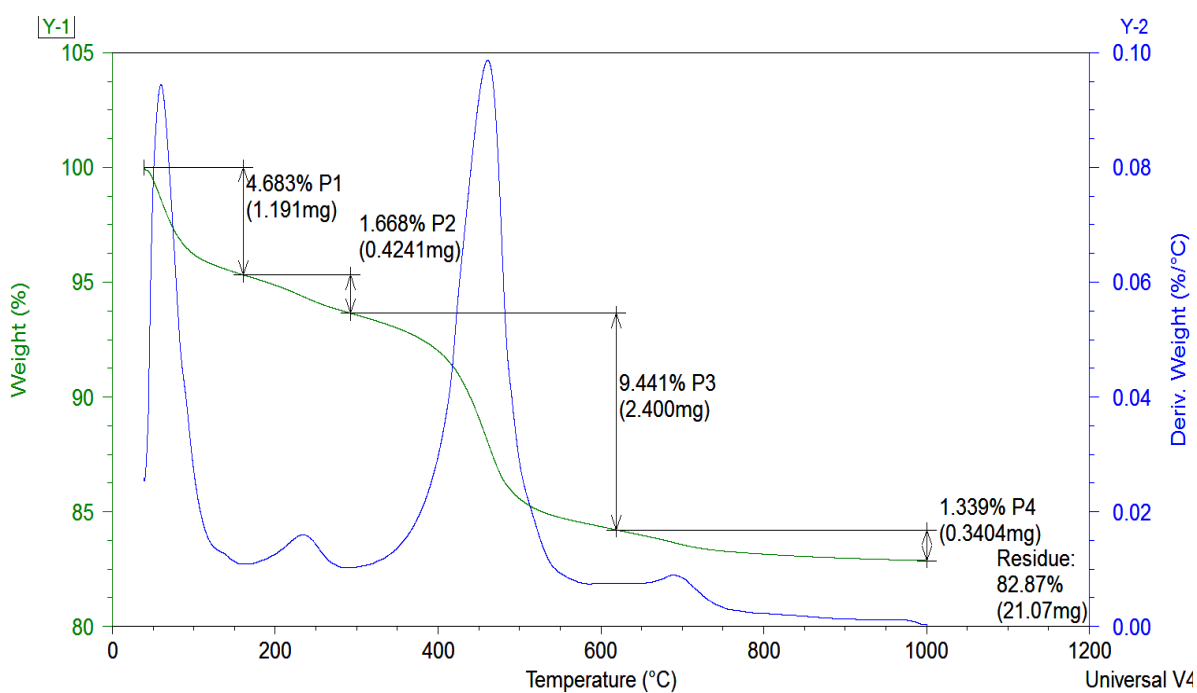


Figura 38. Curvas del ensayo TGA para el suelo 2 [Muestra seca al aire, pasando por la malla #200]

Se puede ver un comportamiento muy similar al del suelo 1. Los cambios por debajo de 100°C (puede haber más Montmorillonita) y alrededor de 500°C (puede haber más caolinita) son más marcados, el fenómeno que sucede en el suelo 1 a las 250°C (puede que tenga menos materia orgánica, Montmorillonita, Illita o Clorita) en el suelo 1 es menos notable y el que sucede cerca de los 600°C parece ausente (puede ser por menos estructuras como el cuarzo), a partir de los 700°C el comportamiento es de nuevo muy similar al del suelo 1 y hasta más parecido a la curva de referencia de la caolinita (Figura 25 a).

Antes y después del ensayo de las muestras se tomaron fotografías para notar el cambio del color del suelo. La Figura 39 muestra estas fotografías. La muestra es de color café (más oscuro que el suelo 1) inicialmente, y cambia su color con la temperatura. La diferencia en el cambio de color de los suelos (1 y 2) puede ser un indicador de que los minerales arcillosos son distintos o de la ausencia de hierros en este suelo²⁴.

²⁴ Se cree que es más lo segundo ya que todo indica a que los suelos son muy similares



Figura 39. Muestras de suelo 2 antes y después del ensayo de TGA

3.2.3.7 Clasificación SUCS

Teniendo en cuenta todo lo presentado antes, en esta sección, y siguiendo lo estipulado en ASTM D2487, el suelo 2 es un limo elástico (MH) con arena y arcillas. Más del 50% pasa la malla #200, el LL es superior a 50, no hay presencia de orgánicos, el IP está bajo la línea "A" de la carta de plasticidad de Casagrande y más del 15% pero menos del 30% es retenido en la malla #200 y más de un tercio del suelo es arcilla.

3.2.4 Historia de esfuerzos del suelo 2

Realizando la prueba de consolidación unidimensional (ASTM D2435) del suelo se obtuvo las características de compresibilidad del suelo; se presentan a continuación:

Cuadro 12. Condiciones iniciales y finales del ensayo de consolidación unidimensional del suelo 2

Condición	Inicial	Final
w	69,0%	93,1%
ρ_d (g/cm ³)	1	1
e	2,55	2,38
S	99%	100%

A partir de los resultados se concluye que el esfuerzo de preconsolidación del suelo y esfuerzo máximo al que ha sido expuesto el suelo es de 120 kPa. Se presentan a continuación los resultados finales del ensayo (Figura 40 y Cuadro 13)

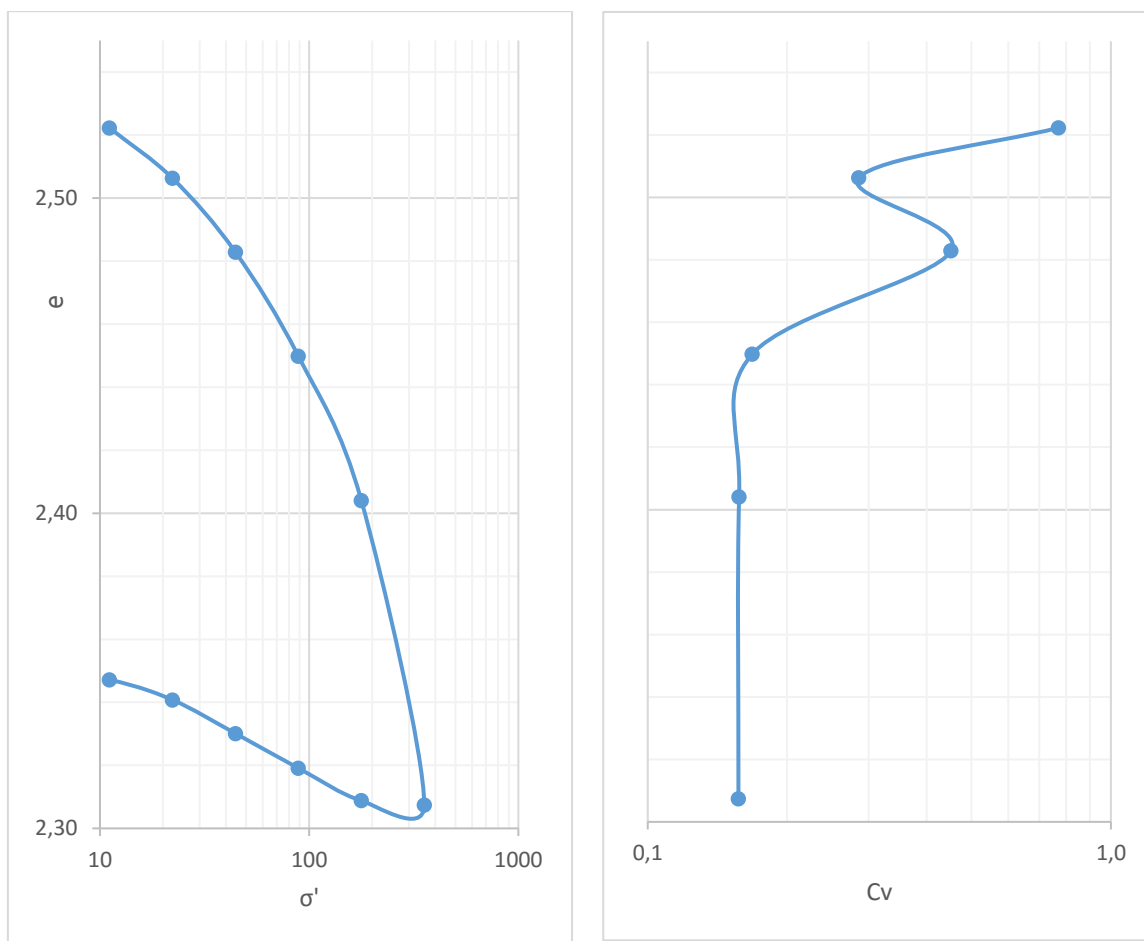


Figura 40. Gráfico del esfuerzo axial (escala log) vs razón de vacíos (completa, con descarga) y Gráfico coeficiente de consolidación (escala log) vs razón de vacíos para el ensayo de consolidación del suelo 2

Cuadro 13. Resumen de resultados para el ensayo de consolidación del suelo 2

Método de la raíz cuadrada del tiempo ²⁵	
t_{90} (s)	C_v (mm ² /s)
109	0,770
290	0,286
181	0,452
479	0,168
499	0,158
479	0,157

²⁵ Como en el suelo 1 no se pudo aplicar el método logarítmico se continuó utilizando este por cuestión de uniformidad.

3.3 Resumen de las características de los suelos estudiados

Se presenta a continuación un cuadro resumen²⁶ con las características de los suelos ensayados para esta investigación.

Cuadro 14. Resumen de la caracterización de los suelos investigados

Suelo	1	2
Clasificación SUCS	CH*	MH**
G _s	2,705	2,658
Peso unitario seco (γ _d)	15,23 kN/m ³	9,03 kN/m ³
LL	65	66
LP	31	42
IP	35	24
FA ²⁷	42,7	50,4
A	0,82	0,48
e	0,903	2,470
Humedad (w) de saturación	33,4%	93,1%
Esfuerzo de preconsolidación	140 kPa	120 kPa

*con presencia de arenas y limos **con alta presencia de arcillas

Para ambos suelos fue notable la presencia de la Caolinita y el Cuarzo en forma predominante. En el suelo 1, gracias a los ensayos de difracción, fue posible confirmar esto y encontrar que existe Montmorillonita y algo de Illita en la matriz del suelo. El suelo 1 presentó evidencias de tener estructuras de minerales no arcillosos en su composición que se cree están menos presentes en el suelo 2 (a partir de la curva de TGA). Es posible que el suelo 2 sea más puro (Caolinita) o nada más esté más meteorizado.

Como modo de validación de la humedad de saturación reportada, se puede ver en la Figura 41; al graficar el peso unitario seco y la relación de vacíos de los suelos 1 y 2 que la humedad de saturación reportada y la indicada en el gráfico de referencia son similares por lo que los valores reportados son esperados para estos suelos.

Nota: Es importante al caracterizar un suelo en el laboratorio, iniciar por determinar el G_s del suelo. Realizar otros ensayos antes de tener seguridad (generada por la repetitividad) del valor de G_s que se utilizará, y ocasiona que se tenga que procesar los resultados de otros ensayos más de una vez (para los distintos valores de G_s, hasta el definitivo).

²⁶ Se reportan en este cuadro valores promedio de los resultados de laboratorio.

²⁷ La fracción de arcilla como la entiende la escuela Británica (partículas menores a 0,002mm)

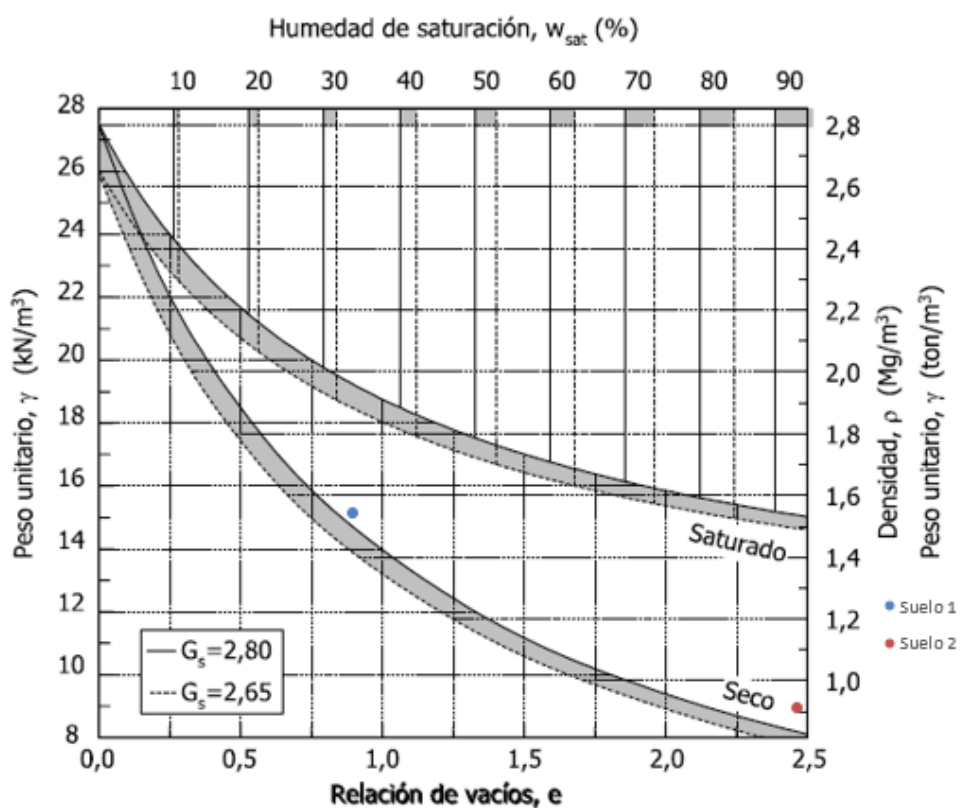


Figura 41. Referencia típica de humedat de saturació, relació de vacíos i pes unitari. (Vargas, 2013)
Modificado

El suelo 1 fue utilizado para ensayos preliminares o de calibración metodológica mientras que el otro suelo fue exclusivamente utilizado para obtener una envolvente de falla en cada uno de los dos equipos disponibles.

4 Metodología de trabajo experimental

Se describe en esta sección la metodología seguida para realizar cada uno de los ensayos, se explica cómo se llegó a estas metodologías, los ensayos preliminares y consideraciones necesarias para hacerlo y cuántos ensayos y de qué tipo se realizaron para este trabajo.

4.1 Calibración de la metodología definitiva

En vista de que los ensayos por realizar parecían demasiado largos (luego de hacer algunas pruebas para comprender el funcionamiento de los equipos), primero se destinaron algunos ensayos a buscar reducir el tiempo requerido para completar la investigación; además de completar vacíos metodológicos, ya que si bien las normas ASTM son claras y detalladas omiten algunos detalles y se deben tomar decisiones importantes a la hora de implementarlas.

4.1.1 Análisis de la velocidad de falla para el equipo *Shearmatic*

Parte importante de este trabajo se destinó a determinar cuál sería la velocidad de falla adecuada para realizar los ensayos de corte. La velocidad de falla es un factor de cuidado en cualquier ensayo de falla ya que esta determina la condición del ensayo, ya sea drenada, parcialmente drenada o no drenada y además, no se tiene en los equipos utilizados forma de medir la presión de poro. Los ensayos de esta investigación se realizaron para obtener la resistencia residual en condición drenada.

Cómo se explicó anteriormente se fijó el d_f en 5mm y se determinó el t_f . Existen diferentes opciones de teorías para respaldar el tiempo de falla seleccionado: ASTM (normas), Skempton (1985) o Gibson & Henkel (1954).

De modo que se realizaron ensayos de corte directo en la caja circular con el suelo 1 para diferentes t_f :

1. 24 horas. Recomendado por ASTM para arcillas en casos en los que no se pueda utilizar el procedimiento de la norma ASTM D2435.

2. 211 minutos, Calculado con la teoría de Gibson & Henkel (1954) utilizando un C_v de la parte de consolidación virgen de la curva de consolidación.²⁸ ($0,0016\text{cm}^2/\text{min}$, ver Cuadro 9) y un grado de consolidación (U) de 97,5%.²⁹
3. 105,5 minutos, para el suelo 1. Como el anterior, ahora utilizando un grado de consolidación (U) de 95%.³⁰
4. 10min. Siguiendo lo que dice Skempton (1985)³¹.
5. 1min. Igual al anterior pero conociendo la limitación planteada en 4.1.2.

Los resultados obtenidos para las diferentes velocidades se muestran a continuación³²:

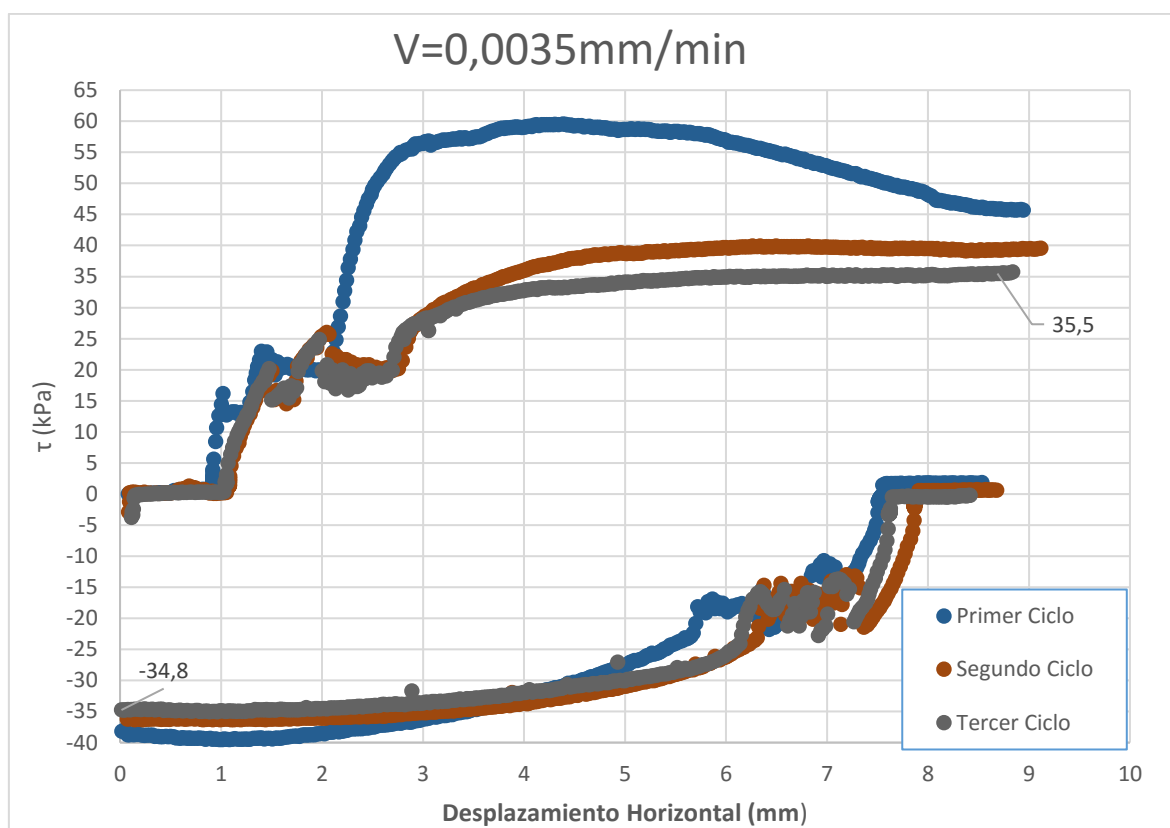


Figura 42. Análisis de velocidad de falla, caso 1

²⁸ ASTM D3080 recomienda basarse en el coeficiente de consolidación de la parte de consolidación virgen de la curva de consolidación.

²⁹ En el texto de Gibson & Henkel (1954) concluyen que para todo grado de consolidación mayor al 95% la resistencia obtenida es drenada y no hay cambio en su valor.

³⁰ Ídem

³¹ Para toda velocidad de falla inferior a 100mm/min el valor medido de resistencia residual se puede considerar igual.

³² Los resultados mostrados en esta sección no tienen una corrección de área como la propuesta por Bardet (1997)

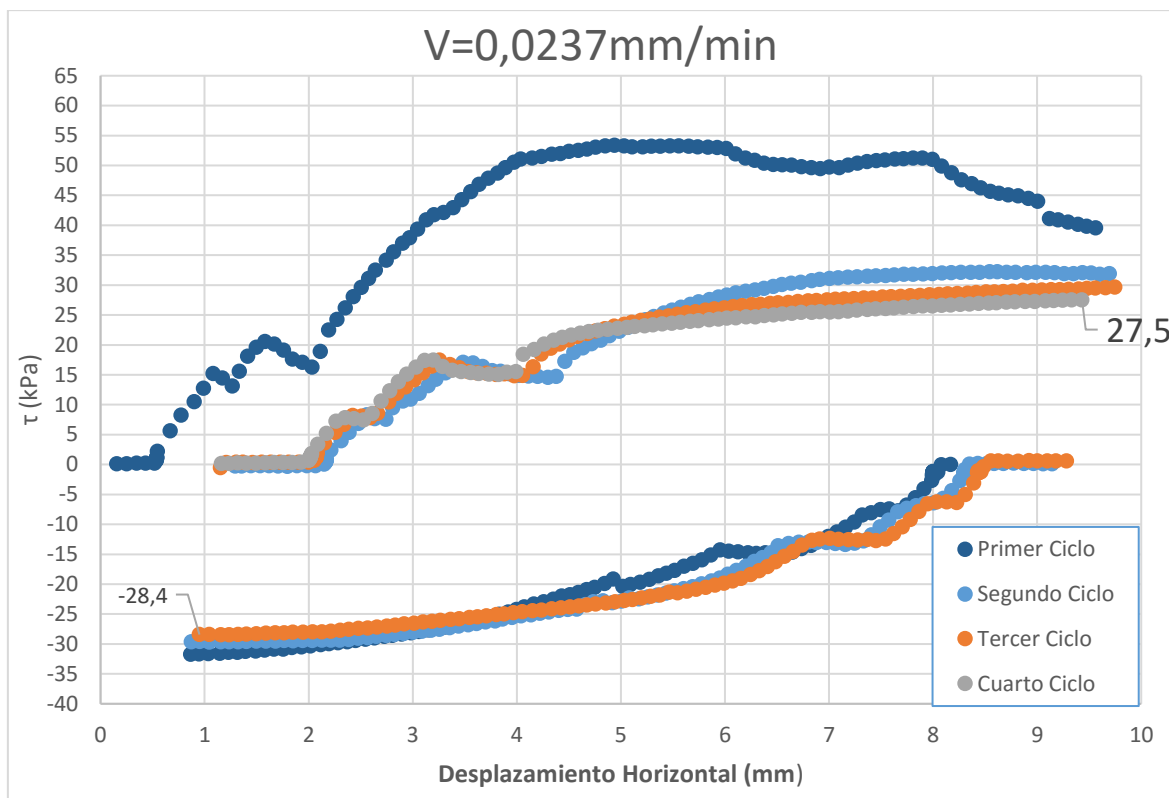


Figura 43. Análisis de velocidad de falla, caso 2

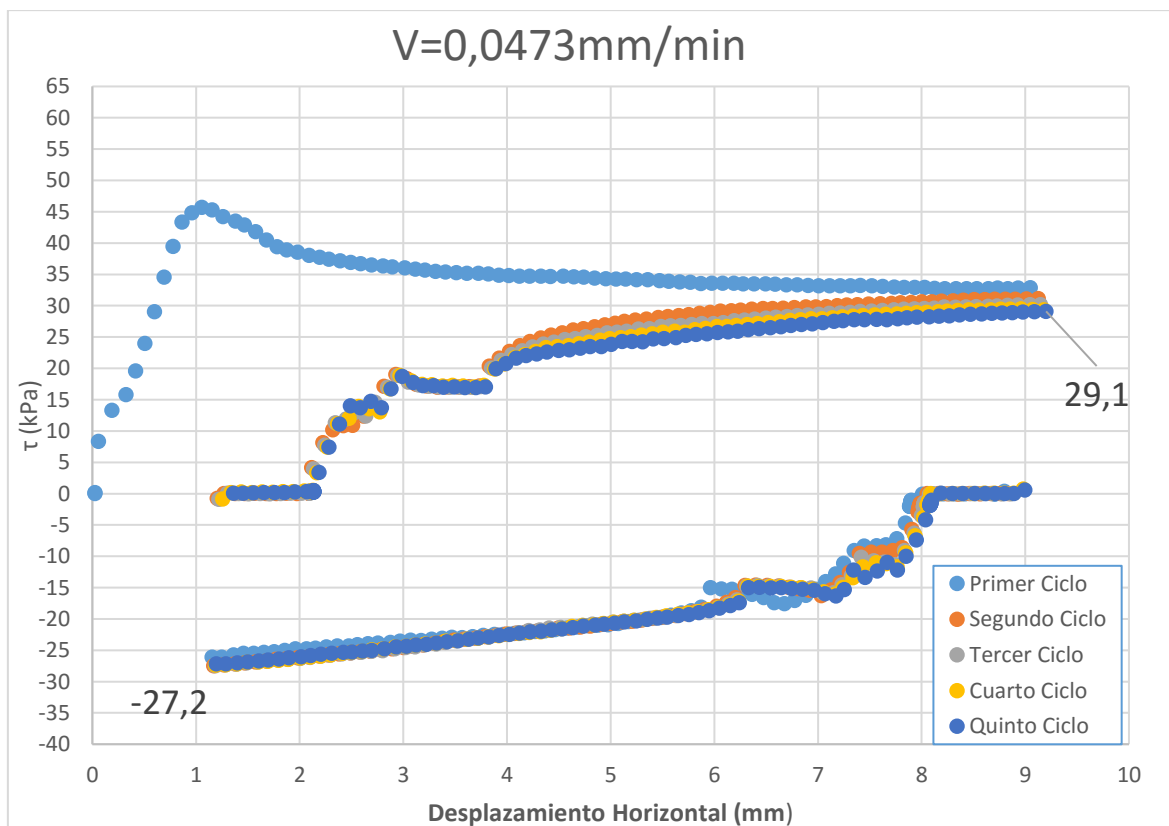


Figura 44. Análisis de velocidad de falla, caso 3

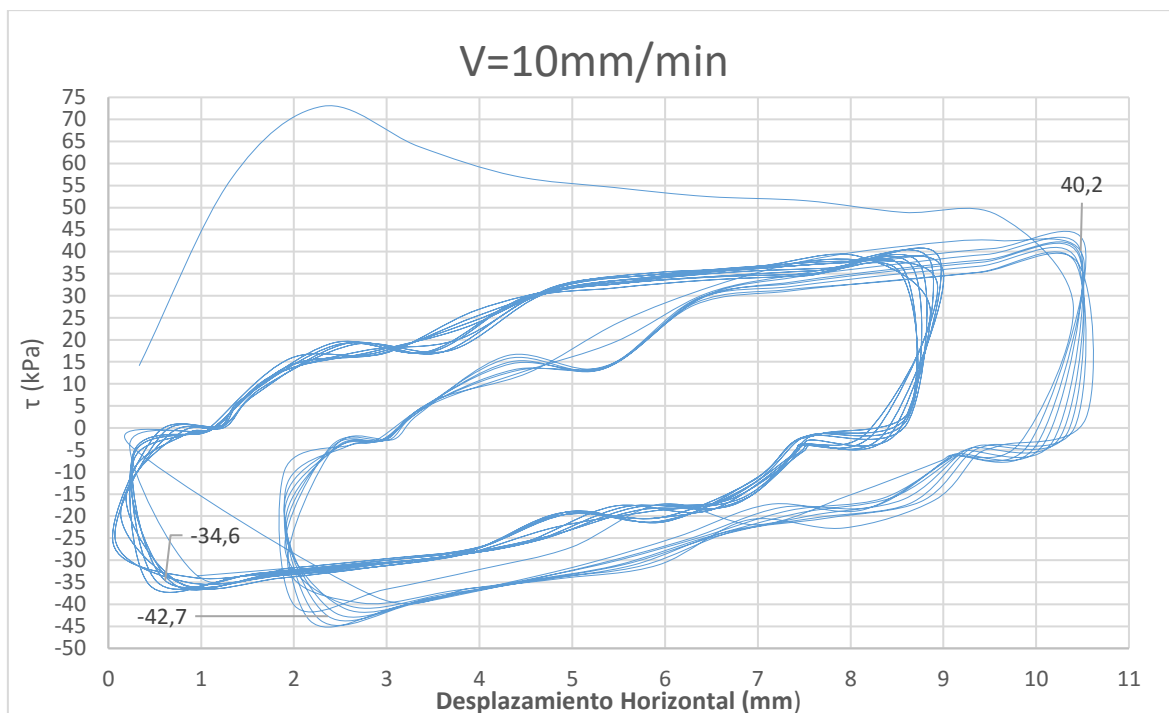


Figura 45. Análisis de velocidad de falla, caso 4³³

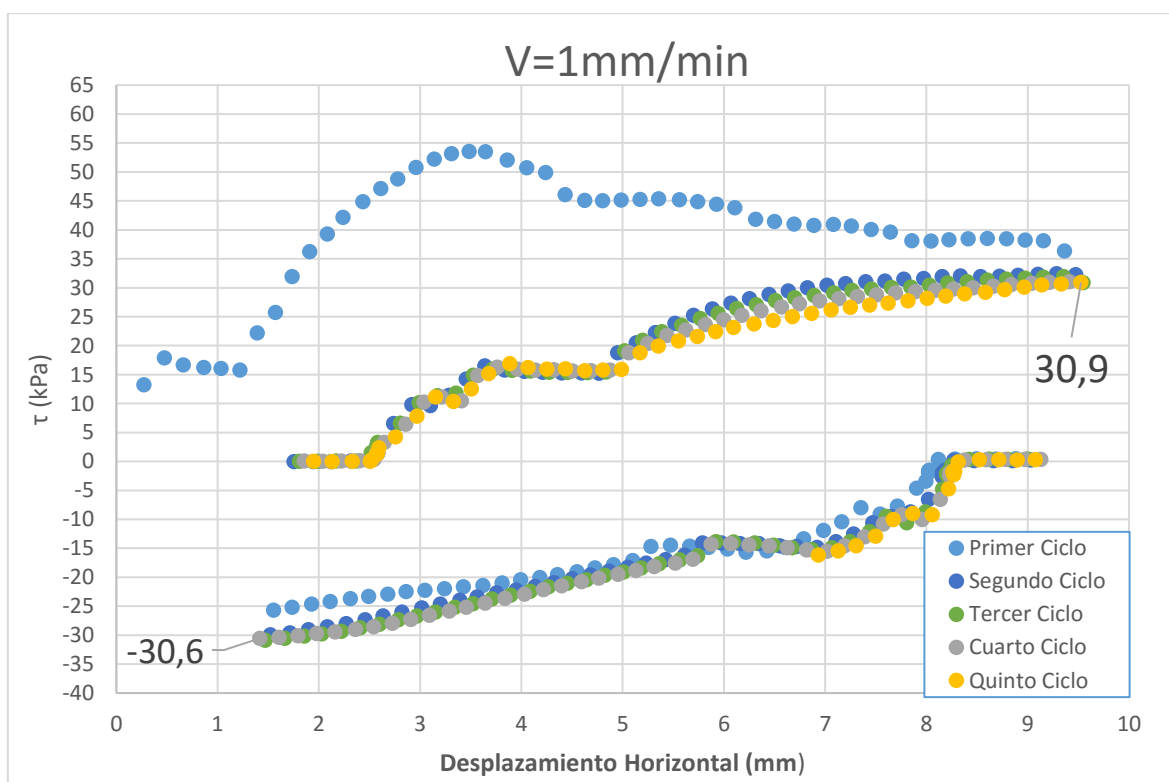


Figura 46. Análisis de velocidad de falla, caso 5

³³ Al realizar este ensayo fue necesario detener y alinear la máquina por lo que existe diferencia entre la posición de algunos de los ciclos. Además, se muestran de forma corrida por escasez de datos puntuales

Los "valles" (entre otras irregularidades que se presentaron en los ensayos de la máquina *Shearmatic*) que se manifiestan en las gráficas esfuerzo-deformación de las figuras anteriores se explican en el Apéndice 1. Estos no influyen los resultados obtenidos.

El siguiente cuadro resume lo obtenido:

Cuadro 15. Resumen de resultados de ensayos de corte directo residual para análisis de velocidades de falla

Caso	Ciclos	σ' (kPa)	τ_{pico} (kPa)	τ_{res} (kPa)	t_f	v (mm/min)	Respaldo teórico
1	3	50	59,5	34,8	24,0h	0,0035	ASTM
2	4	51	53,4	27,5	211,0min	0,0237	Gibson & Henkel (1954)
3	5	51	45,9	27,2	105,5min	0,0473	<i>Ídem</i> (U=95%)
4	26	51	73,0	33,6	0,5min	10,0000	Skempton
5	5	51	53,5	30,6	5,0min	1,0000	

Al respecto se menciona lo siguiente:

- El t_f de 24 horas es el más conservador y el que se quiere evitar, que implica duraciones de más de 4 días por ciclo ensayo (20 días para ensayos de 5 ciclos). Se utilizó como referencia ya que se aseguraba condición drenada.³⁴ Esta velocidad es reportada por Skempton (1985) como la normalmente utilizada en laboratorio.
- Se desestimó utilizar la velocidad de 10mm/min puesto que no se llegó al estado residual en 26 ciclos de deformación. Se considera que es posible que el d_r dependa de la velocidad de falla o que se estaba en una condición parcialmente drenada. Además de lo indicado en 4.1.2, luego de tantos ciclos la pérdida de material se vuelve excesiva y se perciben deformaciones en dirección ortogonal al movimiento debido a que se desalinea la caja de corte.
- Se pudo haber utilizado la velocidad de 1mm/min ya que presenta el comportamiento de referencia esperado para un ensayo drenado. Finalmente se

³⁴ No se pudo dejar llegar al estado residual por limitaciones temporales, por lo que se esperan valores más bajos de τ residual.

decidió no utilizarla porque el respaldo del estudio de Gibson & Henkel genera mayor confianza.

- Se decidió que utilizar el criterio de Gibson & Henkel (ecuación 6) para $U=97,5\%$ sería lo más adecuado. El valor de esfuerzo cortante residual es de los más bajos registrados y el comportamiento es suficientemente similar al del gráfico de referencia ($t_r=24h$). De este modo se ahorran 68 horas por ciclo de ensayo con respecto al ensayo referencia.
- No se utilizó el de 95% para no correr el riesgo de encontrarse en la condición de ensayo parcialmente drenado.
- Para el suelo 2 no se realizó este análisis de velocidades pero se toman las anteriores conclusiones como válidas.

4.1.2 Manejo de la memoria (máquina *Shearmatic*)³⁵

La máquina *Shearmatic*, puede almacenar 5000 datos, 1000 de cada una de las variables que mide. Se puede elegir un paso grande, *i.e.* que el equipo tome datos cada 8 minutos por ejemplo, pero cuánto más grande es el paso de toma de datos se pierde más información, es decir, más información se deja de registrar.

El paso más bajo (o más rápido) de la máquina es de 0,1min. En los ensayos de alta velocidad (10mm/min) se pudo tomar tan solo 10 datos por movimiento por lo que se consideró inviable realizar ensayos con velocidades tan rápidas, *i.e.* utilizando el registro de datos automático, y no se consideró hacer la toma manualmente.

Para las demás velocidades consideradas se ajustó el paso de toma de datos y se obtuvo datos que se consideraron suficientes.

4.1.3 Cantidad de ciclos de carga (*Shearmatic*)³⁶

Sin conocimiento de ensayos previos no se puede conocer la deformación necesaria para llegar el estado residual de la muestra (d_r), es decir que no se sabe a cuántos ciclos de deformación se deberá someter la muestra para que la gráfica de esfuerzo-deformación se estabilice y se pueda registrar el dato de resistencia residual.

³⁵ En la máquina *Torshear* no se tuvo este problema ya que el sistema de adquisición de datos es mucho más capaz.

³⁶ En la máquina *Torshear* no se tuvo este problema ya que se puede aplicar deformación continua y hasta 999,9mm

Los ensayos previos realizados para 50 kPa de esfuerzo normal efectivo (aproximadamente) indicaron que en el 4 ciclo de carga se lograba la estabilidad (ver Figura 44). Para efectos de corroborar esto en cada ensayo, se tomó como mínimo utilizar 5 ciclos de deformación; cuando las circunstancias fueran oportunas, (por ejemplo en fines de semana: que no se trabajó pero no atrasaba dejar la máquina haciendo algunos ciclos más) se utilizaría la mayor cantidad de ciclos posible.

4.1.4 Remoldeo del suelo al utilizar la máquina *Torshear*

La norma ASTM D6467, indica que se debe moler el suelo y pasarlo por la malla #200, para utilizar una parte representativa de los finos en el suelo en el ensayo. Con tal de acortar el tiempo de los ensayos se evaluó el omitir este paso del procedimiento.

Se desestimó la idea al corroborar que se necesitaría más tiempo (más deformación) para alcanzar el estado residual. Se puede ver en la Figura 47, como cuándo no se molió la muestra, a una deformación de 100mm no se había llegado a τ_{res} y cuando si se molió, a una deformación de 100mm sí se había obtenido τ_{res} desde antes.

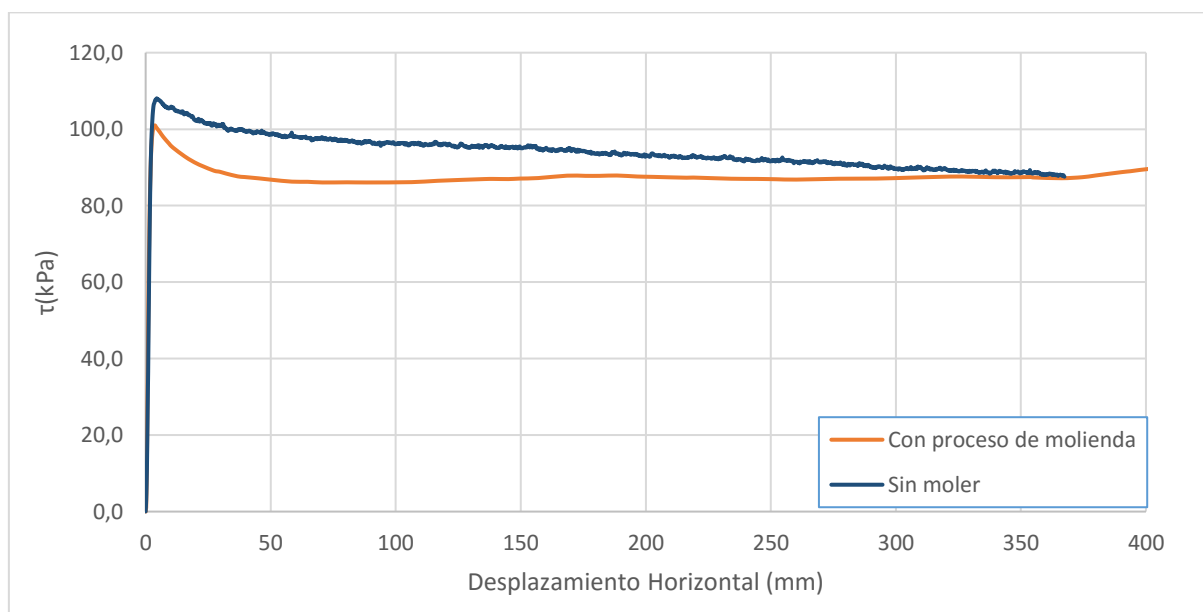


Figura 47. Ensayos para la máquina *Torshear* con y sin procedimiento de molienda (Esfuerzo Normal 199 kPa)

Depende el d_r del nivel de remoldeo de las muestras, del tamaño de las partículas y si están aglomeradas o no. Además, por el hecho de que una partícula particularmente grande y fuerte podría dañar las pastillas porosas, se decidió mejor no proceder en virtud del bienestar del equipo.

4.1.5 Implementación de una herramienta para obtener muestras inalteradas y ensayarlas en la máquina *Torshear*

Con tal de ahorrar tiempo de preparación de las muestras y comparar los resultados de los ensayos en muestras remoldeadas e inalteradas se creó una herramienta para obtener muestras inalteradas. En el Apéndice 2, se detalla dicha herramienta y cómo se ha de utilizar.

Fue sumamente difícil obtener la muestra anular inalterada, se destruyeron varios cilindros de muestra extraída del sitio de muestreo, no se pudo sino cuando la muestra estaba considerablemente húmeda, obtener dicha muestra anular.

En la Figura 48, se muestra el resultado del único ensayo que logró realizar con una muestra inalterada del suelo 1, con 50 kPa de esfuerzo normal efectivo.

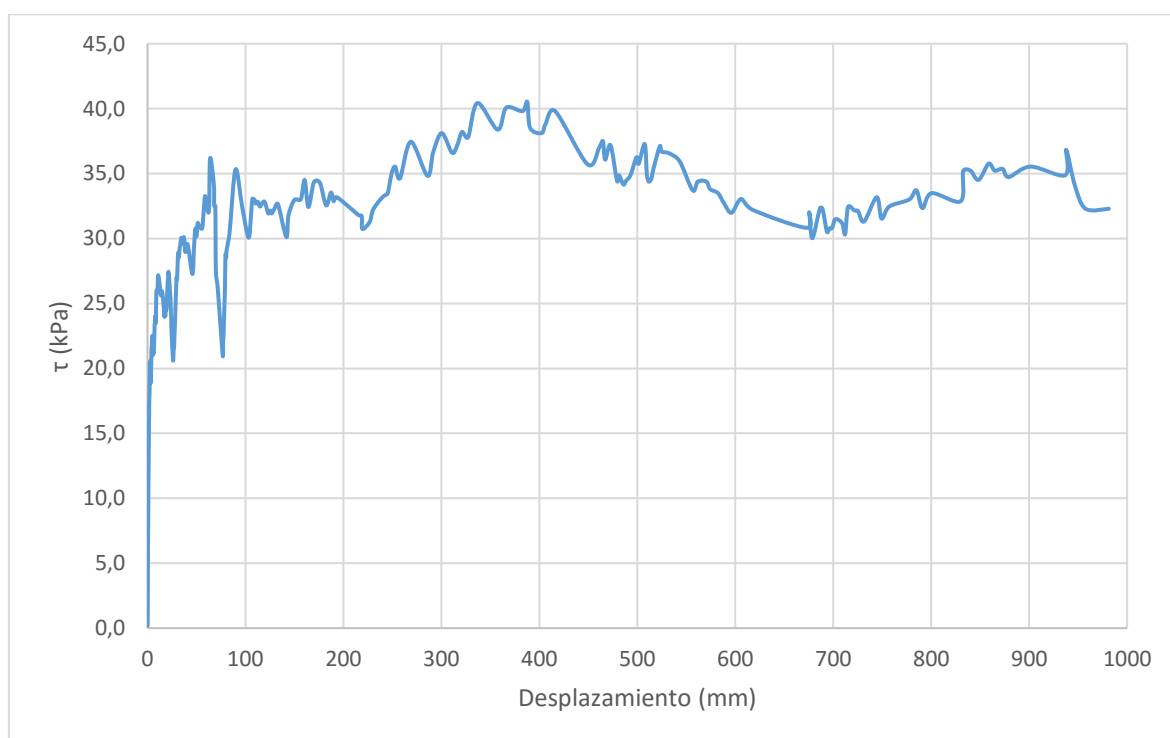


Figura 48. Ensayo de muestra inalterada en la máquina Torshear

Como se puede ver, no se puede concluir exactamente cuál es la resistencia residual del suelo sino sólo reportar un rango. Las partículas, aglomeradas, al deshacerse generan picos y caídas de resistencia que evitan que el esfuerzo de corte se pueda estabilizar. No se sabe si eventualmente se estabilizaría, aun que es lo esperable.

Al igual que en la sección anterior se hace referencia a que depende el d_r del nivel de remoldeo de las muestras, del tamaño de las partículas y si están aglomeradas o no. Además, por el hecho de que una partícula particularmente grande y fuerte podría dañar las pastillas porosas, se consideró mejor no seguir con este tipo ensayos en virtud del bienestar del equipo.

La dificultad de obtener la muestra cómo se necesita y el poco éxito del ensayo hacen evidente que la herramienta fabricada no funciona para lo que se quería (obtener la resistencia residual de una muestra inalterada en el aparato de Bromhead, *Torshear*). Pero queda la herramienta en el laboratorio y se le puede dar usos alternativos como ensayar en la máquina *Torshear* muestras de densidades distintas ya que con el molde se facilitaría el procedimiento de obtener una muestra anular de un cilindro de ensayos Proctor, *i.e.* un cilindro con densidad y humedad conocidas y controladas. Finalmente, se le podría dar el uso para el que estaba originalmente destinada la herramienta pero el suelo debe cumplir con las condiciones que permitan el uso de la herramienta y del equipo en muestra inalterada.

4.1.6 Ensayos con distintas densidades (*Torshear*)

Al inicio de esta investigación se consideraba necesario que las densidades de las muestras falladas en las diferentes máquinas fueran similares, o iguales idealmente, para poder comparar los resultados finales obtenidos a partir de los dos equipos.

Las densidades de las muestras ensayadas en la máquina *Shearmatic* fueron las densidades encontradas *in situ* (inalteradas) de modo que era necesario tratar de conseguir esta misma densidad en los especímenes por ensayar en la máquina *Torshear*. Con tal de lograr esto se consideraron dos procedimientos:

1. Cambiar la humedad de la pasta utilizada para fabricar la muestra hasta que se obtuvieran densidades adecuadas.
2. Hacer algunos ensayos Proctor hasta encontrar la densidad y humedad adecuadas y luego extraer las muestras anulares con la herramienta fabricada (ver Apéndice 2 para descripción de esta herramienta).

Más adelante, se decidió que tal vez no sería necesario y que el procedimiento elegido de fabricación de los especímenes era poco práctico y poco efectivo. Con el respaldo de Townsend & Gilbert (1976), que indican que la resistencia residual es independiente de la densidad de la muestra fallada, se decidió cambiar esta parte del procedimiento; no sin antes corroborar esto con algunas pruebas.

Se muestran en el Cuadro 16, la humedad de fabricación de la muestra (w_0), la densidad seca (ρ_d), el valor de esfuerzo de corte residual y el esfuerzo normal utilizado en el ensayo, para algunos ensayos en el suelo 1.

Cuadro 16. Resultados de ensayos de análisis de densidad en las muestras ensayadas en la máquina *Torshear*

σ' (kPa)	τ_{res} (kPa)	ρ_d (g/cm ³)	w_o
49	25	1,389	37%
49	22,3	0,975	67%
199	87,6	1,135	51%
199	86,8	0,923	71%

Se considera que los valores de τ son suficientemente parecidos, y por lo tanto aceptable el cambio de procedimiento propuesto. El procedimiento final sería fabricar las muestras del suelo con una humedad igual al límite líquido (o cercano), sin importar la densidad obtenida.

Esto, además de facilitar el proceso y recortar tiempo en el laboratorio, según la norma ASTM D6467, minimiza las burbujas de aire atrapado en la muestra a la hora de la fabricación o colocación en el dispositivo de falla.

4.1.7 Esfuerzos normales

Inicialmente se tomó la decisión de fallar las muestras de suelo a 50, 100 y 200 kPa de esfuerzo normal. Se desestimó realizar ensayos con 25 kPa por que se consideró que las condiciones de frontera se volverían las que controlasen los datos medidos por las máquinas y no el suelo como tal. Posteriormente se tomó la decisión de utilizar 300 y 400 kPa con tal de obtener las envolventes "completas" pero esto sólo fue posible en la máquina *Torshear* ya que no existen las condiciones para hacerlo en la otra máquina, *i.e.* pesas suficientes que quepan en el gancho de carga y generen la presión requerida para cumplir con 300 kPa.

4.1.8 Consolidación

Se puede considerar como totalmente consolidado (para efectos de ensayos de falla) el suelo en una muestra cuando entra en consolidación secundaria. Por lo que se utilizó este criterio en vez de esperar 24 horas para conseguir la consolidación.³⁷ Esto en ambos equipos y con el objetivo de reducir el tiempo de los ensayos. En el ensayo de la máquina *Torshear* (altura de la muestra de 5mm) se alcanzó por lo general la consolidación secundaria en pocos minutos (alrededor de 5) por lo que, por ensayo, se han ahorrado casi

³⁷ Como indica la norma ASTM D2435 en su procedimiento más recomendable.

24 horas). En el caso de la máquina *Shearmatic* (altura de la muestra de 20mm) se alcanzó en algunas horas (por lo general 6) por lo que, por ensayo, se ahorraron 18 horas.

4.1.9 Cajas de corte (*Shearmatic*)

En el LanammeUCR hay tres cajas de corte disponibles para la máquina *Shearmatic*:

1. Circular ($r=31,64\text{mm}$; $h=2\text{cm}$) de $31,45\text{cm}^2$
2. Cuadrada ($6\text{mm} \times 6\text{mm}$; $h=2\text{cm}$) de $36,24\text{cm}^2$
3. Cuadrada ($10\text{mm} \times 10\text{mm}$; $h=2\text{cm}$) de 100cm^2

La más grande no se puede utilizar ya que las pesas disponibles no son suficientes para aplicar esfuerzos requeridos en un área tan grande.

Para el suelo 1 se completaron ensayos de 50, 100 y 200 kPa para la caja circular y la caja cuadrada más pequeña; para el suelo 2 los ensayos se realizaron solamente con la caja cuadrada más pequeña.³⁸

4.2 Procedimiento definitivo recomendado y utilizado

Se detalla a continuación el procedimiento definitivo aplicado en el laboratorio para los ensayos no preliminares realizados para obtener la resistencia residual. Se recomienda seguir la metodología aquí planteada y atender a las anotaciones al utilizar estos equipos para obtener la resistencia residual drenada de un suelo.

4.2.1.1 *Shearmatic*

Los ensayos de corte directo "reversivo" para este proyecto fueron realizados con muestra inalterada en el equipo *Shearmatic* del LanammeUCR que se encuentra en el Laboratorio de Geotecnia. Este dispositivo es el típico de corte directo, pero tiene la capacidad de regresar al punto de partida a una velocidad determinada por el usuario, en reversa igual que hacia adelante. Se utilizó como referencia principal la norma ASTM D3080 y se consultó lo descrito por Ugarte (2014), y manuales del fabricante Wykeham-Farrance. La norma ASTM no es suficiente para definir cómo se debe realizar el ensayo de corte directo con más de un movimiento; de ahí viene parte de la importancia de generar esta metodología. El

³⁸ Esto porque los resultados obtenidos con la caja cuadrada resultan más confiables y de comportamiento más estable, se discute al respecto de esto más adelante.

procedimiento utilizado y recomendado al buscar la resistencia residual de un suelo fino utilizando este equipo, es como sigue:³⁹

4.2.1.1.1 Preparación de la muestra inalterada:

Una vez retirado un bloque, del suelo que se quiere ensayar, del sitio, se procede a obtener una muestra del tamaño y forma requerida para el ensayo. El día antes del inicio del ensayo se prepara la muestra. Se utiliza el molde anular o cuadrado y un cuchillo para lograrlo; se pesa el molde antes de seguir.

- Utilizando el molde, previamente engrasado con alguna grasa para evitar la adherencia (vaselina) por dentro, de guía, se corta con el cuchillo para obtener la forma adecuada.



Figura 49. Preparación de la muestra de suelo inalterada para la prueba en el equipo Shearmatic

- Se introduce el molde para proteger la muestra y finalmente se desprende con ayuda del cuchillo la parte inferior.

³⁹ El procedimiento descrito es una guía que complementa y en algunos pasos sustituye lo indicado por la norma ASTM D3080.

- Luego se aplanan ambos lados y se rellenan los pequeños huecos con material desprendido utilizando la parte sin filo y plana del cuchillo. Se pesa la muestra con el molde.
- Se traslada la muestra a la caja de corte.
- Se deja saturando la muestra en la caja de corte por 24h.

4.2.1.1.2 Consolidación

- Se realiza la consolidación como indica ASTM D2435, hasta que se alcanza la consolidación secundaria.
- Se revisa que la curva de deformación-tiempo se comporta como se esperaba.
- A partir de los datos del ensayo de consolidación unidimensional, realizado previamente, se calcula el tiempo de falla utilizando la ecuación (6), con $c_b=c_v$ de un esfuerzo mayor al de preconsolidación y cercano al esfuerzo normal de falla, $U_c=97,5\%$ y $H=1\text{cm}$.
- Luego, suponiendo un desplazamiento requerido para la falla por corte de 5mm (recomendado por ASTM), se calcula la velocidad de falla:

$$v = \frac{5}{t_f} \quad (7)$$

- En el caso de los suelos ensayados en ese proyecto las velocidades de falla son:

Cuadro 17. Cálculo de velocidad de falla para los suelos ensayados

Suelo	c_v (mm ² /s) (para 178 kPa)	t_f (Gibson & Henkel, 1954)	t_f (min)	v (mm/min)
1 y 2	0,158	$\frac{1^2}{2 * 0,00158 * (1 - 0,975)}$	211	0,0237

4.2.1.1.3 Falla

- Quitar los tornillos que fijan de la caja de corte es muy importante, antes de iniciar la falla.
- Se indica al equipo la cantidad de ciclos⁴⁰ y para cada ciclo (adelante, atrás) una deformación objetivo de 10mm y la velocidad calculada.

⁴⁰ La mayor cantidad posible que permita el tiempo destinado, como mínimo 5. En este caso se asignaron 5 pero cuando el quinto ciclo quedaba en fin de semana se dejaban correr 2 o 3 ciclos más, los que fuera posible. 5 son los ciclos que por lo general indica la literatura que se deben usar.

- Se indica además para todos los ciclos un paso lineal de registro de datos con un paso que permita almacenar todos los ciclos en 1000 pasos.
- Se inicia el ensayo.
- Se deja terminar el ensayo.
- Se recupera el archivo de texto con las lecturas del ensayo.

4.2.1.1.4 Desmonte

- Se apaga el equipo.
- Se saca la caja de corte.
- Se saca la placa superior moviéndola en el sentido de la falla para lograr ver la superficie de falla.
- Se registra de forma fotográfica la superficie de falla como en la Figura 50.



Figura 50. Superficie de falla de un ensayo en el equipo Shearmatic

- Se recupera el material
- Se determina la humedad del material como lo indica ASTM D2216.

4.2.1.1.5 Cálculos

- Se calcula, para cada lectura, el esfuerzo como la fuerza medida entre el área.
- Se identifica el menor valor de esfuerzo de corte registrado después del pico de la gráfica esfuerzo-deformación (esta es la resistencia residual para esfuerzo normal).

4.2.1.1.6 Observaciones finales

- Se realiza este procedimiento para 50, 100 y 200 kPa.

- Se interpretó como estable el valor de resistencia residual si el valor medido hacia adelante y hacia atrás es igual, en caso de no ser así se anota la observación.
- Se calcularon los esfuerzos tanto para el área inicial del ensayo como para la corrección:

Bardet (1997), propone una corrección de área para solventar el hecho de que el área cambia para cada deformación de la caja de corte directo (Figura 51).

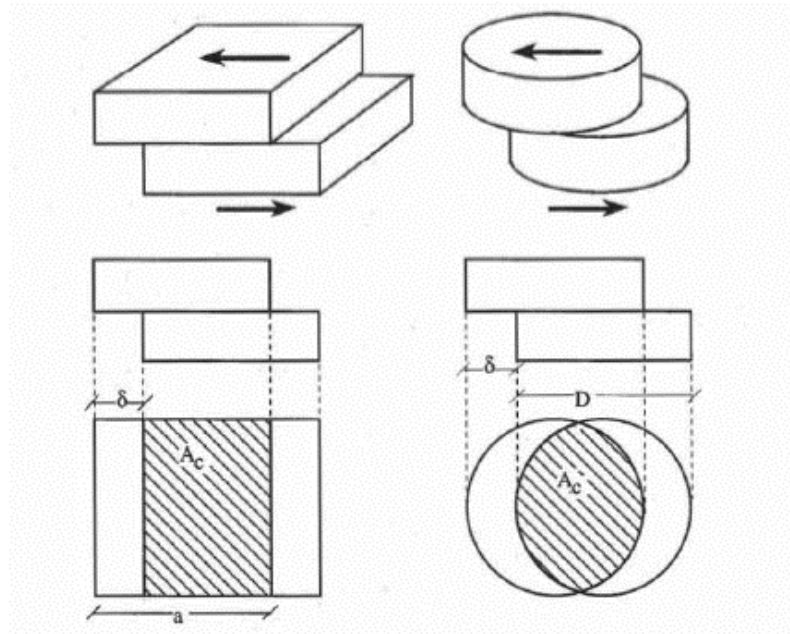


Figura 51. Variación del área en el ensayo de corte directo Fuente: Bardet (1997)

La corrección corrige el área para el cálculo de los esfuerzos y es la siguiente:

Para el caso de la caja cuadrada

$$A_{\text{corregida}} = a(a - \delta) \quad (8)$$

Para el caso de la caja circular:

$$A_{\text{corregida}} = \frac{D^2}{2} \left(\theta - \frac{\delta}{D} \sin \theta \right) \quad (9)$$

Donde

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{\delta}{D} \right) \text{ en radianes} \quad (10)$$

Se puede esperar que al corregir los valores de esfuerzo para deformaciones más grandes crezcan y para pequeñas deformaciones sean más pequeños.

- La forma en la que se reporte la envolvente de falla depende del uso que se dé al resultado del ensayo, de no tener un uso específico sino el de presentar la resistencia residual se recomienda hacerlo de todas las maneras posibles.
- En este documento se reportan los resultados indicados en ASTM D3080 y además los resultados para las correcciones de área.
- Siguiendo esta metodología se puede realizar una falla por semana. No es posible traslapar partes del procedimiento de una falla con la siguiente puesto que la caja de corte se necesita desde la saturación hasta el desmonte. Para realizar la misma cantidad de ciclos siguiendo las recomendaciones de la normativa ASTM se necesitarían 22 días por falla (para este tipo de suelos).

4.2.1.2 *Torshear*

Los ensayos de corte torsional para este proyecto fueron realizados con muestra remoldeada y/o alterada en el equipo *Torshear* del LanammeUCR que se encuentra en el Laboratorio de Geotecnia. Este dispositivo es el descrito por Bromhead (1979) con las pastillas porosas modificadas descritas por Meehan *et al.* (2007). Se utilizó como referencia principal la norma ASTM D6467⁴¹ y se consultó lo descrito por Ugarte (2014)⁴², la norma Británica⁴³ BS 1377:Parte 7: 1990 y manuales del fabricante Wykeham-Farrance. El procedimiento utilizado y recomendado al buscar la resistencia residual de un suelo fino utilizando este equipo, es como sigue:⁴⁴

4.2.1.2.1 Preparación de la muestra:

- Recuperado del sitio suficiente material para realizar los ensayos (al menos 50g por falla) se deja secar al aire y se tritura. Luego se ubica en la cámara de suelos del laboratorio para que se siga secando.
- El día antes de la consolidación se debe triturar el material con un mortero (como el utensilio de cocina) y recuperar el material pasando por la malla #200, se desecha lo retenido, se recupera lo que logra pasar, se debe triturar y tamizar lo suficiente para que lo recuperado sea representativo de la fracción fina del suelo. El

⁴¹ Finalmente esta norma ASTM se considera guía suficiente; sin embargo existen decisiones que la norma deja libres, que es conveniente definir y no cambiar, durante los ensayos de un mismo grupo de resultados que se quiere comparar, de ahí viene parte de la importancia de plantear esta metodología.

⁴² Ugarte (2014) provee una guía de uso del programa de adquisición de datos Datacomm y del equipo *Torshear*, y una traducción al español de la norma ASTM D6467.

⁴³ British Standard Methods of test for Soils for engineering purposes

⁴⁴ El procedimiento descrito es una guía que complementa más no sustituye lo indicado y aportado por la norma ASTM D6467.

recuperado debe ser aproximadamente 40g (depende de la densidad y la capacidad del suelo para manejar el agua).

- Se agrega agua destilada al suelo con el objetivo de llevarlo aproximadamente a su límite líquido (previamente conocido)⁴⁵ y se homogeniza la muestra.
- Se deja reposar el material al menos 16h, en una bolsa preferiblemente, de modo que no pierda humedad y no se contamine.
- El día de la consolidación se debe mezclar la pasta preparada el día anterior para que, de nuevo, sea homogénea. Se pesa el contenedor de la muestra y la placa superior del contenedor. Se coloca la muestra en la cavidad anular con una espátula y se remueve lo sobrante y aplana la superficie con una espátula ancha pequeña y se pesa el contenedor con la muestra. (Figura 52 y Figura 53)



Figura 52. Preparación de la muestra para el equipo Torshear 1

⁴⁵ El suelo no está totalmente seco, se debe considerar la humedad que aún tiene

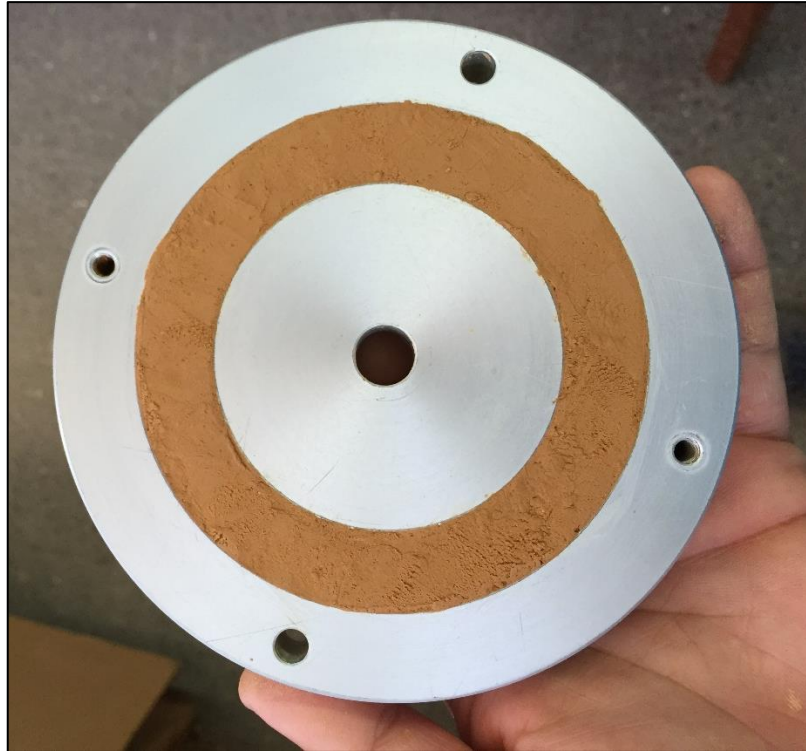


Figura 53. Muestra lista para ensayo en el equipo Torshear

- Para el montaje de la muestra se recomienda consultar lo indicado por Ugarte (2014).

4.2.1.2.2 Preconsolidación

- Una vez verificado y colocado adecuadamente el brazo de palanca, como indica Ugarte (2014), utilizando el programa Datacomm se procede a preconsolidar la muestra:
 - Se inicia la adquisición de datos⁴⁶.
 - Se coloca el peso de preconsolidación (en este caso se utilizaron 35g, 350g en la muestra; más el peso de la placa superior) de forma coordinada con el inicio de las lecturas.
 - Se deja estabilizar la lectura de deformación vertical.

4.2.1.2.3 Consolidación

- Se inicia la adquisición de datos.

⁴⁶ Para definir el paso de toma de lecturas se utilizaron los parámetros $A=0,05$ y $B=1,7$ en procesos de preconsolidación y consolidación.

- Se coloca el peso de consolidación para lograr el esfuerzo normal de corte de forma coordinada con el inicio de las lecturas.⁴⁷
- Cuando se alcanza la consolidación secundaria se puede detener la parte de consolidación, exportar el archivo de texto generado por Datacomm y determinar la velocidad de falla.
 - Suponiendo un desplazamiento requerido para la falla por corte de 5mm y determinando el tiempo para conseguir el 90% de la consolidación, en segundos, por el método de Taylor (t_{90}) como lo indica la norma ASTM D2435 se estima la velocidad de la falla como:

$$v = \frac{5}{11,6t_{90}} \quad (11)$$

4.2.1.2.4 Precorte (superficie de falla)

- Se quita el peso de consolidación.
- Se inicia la adquisición de datos⁴⁸.
- Se indica al equipo una deformación límite de 360° y una velocidad de 25°/min.
- Se inicia un ensayo de corte de forma coordinada con el inicio de las lecturas.
- Se deja llegar a la deformación límite.
- Se deja estabilizar la lectura de deformación vertical.

4.2.1.2.5 Falla

- Se coloca de nuevo el peso de consolidación.
- Se inicia la adquisición de datos.
- Se indica al equipo una deformación límite de 999,9° y la velocidad calculada.
- Se inicia un ensayo de corte de forma coordinada con el inicio de las lecturas.
- Se deja estabilizar las lecturas de esfuerzo de corte⁴⁹.
- Se detiene el ensayo.
- Se recupera el archivo de texto con las lecturas del ensayo.

4.2.1.2.6 Desmonte

- Se apaga el equipo.

⁴⁷ Se realiza en un solo paso, la norma ASTM D2435 permite hacerlo parcialmente pero se encontró esto más rápido.

⁴⁸ Se utilizaron los parámetros $A=0,2$ /velocidad (mm/min) y $B=1$ en procesos de falla y precorte. Esto implica que se toma una lectura de datos cada 0,2mm de deformación horizontal.

⁴⁹ Es difícil saber cuándo se estabilizan las lecturas de fuerza torsional, visualmente a partir de la gráfica; es mejor determinarlo sumando las fuerzas y comparándolas con la suma de las últimas lecturas

- Se desatornillan los tornillos largos de la caja de corte.
- Se saca la caja de corte.
- Se gira la placa superior en el sentido de la falla antes de levantarla⁵⁰.
- Se registra de forma fotográfica el estado final de la muestra, la superficie de falla como en la Figura 54.
- Se recupera el material dentro de la cavidad anular⁵¹.
- Se determina la humedad del material como lo indica ASTM D2216.



Figura 54. Muestra después del ensayo en el equipo Torshear

4.2.1.2.7 Cálculos

- Se calcula, para cada lectura, la deformación (velocidad indicada al equipo multiplicada por el tiempo transcurrido en el momento de la lectura) y el esfuerzo de corte como lo indica la norma ASTM D6467⁵².

⁵⁰ Esto porque al levantar la placa superior sin girar se genera un vacío que desacomoda el suelo y no permite distinguir la superficie de falla que se generó.

⁵¹ La norma ASTM D6467 indica que se debe recuperar el material extruido, en este caso se recuperó el de adentro de la cavidad anular puesto que se considera es el más representativo de la humedad en la superficie de falla; además, al ser el ensayo sumergido se obtienen valores de humedad extremadamente altos al seguir la indicación de la norma y estos no se consideraron correctos.

⁵² Existen varias formas de cálculo dependiendo de la distribución de esfuerzos supuesta (Bishop *et al.*, 1971), no se evaluó ninguna otra en este proyecto.

- Se identifica el menor valor de esfuerzo de corte registrado después del pico de la gráfica esfuerzo-deformación (esta es la resistencia residual para esfuerzo normal).

4.2.1.2.8 Observaciones finales

- Se realiza este procedimiento para 50, 100, 200, 300, 400 kPa, con tal de identificar, si existe una curvatura en la envolvente de falla.
- La forma en la que se reporte la envolvente de falla depende del uso que se dé al resultado del ensayo, de no tener un uso específico sino el de presentar la resistencia residual se recomienda hacerlo de todas las maneras posibles.
- Se reporta lo indicado en ASTM D6467 menos la saturación final, la pérdida de material durante el ensayo cambia la masa por lo que se calculan valores erróneos, y la velocidad real de corte, ya que lo medido y entregado en el archivo de texto de salida del programa Datacomm no es suficiente para calcularlo.
- La superficie de falla está siempre donde lo indican Meehan *et al.* (2007).
- No se utilizan medidas de reducción de fricción con las paredes.
- Siguiendo esta metodología es posible fallar la muestra para cada esfuerzo normal en tres días, se pueden traslapar la preparación de la siguiente muestra con el desmonte de la anterior de forma tal que se podrían realizar tres fallas por semana (tomando como trabajables de lunes a viernes).

4.2.2 Ensayos adicionales

Independientemente del equipo que se decida utilizar para determinar la resistencia residual es importante que adicionalmente se lleven a cabo ensayos de caracterización e identificación del suelo y de consolidación; como se hizo en este trabajo. Estos resultados son sumamente importantes a la hora de interpretar y comprender lo obtenido de los ensayos de resistencia residual propiamente.

4.2.3 Totalidad de ensayos realizados

En el siguiente cuadro se indica la cantidad de ensayos, el tipo de equipo, la caja de corte y los esfuerzos normales aplicados para cada ensayo

Cuadro 18. Cantidad de ensayos de corte residual realizados

Esfuerzo Normal (kPa)		50	100	200	300	400	Totales	
Suelo 1	Shearmatic	Cuadrada	1	1	1	0	0	3
		Circular	5	1	1	0	0	7
	Torshear		5*	4	4	2	2	17
Suelo 2	Shearmatic	Cuadrada	1	1	1	0	0	3
		Circular	0	0	0	0	0	0
	Torshear		1	1	1	1	1	5
Totales		13	8	8	3	3	35	

*Uno de estos es la prueba con muestra inalterada

5 Resultados

5.1 Suelo 1

5.1.1 Corte directo residual⁵³

En la Figura 55 se muestra la superficie de falla para el ensayo con 51 kPa (caja circular) y 196 kPa (caja cuadrada) de presión normal. Típicamente para este tipo de ensayos se observó al final de las fallas una superficie de falla puntual y localizada en la división de la caja de corte, plana y con pocas y muy pequeñas irregularidades.



Figura 55. Superficie de falla típica al final de los ensayos del suelo 1 (Shearmatic)

⁵³ Para comprender por qué se forman los “valles” de esfuerzo en los gráficos de esfuerzo-deformación, presentados en esta sección, refiérase a l Apéndice 1.

A continuación se presentan los resultados obtenidos gráficamente en los ensayos realizados en la máquina *Shearmatic* con muestra del suelo 1, para cada caja de corte utilizada. En orden ascendente de esfuerzo normal se presentan los gráficos de resistencia-deformación horizontal, deformación vertical-deformación horizontal acumulada y resistencia-deformación con esfuerzos corregidos⁵⁴ de cada ensayo. Se indica en los gráficos de deformación horizontal acumulada el fin de cada ciclo o retorno al origen.

5.1.1.1 Caja cuadrada

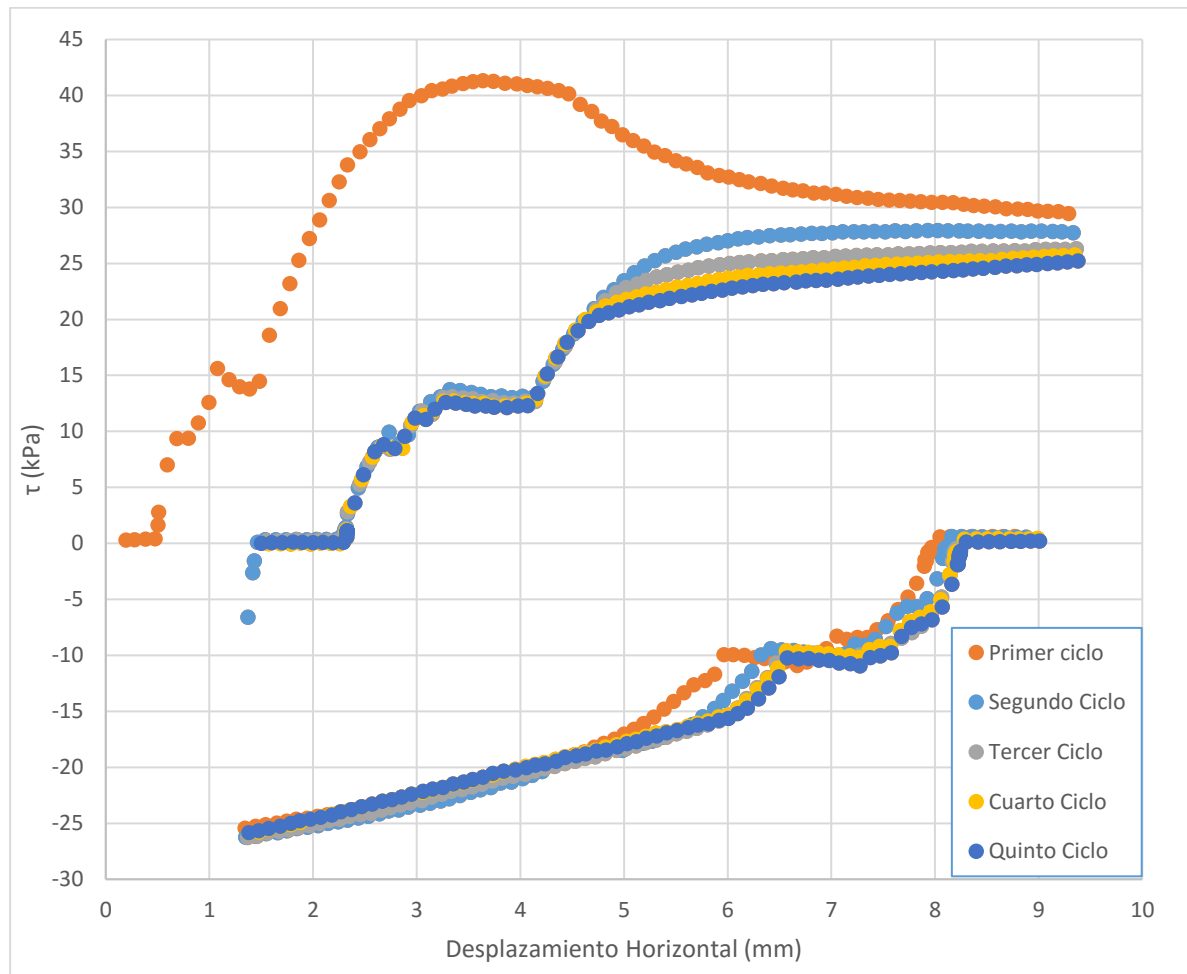


Figura 56. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 49 kPa)

⁵⁴ Se utiliza en el título de estos gráficos el esfuerzo normal inicial como referencia, posteriormente se reporta el valor corregido de esfuerzo normal para cada esfuerzo de corte reportado.

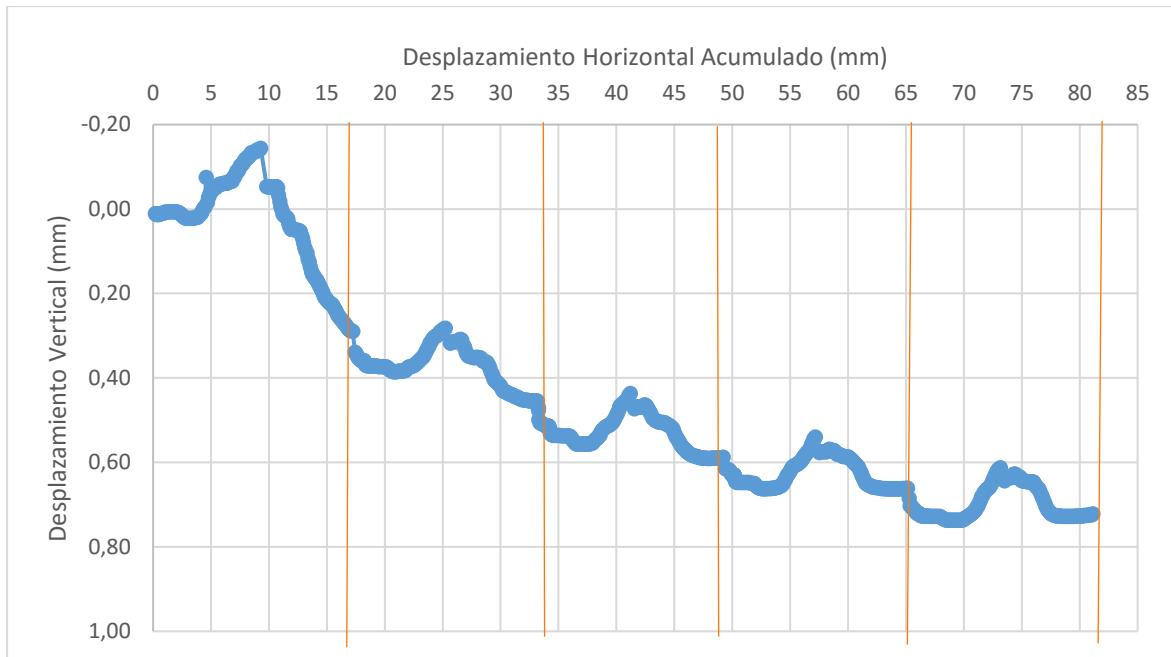


Figura 57. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 49 kPa)

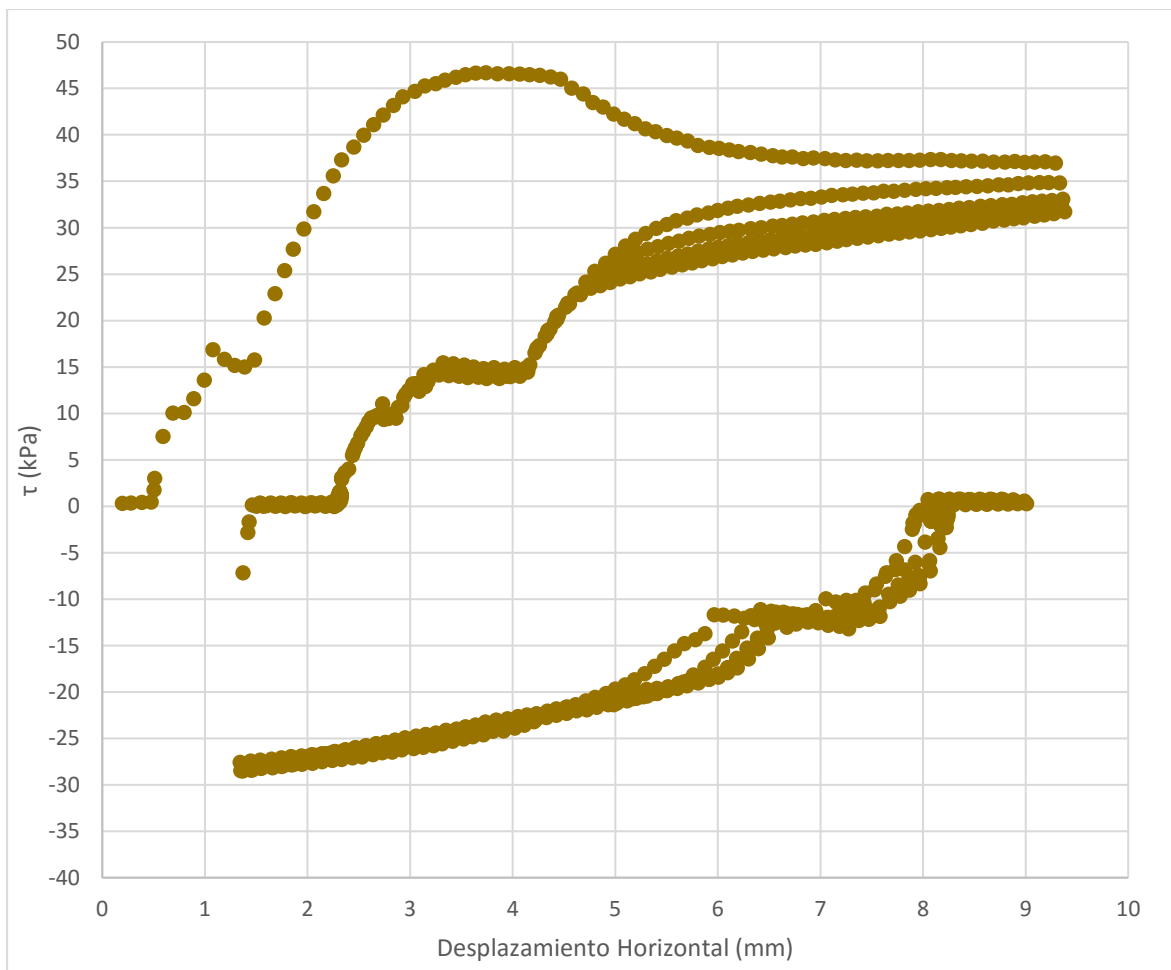


Figura 58. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 49 kPa)

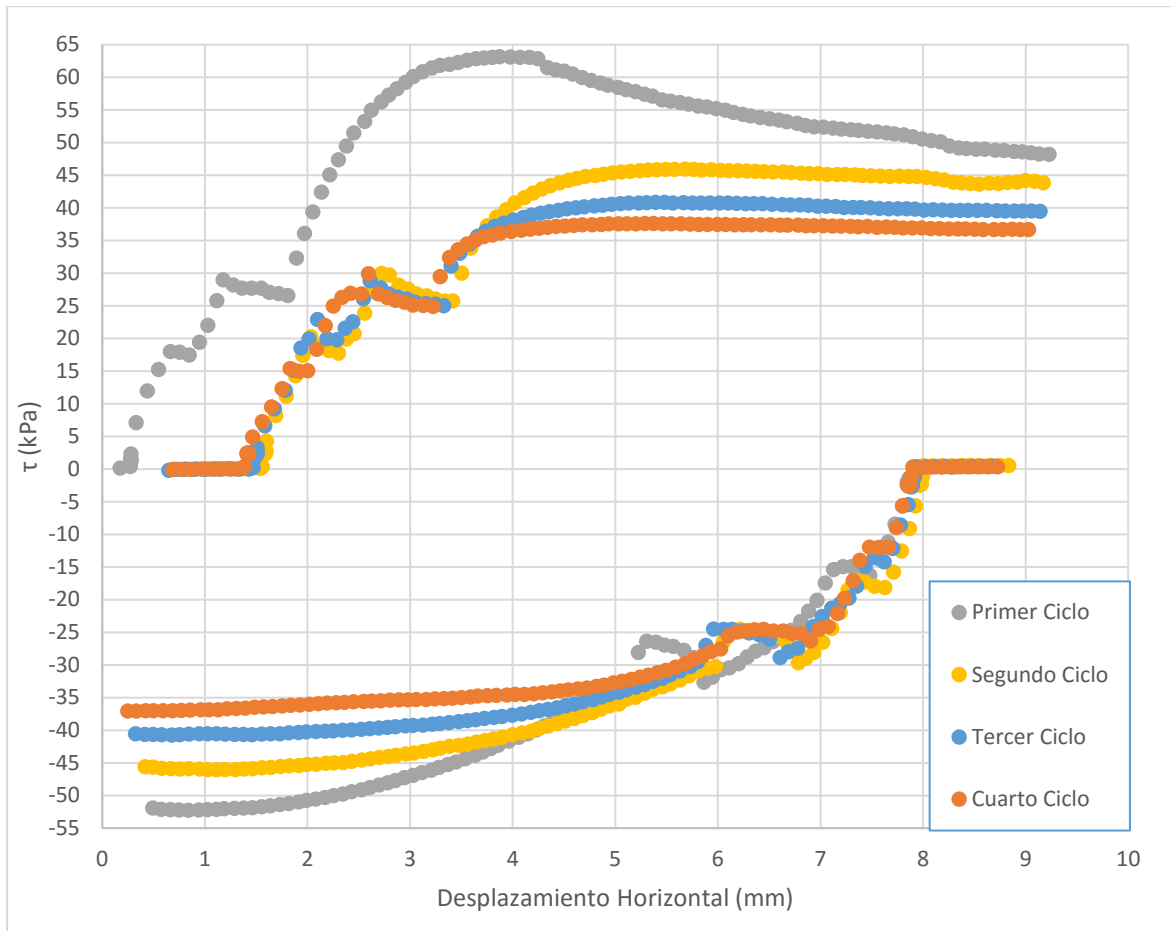


Figura 59. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 99 kPa)

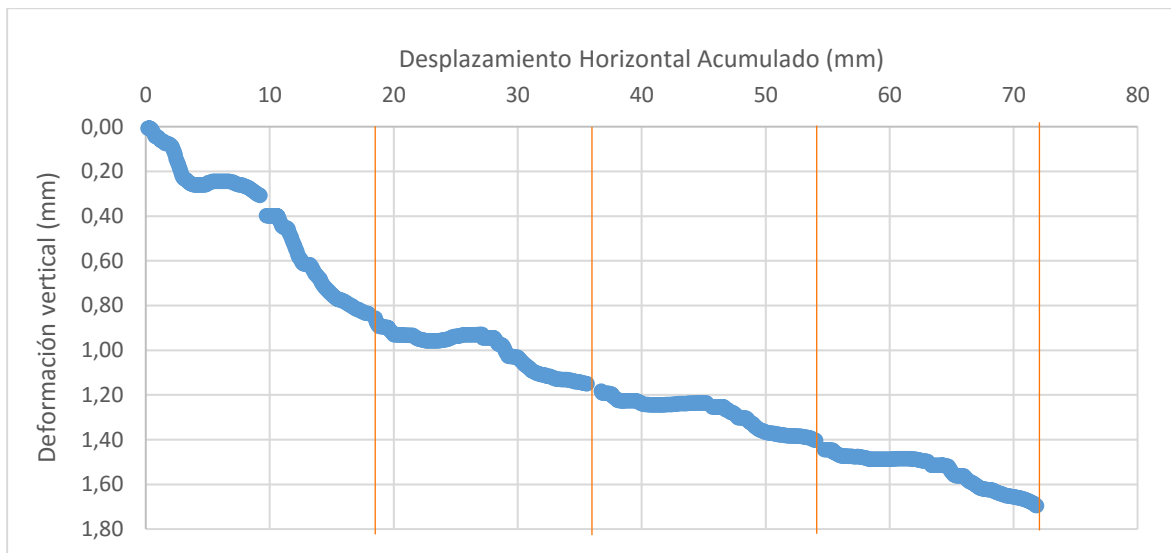


Figura 60. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 99 kPa)

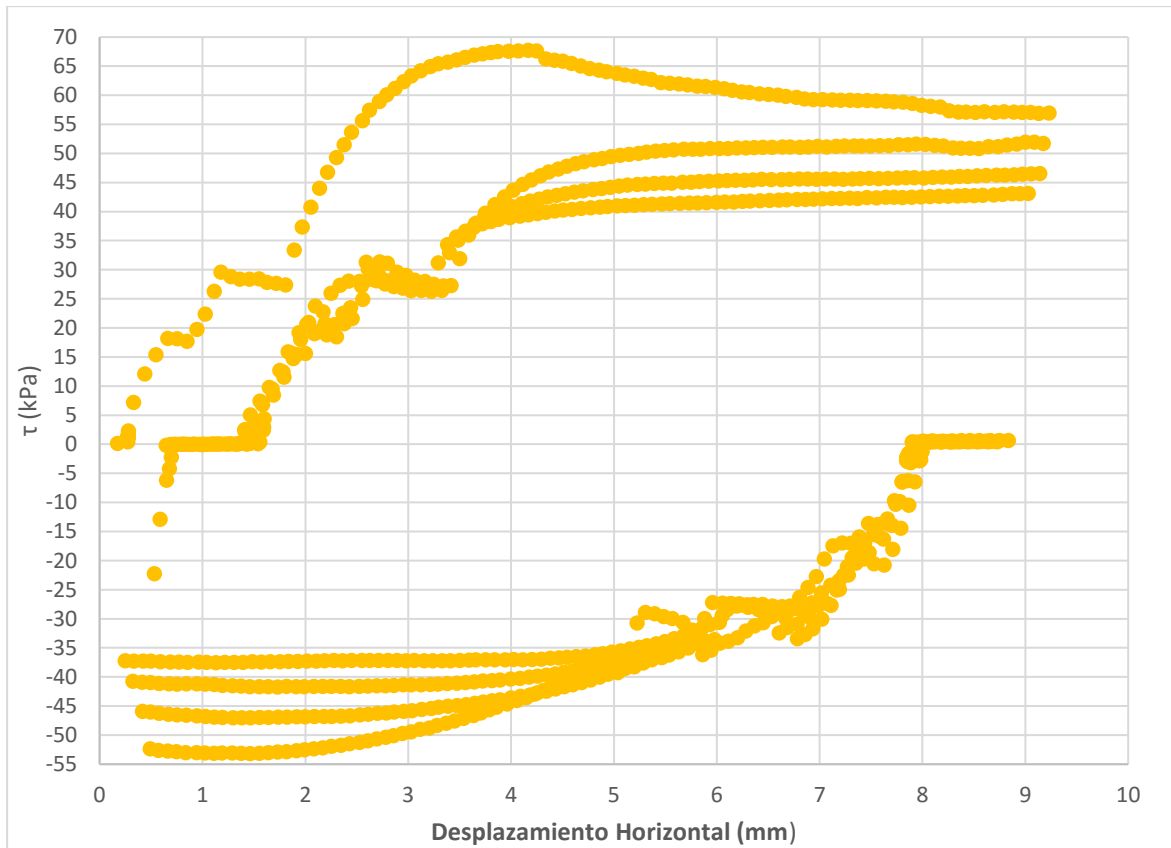


Figura 61. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 99 kPa)

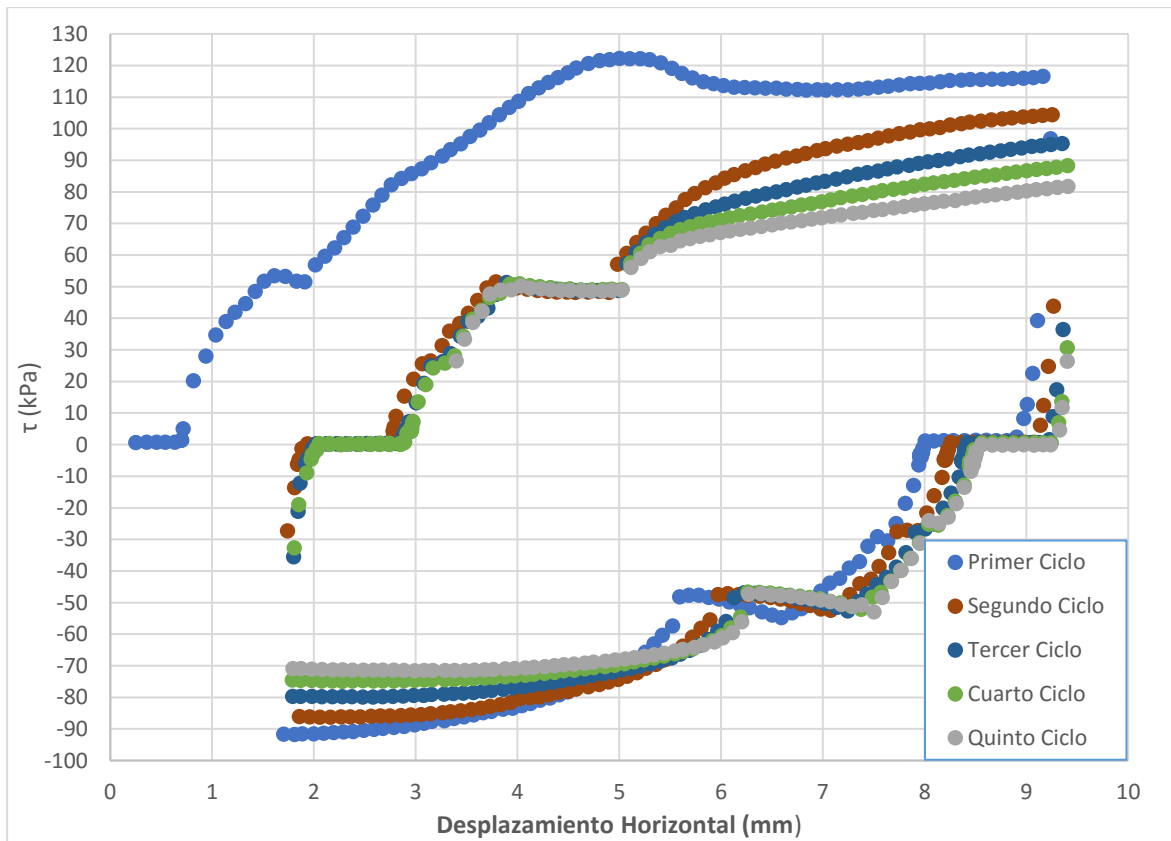


Figura 62. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 196 kPa)

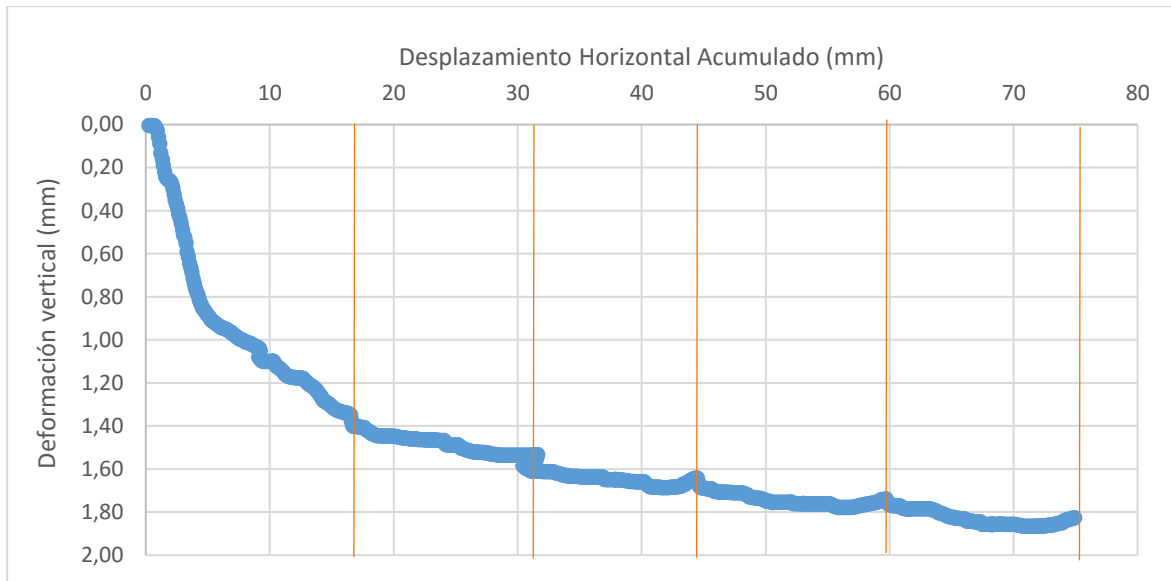


Figura 63. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 196 kPa)

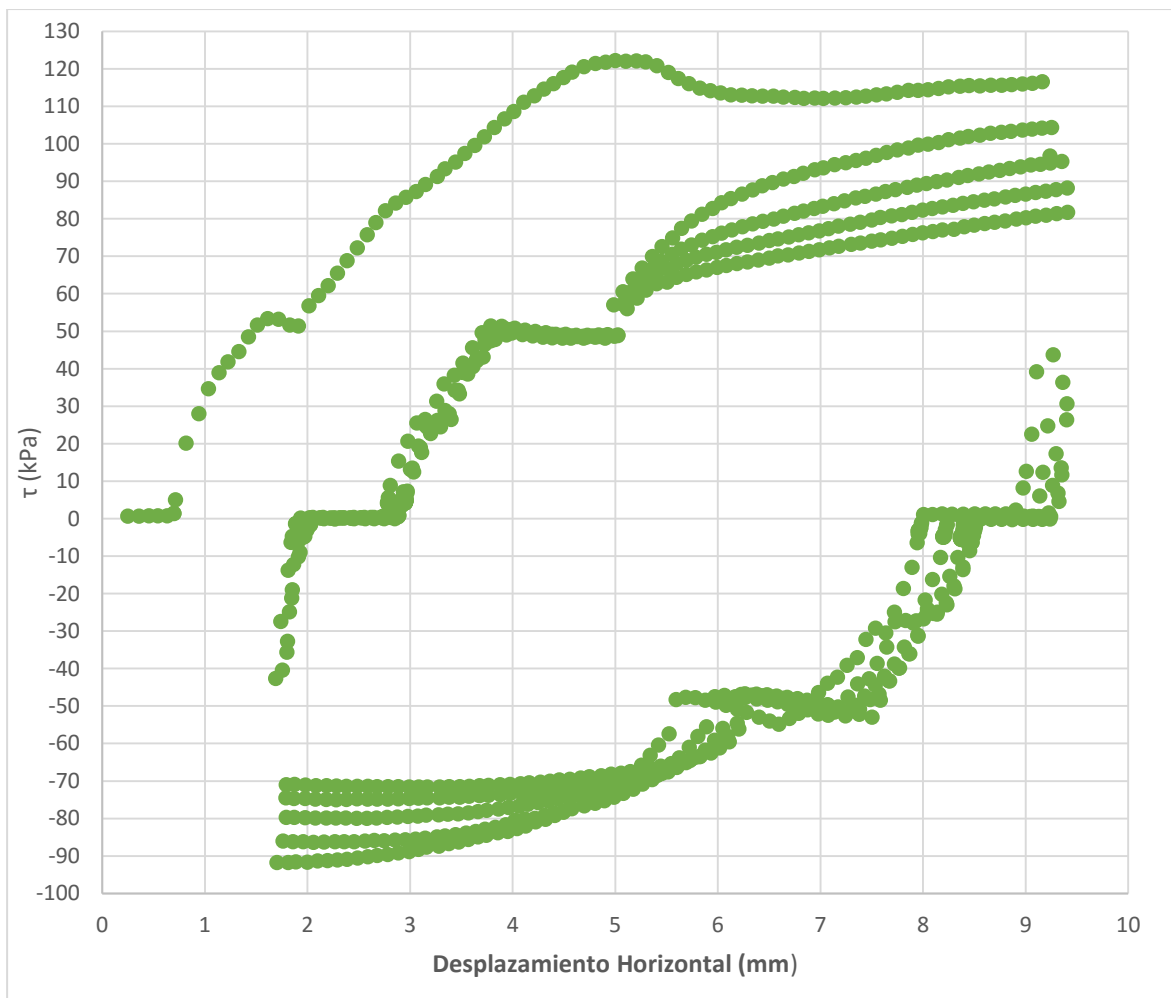


Figura 64. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 196 kPa)

5.1.1.2 Caja circular

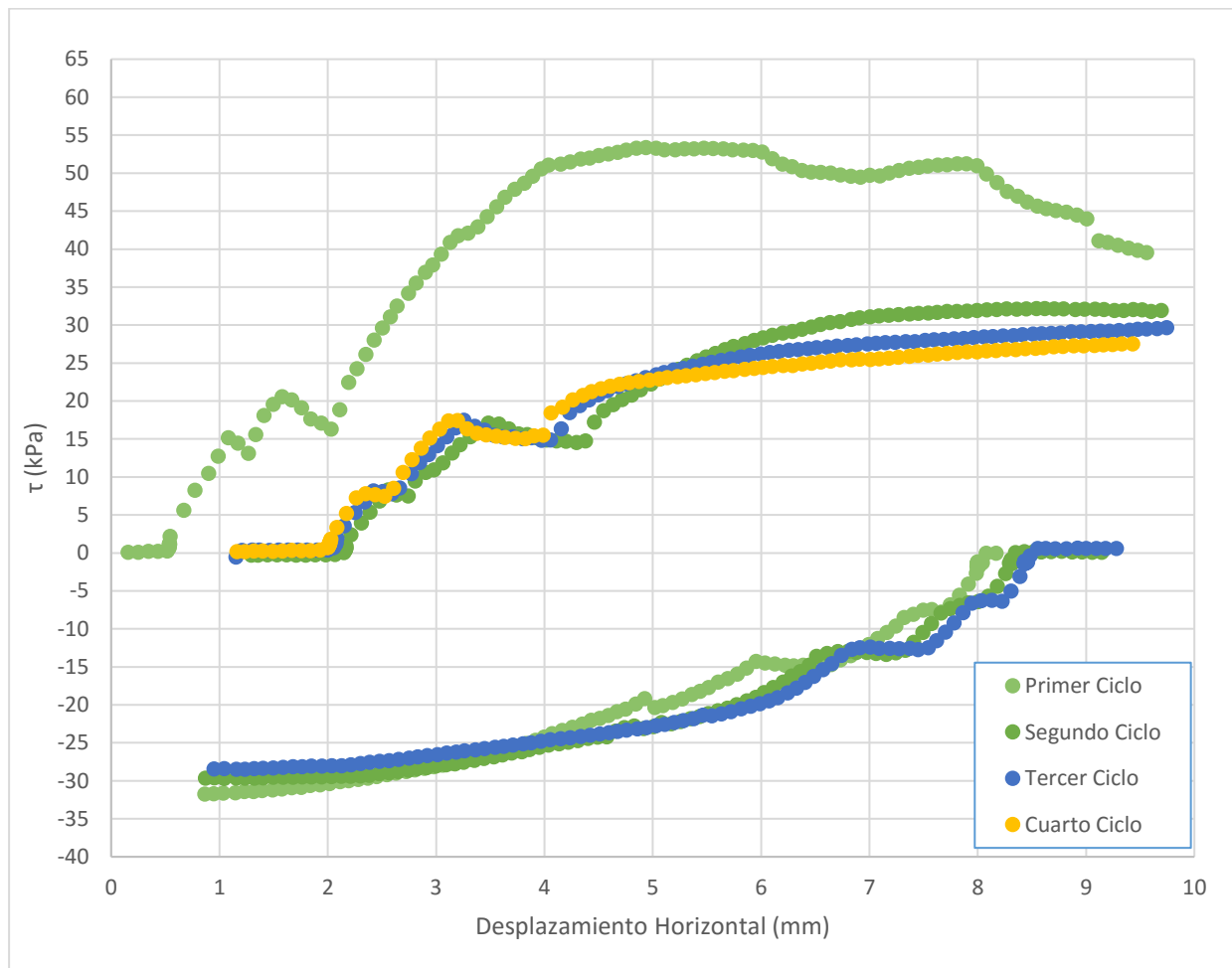


Figura 65. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 51 kPa)

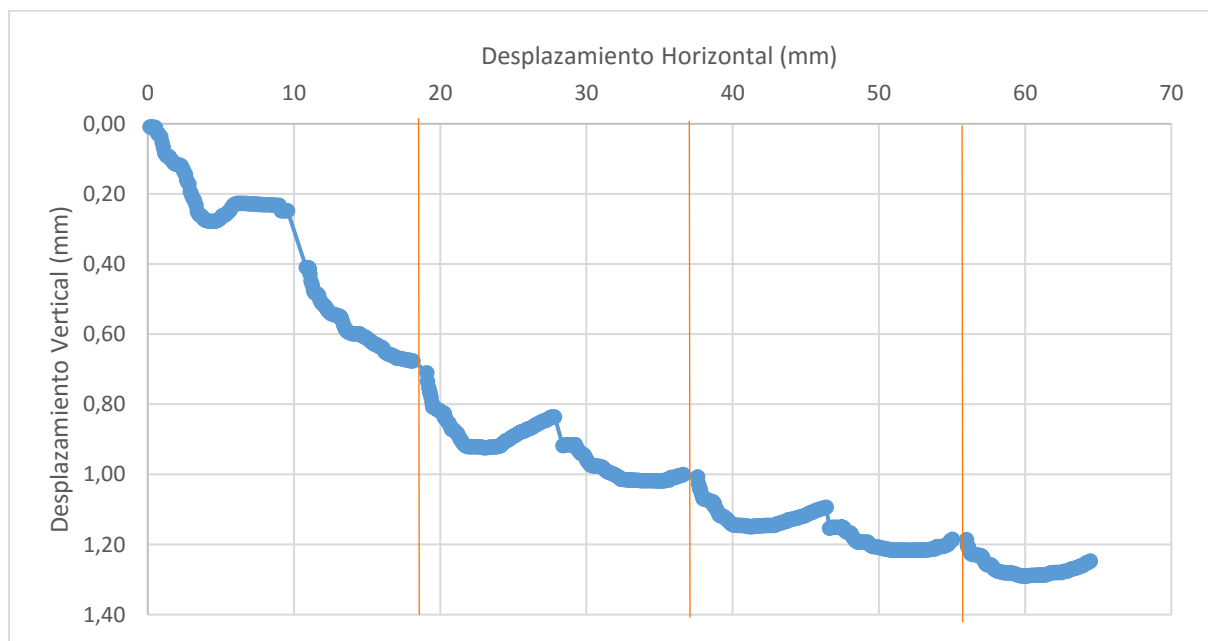


Figura 66. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 51 kPa)

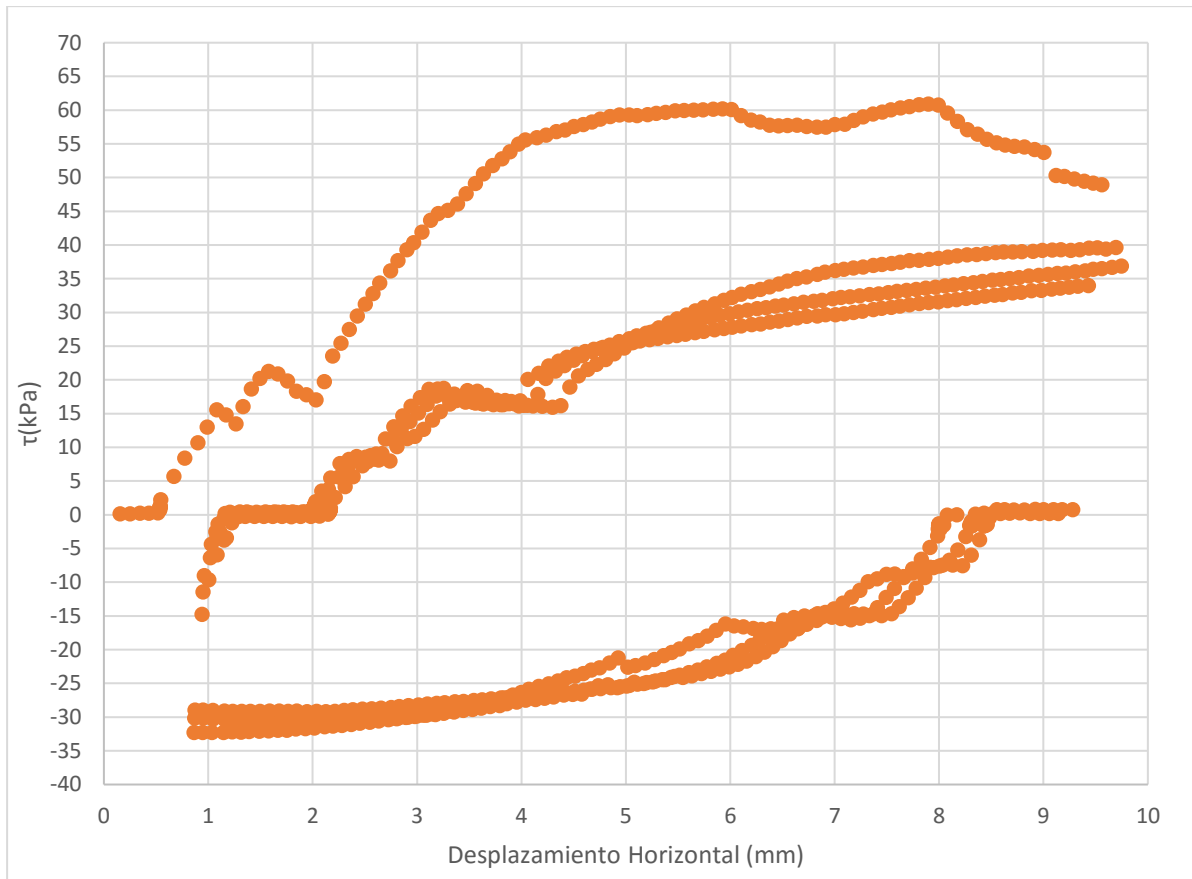


Figura 67. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 51 kPa)

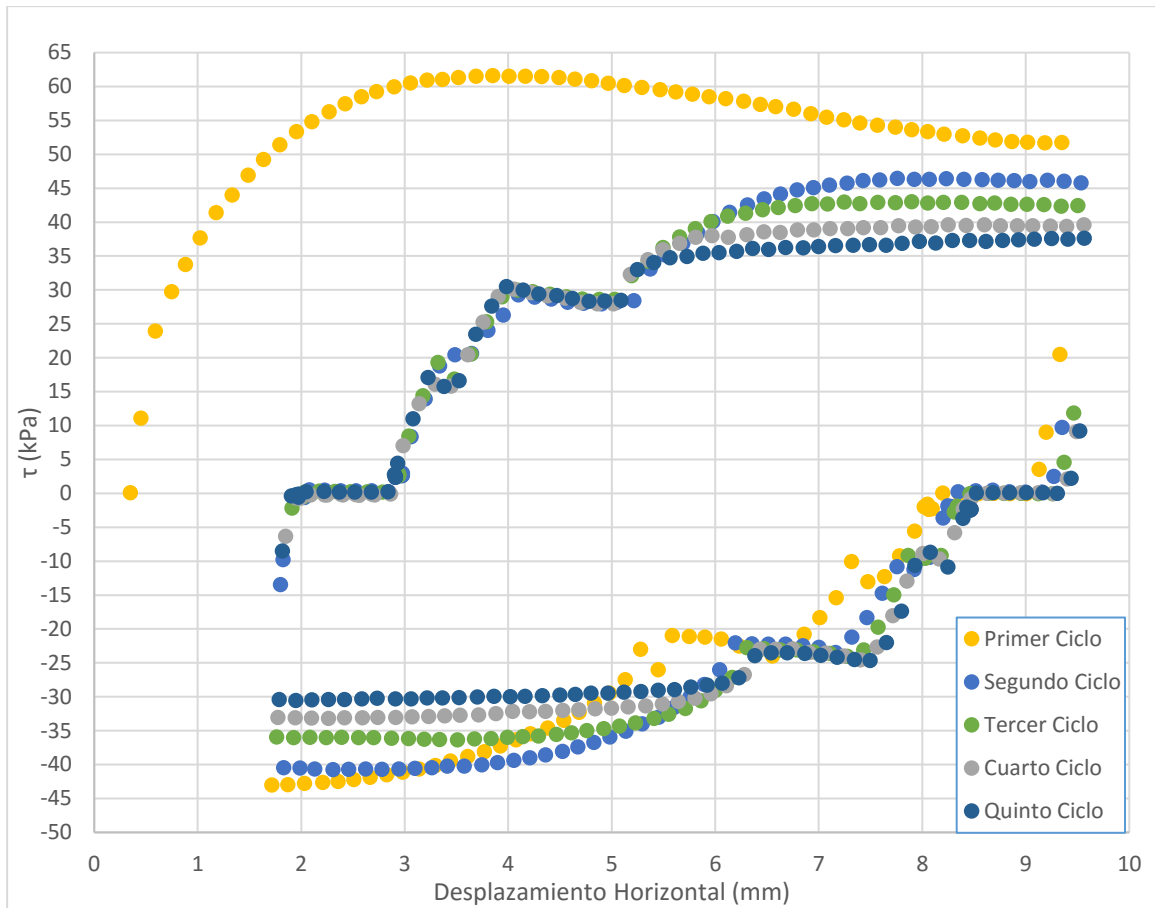


Figura 68. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 98 kPa)

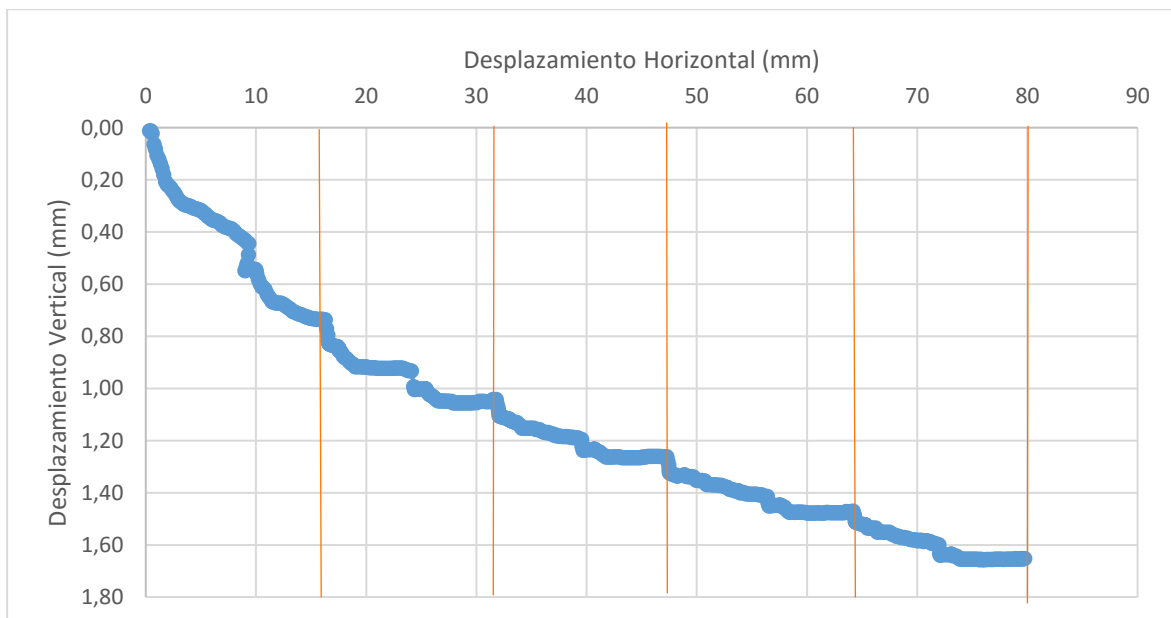


Figura 69. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 98 kPa)

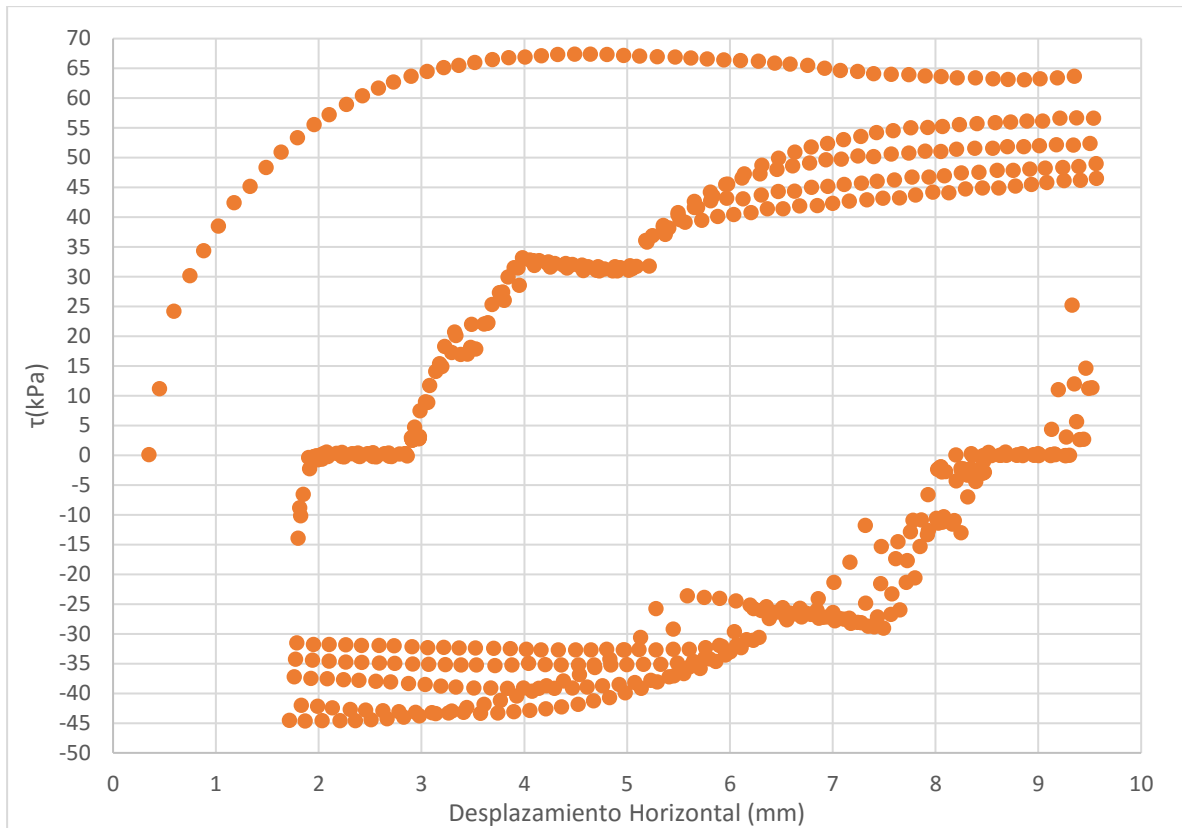


Figura 70. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 98 kPa)

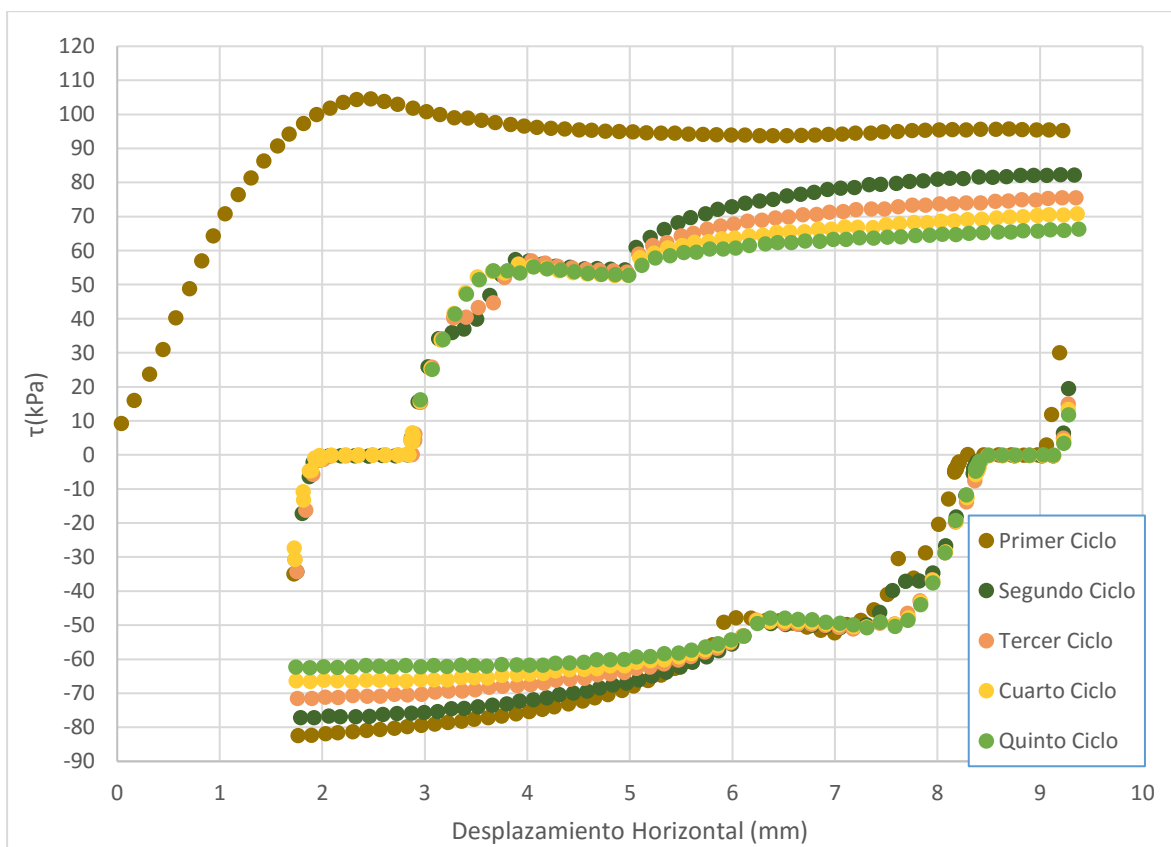


Figura 71. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 201 kPa)

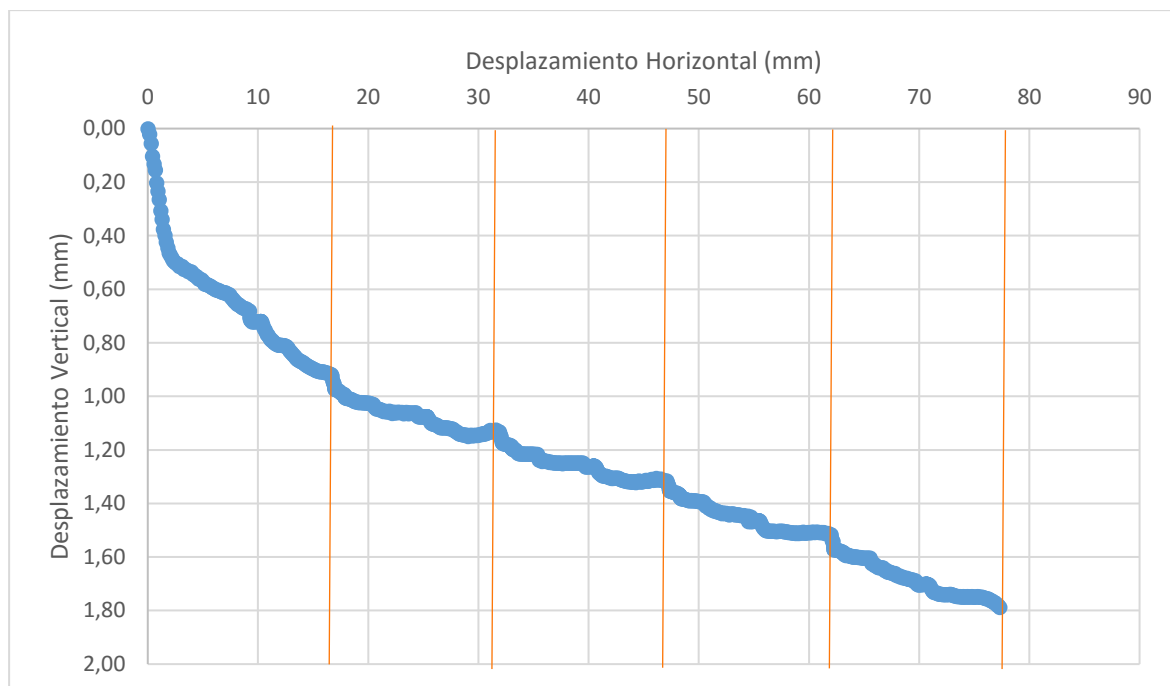


Figura 72. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 201 kPa)

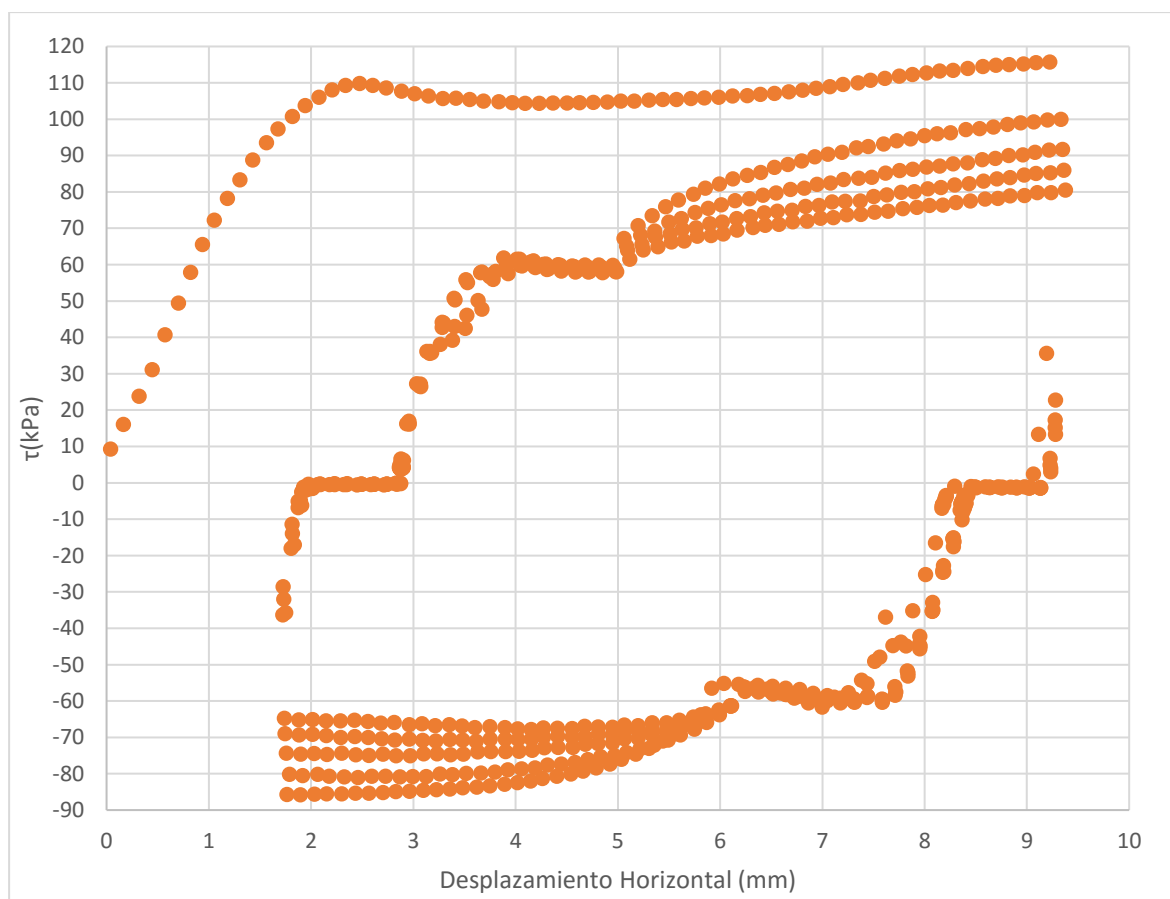


Figura 73. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 201 kPa)

5.1.1.3 Resumen

El Cuadro 19, es un resumen de los resultados más importantes obtenidos en los ensayos de corte "reversivo" en la máquina *Shearmatic* para el suelo 1. Los esfuerzos reportados, la cantidad de ciclos completados⁵⁵, la deformación en el momento de la falla (d_f) y la deformación requerida para llegar al estado crítico (d_r) se pueden leer de los gráficos de esta sección, la densidad seca, la humedad inicial, la saturación inicial, la razón de vacíos inicial se han calculado con base en los pesos y dimensiones de la muestra antes del ensayo y la humedad final con los datos obtenidos después del ensayo. Los esfuerzos reportados se explican en la Figura 74 y como sigue:

- σ' : esfuerzo normal al inicio de la prueba en kPa. Como se aclaró antes, la fuerza aplicada (el peso colocado) a la muestra no cambia durante el ensayo, sin embargo el área sí por lo tanto el esfuerzo aplicado es variable.
- τ_{pico} : máximo esfuerzo medido, resistido por la muestra, en kilo pascales, en las curvas esfuerzo-deformación se encuentra al final de la primera etapa de deformación pseudo-elástica del suelo. Este punto coincide con d_f . (A en la Figura 74)
- τ_{res} Arriba: esfuerzo de corte más bajo medido cuando la muestra se deforma hacia adelante (en dirección en la que se llegó a la falla, o al esfuerzo cortante pico) que se considera estable, es decir que no disminuirá más al aumentar la deformación. (B en la Figura 74)
- τ_{res} Abajo: esfuerzo de corte más bajo medido cuando la muestra se deforma en reversa (en dirección opuesta a la aplicada cuando se llegó a la falla, o al esfuerzo cortante pico) que se considera estable, es decir que no disminuirá más al aumentar la deformación. (C en la Figura 74)
- Además se presentan los valores anteriores calculados con el área corregida, como lo indica Bardet (1997) y se explica en 4.2.1.1.6. Se reporta a la izquierda de los esfuerzos cortantes corregidos el valor de esfuerzo normal corregido respectivo, que corresponde a la deformación coincidente con el τ reportado. (D, E, F en la Figura 74)

⁵⁵ Completar un ciclo implica que la muestra se deforme (hacia adelante) en una dirección y luego regrese (en reversa) al punto de inicio deformándose en la dirección contraria, todo a la misma velocidad, que se considera constante.

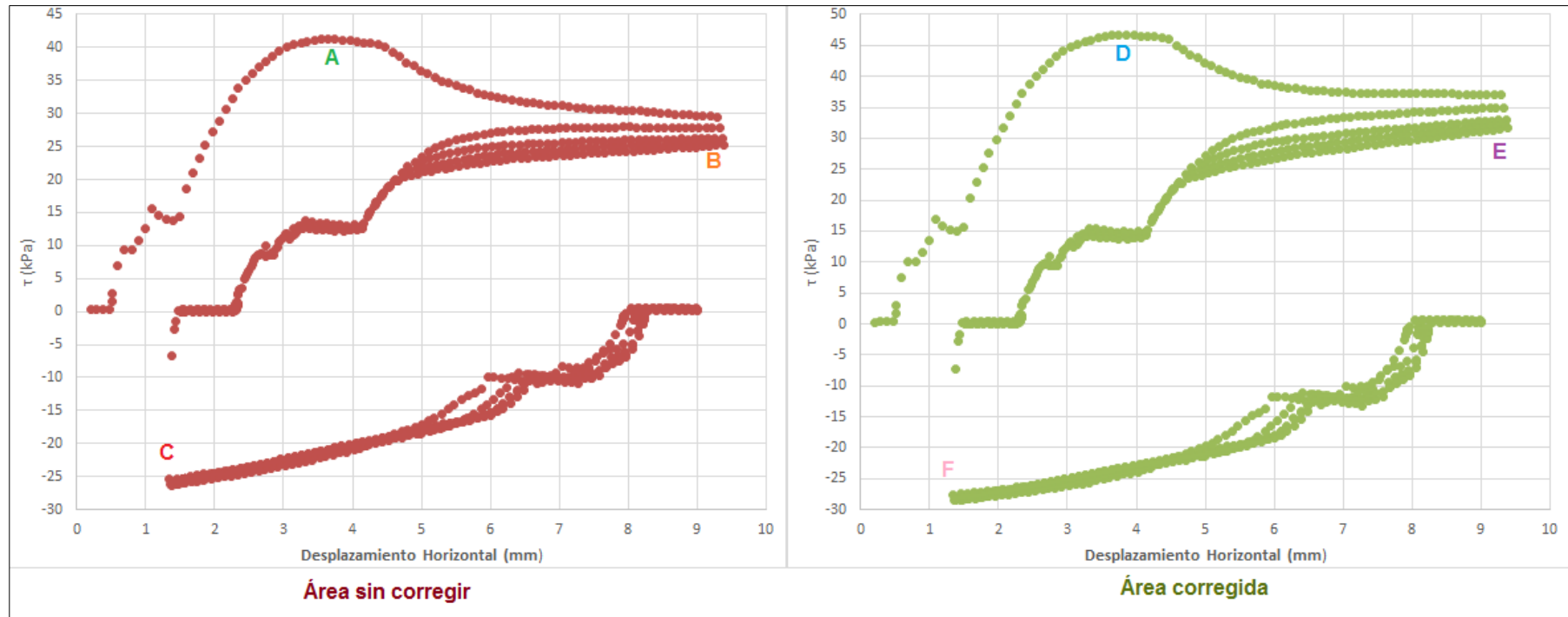


Figura 74. Explicación del cuadro resumen de resultados de la máquina Shearmatic

Cuadro 19. Resultados de la máquina Shearmatic en el suelo ¹⁵⁶

Caja	Ciclos completados	σ' (kPa)	τ_{pico} (kPa)	$\tau_{\text{res Arriba}}$ (kPa)	$\tau_{\text{res Abajo}}$ (kPa)	σ' Corregido para D (kPa)	τ_{pico} (Corregido) (kPa)	σ' Corregido para E (kPa)	$\tau_{\text{res Arriba Corregido}}$ (kPa)	σ' Corregido para F (kPa)	$\tau_{\text{res Abajo A Corregido}}$ (kPa)	ρ_d (g/cm ³)	w_o	$S_{o^{**}}$	e_o	w_f	d_f (mm)	d_r (mm) ⁵⁷
Circular	4	51	53	28	29	57	59	63	34	52	29	1,357	38%	100%	1,31	48%	5	72
Circular	5	98	62	38	30	107	67	122	47	102	32	1,332	28%	89%	1,20	43%	4,5	90
Circular	5	201	105	66	62	212	110	248	81	208	65	1,307	25%	75%	1,20	33%	2,5	90
Cuadrada	5	49	41	25	26	52	47	58	32	50	28	1,270	40%	100%	1,53	48%	3,5	72
Cuadrada	4	99	63	37	37	106	68	116	43	99	37	1,304	39%	100%	1,43	47%	4	72
Cuadrada	5	196	112	69	69	214	122	233	82	202	71	1,374	25%	84%	1,10	38%	5	90

**Se reportan valores de saturación de 100% también cuando los cálculos resultan en valores superiores.

⁵⁶ Los colores de los esfuerzos corresponden al color de la letra respectiva en la Figura 74

⁵⁷ Se consideró que el d_r (o que se alcanza la estabilidad) se encontraba al finalizar alguno de los movimientos hacia adelante. Arriba en los gráficos de esfuerzo-deformación

5.1.2 Corte torsional residual

A continuación se presentan todos los gráficos esfuerzo cortante – deformación horizontal para todos los ensayos realizados con el suelo 1. Se incluyen y diferencian los resultados de las pruebas de calibración mencionadas anteriormente (4.1.4 y 4.1.6), excepto la de muestra inalterada (4.1.5); los ensayos que siguen el procedimiento descrito en (4.2.1.2) se identifican como Repetición #. Seguidamente, se presentan los gráficos de deformación vertical en los ensayos realizados con el suelo 1.

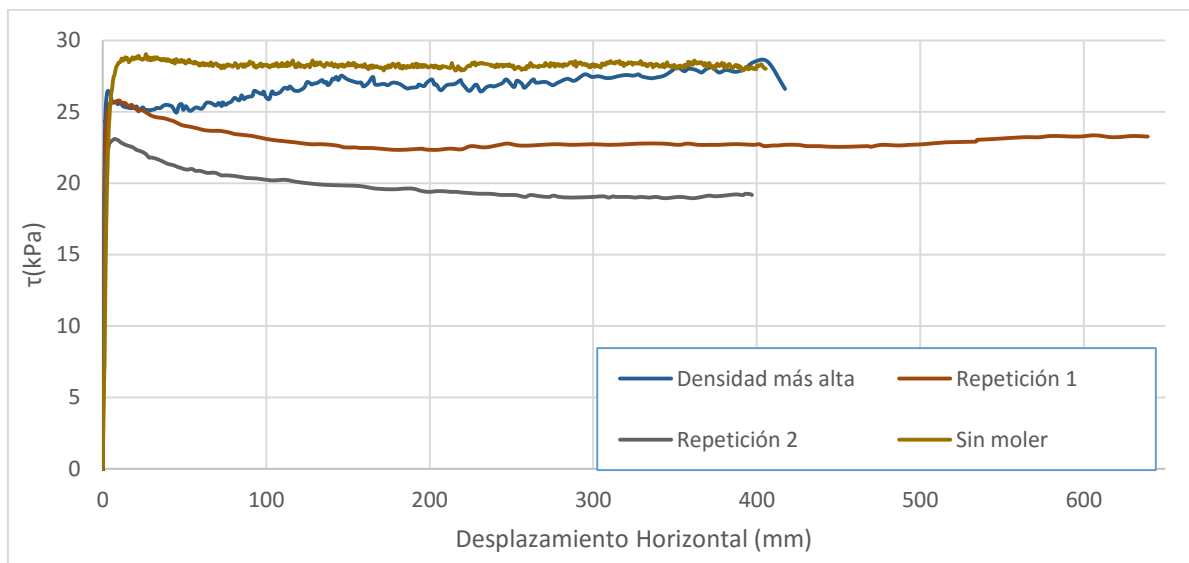


Figura 75. Gráfico esfuerzo - deformación (Esfuerzo Normal 49 kPa)⁵⁸

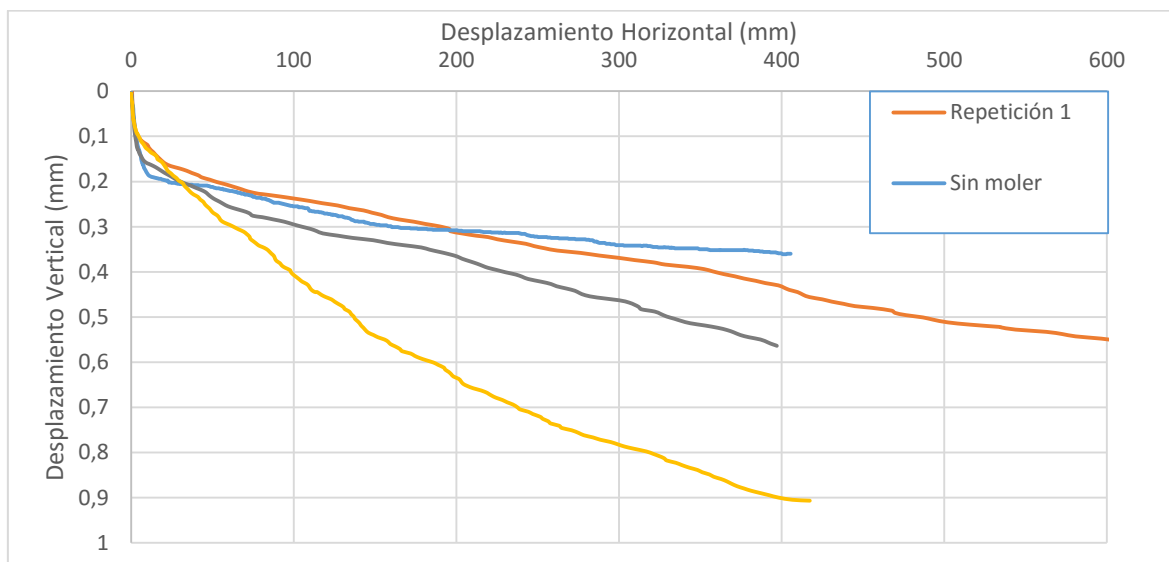


Figura 76. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 49 kPa)

⁵⁸ Para el ensayo de densidad más alta se secó la muestra durante el ensayo.

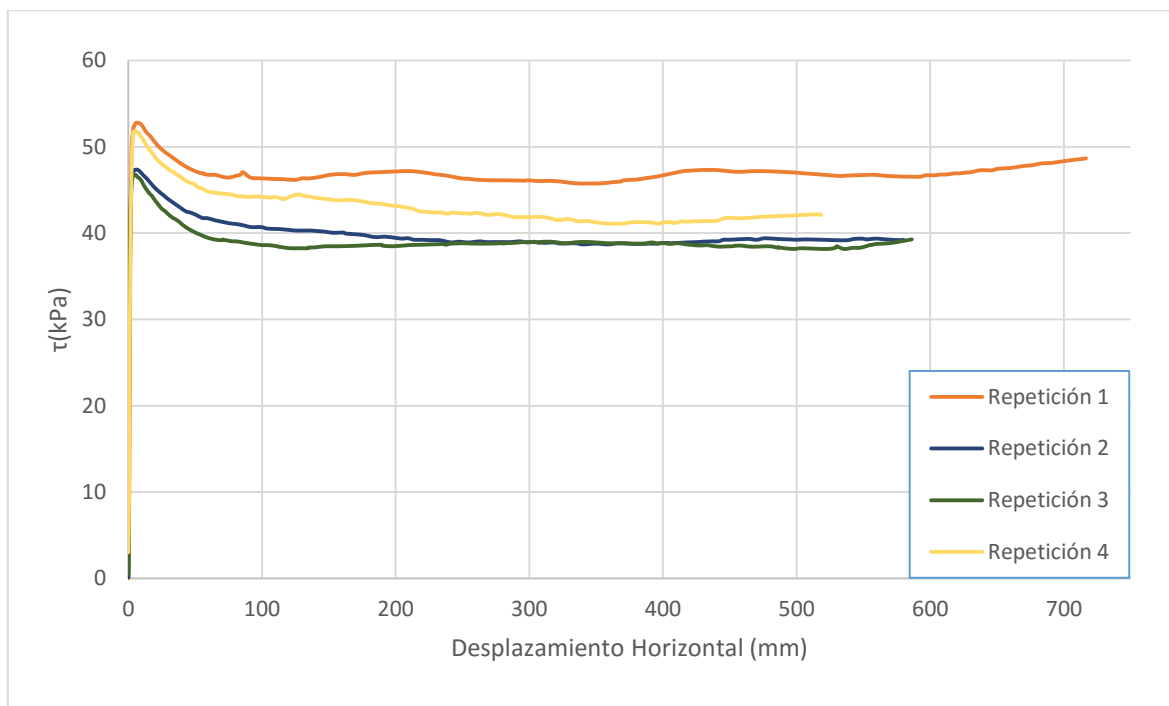


Figura 77. Gráfico esfuerzo - deformación (Esfuerzo Normal 99 kPa)

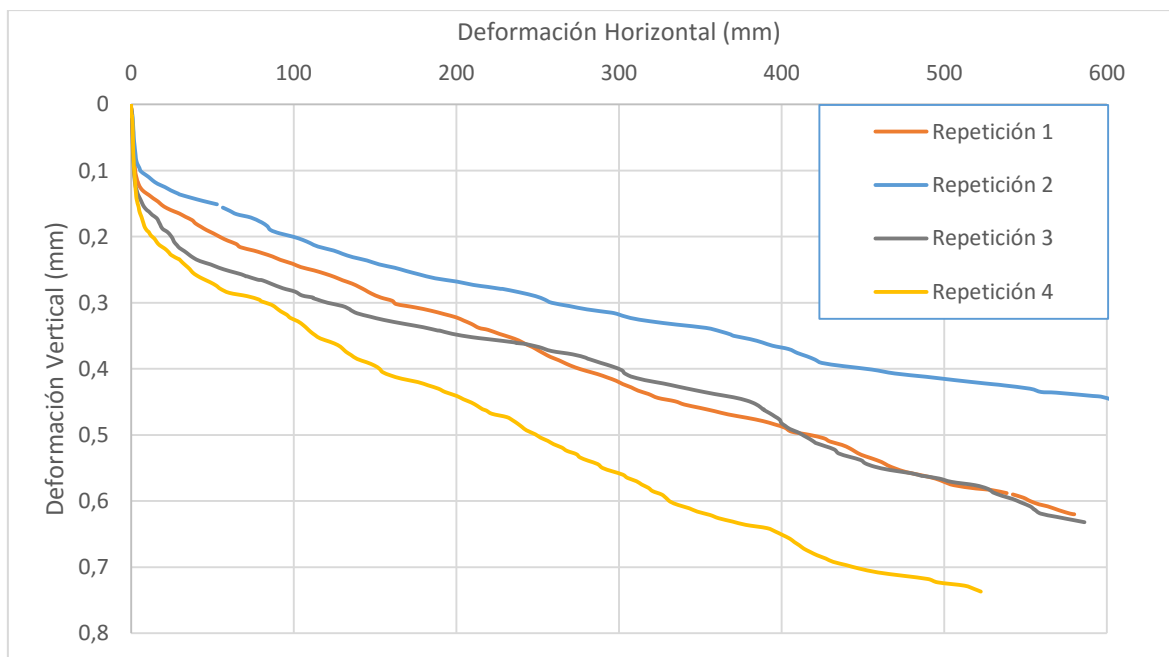


Figura 78. Gráfico deformación vertical - deformación horizontal (Esfuerzo Normal 99 kPa)

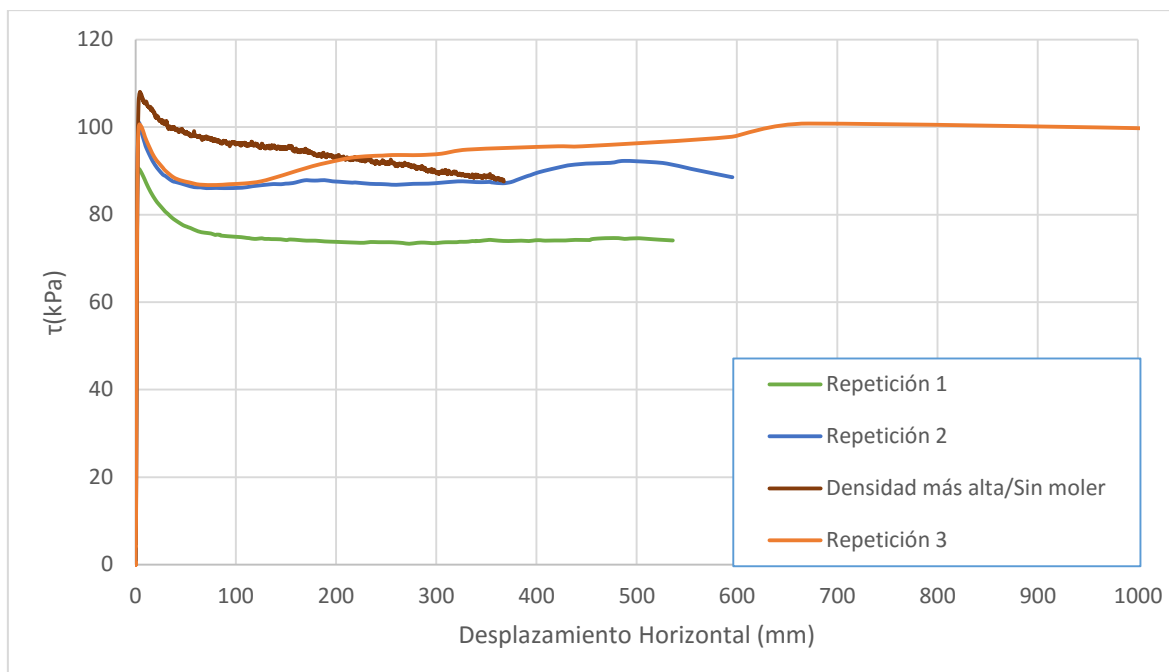


Figura 79. Gráfico esfuerzo - deformación (Esfuerzo Normal 199 kPa)

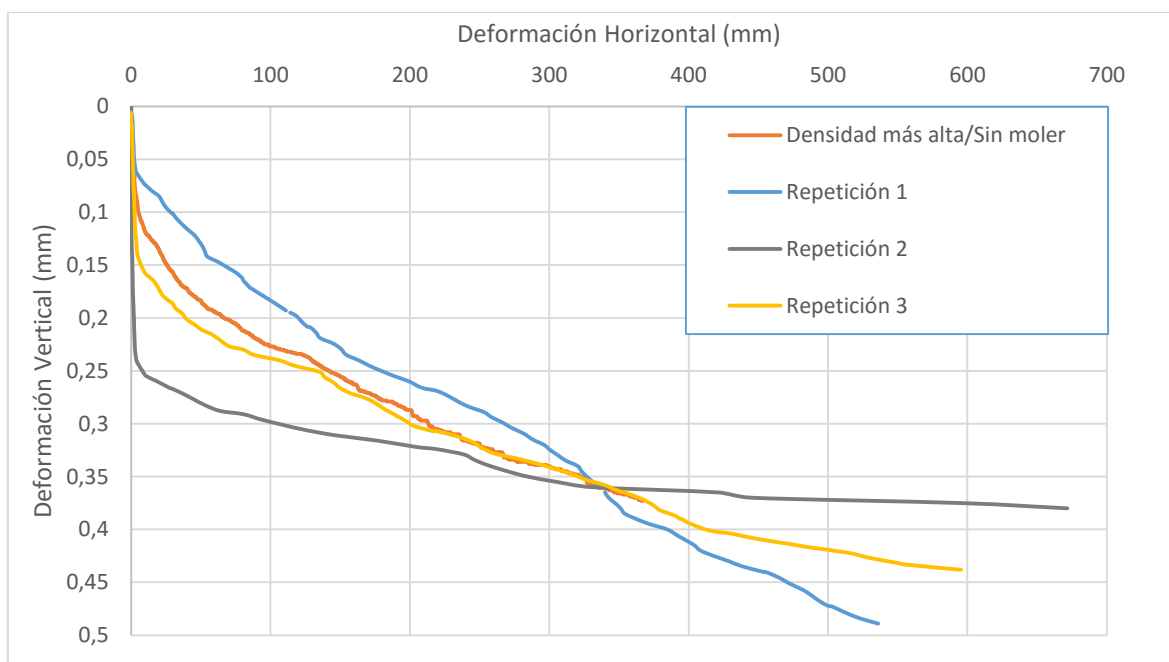


Figura 80. Gráfico deformación vertical - deformación horizontal (Esfuerzo Normal 199 kPa)

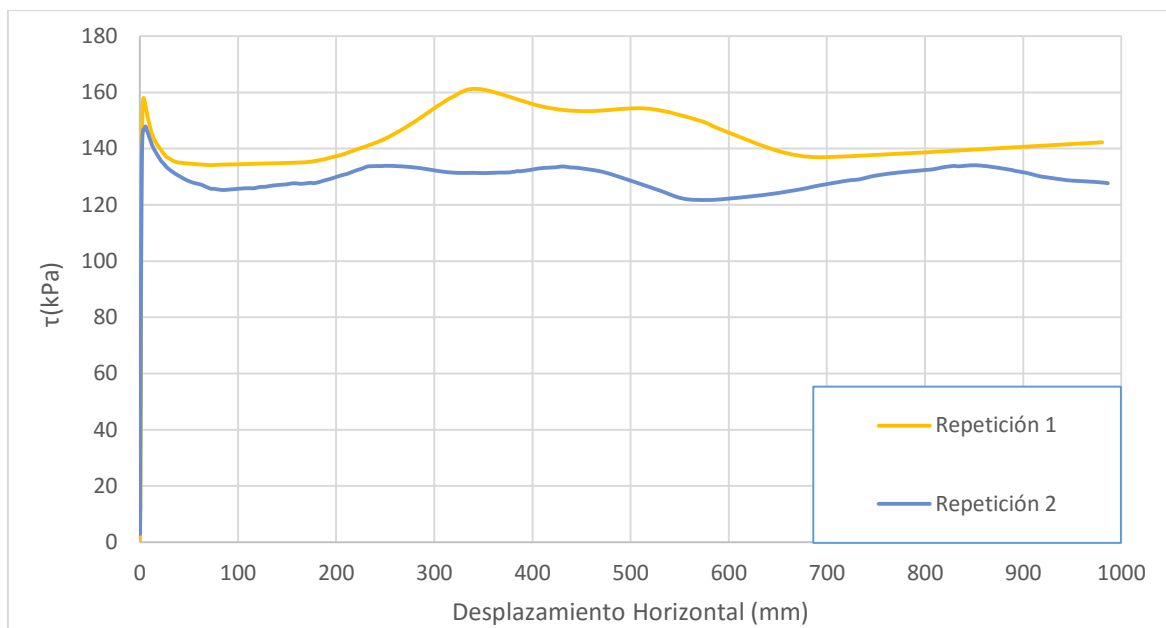


Figura 81. Gráfico esfuerzo - deformación (Esfuerzo Normal Aprox. 300 kPa)⁵⁹

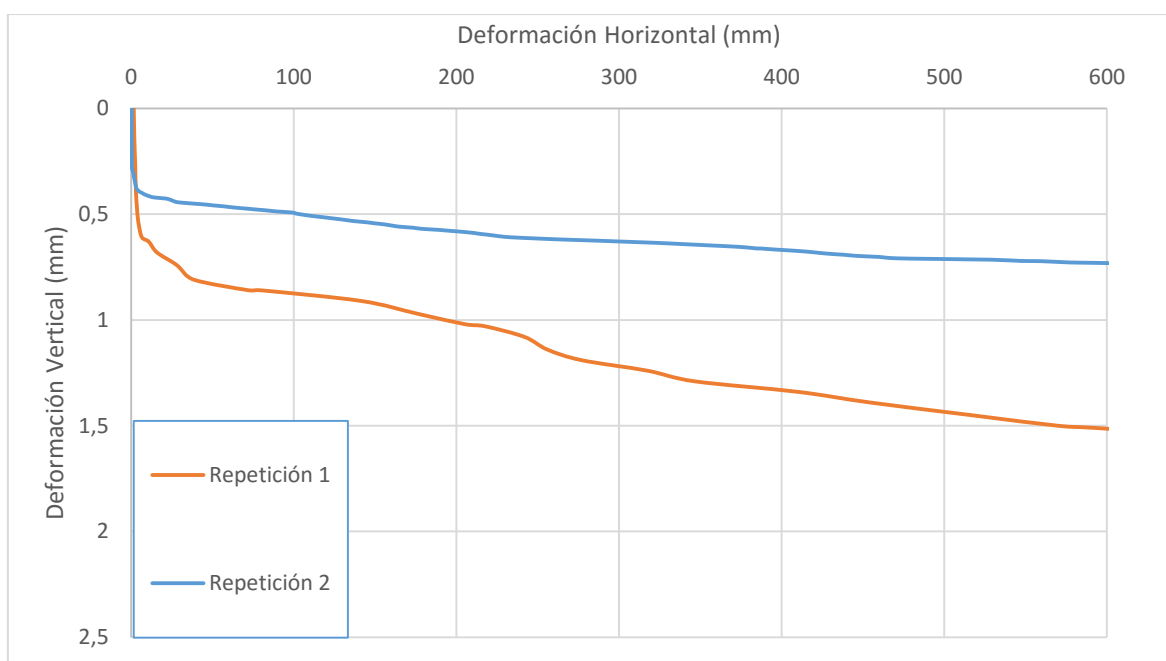


Figura 82. Gráfico deformación vertical - deformación horizontal (Esfuerzo Normal Aprox. 300 kPa)

⁵⁹ El valor es aproximadamente 300 kPa, se puede leer el valor real del cuadro resumen más adelante. No se utilizó el valor exacto pues resultaba poco práctico con las pesas disponibles.

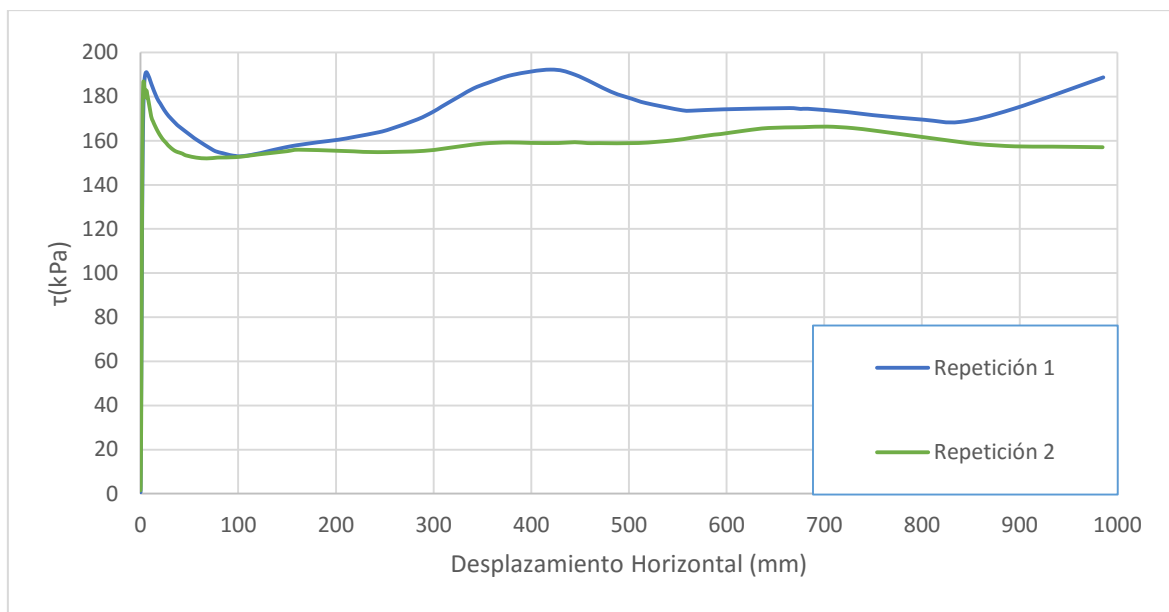


Figura 83. Gráfico esfuerzo - deformación (Esfuerzo Normal Aprox. 400 kPa)⁶⁰

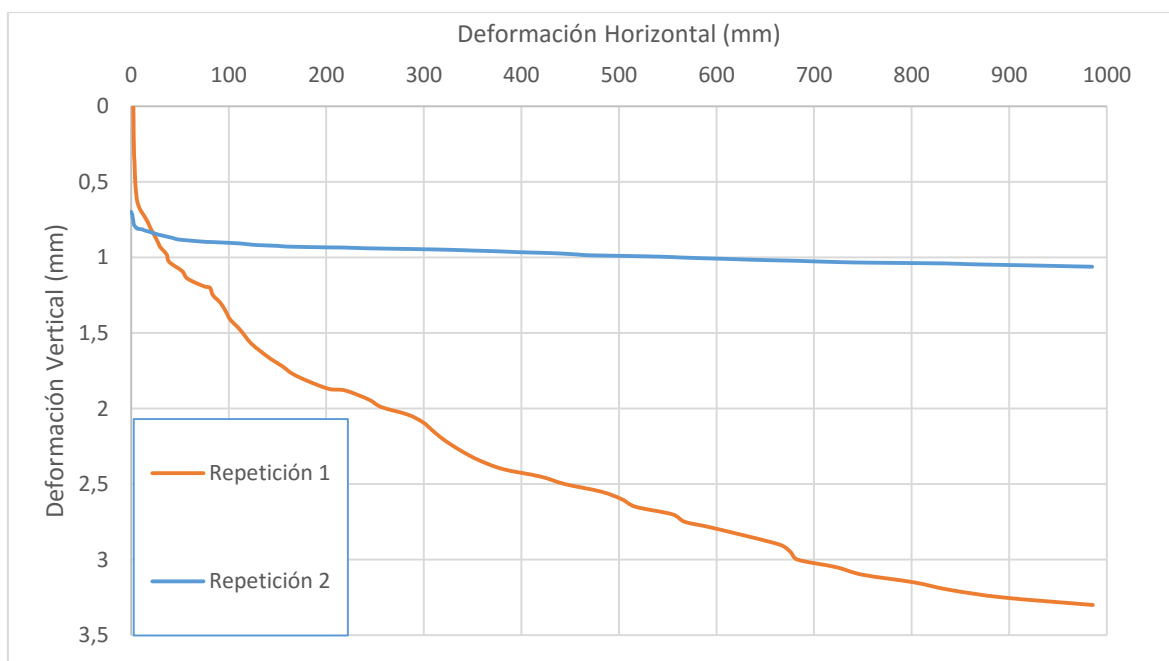


Figura 84. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal Aprox. 400 kPa)

⁶⁰ Ídem.

En la Figura 85 se muestra la superficie de falla de uno de los ensayos. Típicamente para este tipo de ensayos se observó al final de las fallas una superficie de falla puntual y localizada, plana y con aún menos irregularidades que en los ensayos de la otra máquina, lo que es lo esperado ya que para estos ensayos se ha molido la muestra al prepararla. La superficie de falla se formó como lo describieron Meehan *et. al* (2007) y lo ilustran la Figura 13 y Figura 85 :se adhiere el suelo a la tapa superior y lo demás queda fijo en la cavidad anular.



Figura 85. Superficie de falla típica al final de los ensayos del suelo 1 (Torshear)

5.1.2.1 Resumen

El Cuadro 20, es un resumen de los resultados más importantes obtenidos en los ensayos de corte torsional en la máquina *Torshear* para el suelo 1. Los esfuerzos reportados y la deformación requerida para llegar al estado crítico (d_r) se pueden leer de los gráficos de esta sección, la densidad seca, la humedad inicial, la saturación inicial, la razón de vacíos inicial se han calculado con base en los pesos y dimensiones de la muestra antes del ensayo y la humedad final con los datos obtenidos después del ensayo. La velocidad reportada es la indicada a la máquina para cada ensayo y se calculó como se indica en 4.2.1.2.3.

Cuadro 20. Resultados de la máquina *Torshear* en el suelo 1

Descripción	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo Cortante Residual (kPa)	v (mm/min)	ρ_d (g/cm ³)	w_o	S_o	e_o	w_f	d_r (mm)
Sin moler	49	28	0,101	1,052	56%	100%	2,7	57%	100
Densidad más alta	49	25	0,107	1,389	37%	100%	1,3	49%	50
Repetición 1	49	22	0,486	0,975	67%	100%	4,0	62%	200
Repetición 2	49	19	0,326	1,068	64%	100%	3,2	59%	300
Repetición 1	99	39	0,417	1,149	66%	100%	3,1	61%	280
Repetición 2	99	46	0,513	0,948	67%	100%	4,2	54%	300
Repetición 3	99	38	0,532	1,037	71%	100%	4,3	56%	140
Repetición 4	99	41	0,524	1,086	63%	100%	3,2	46%	218
Densidad más alta/Sin moler	199	88	0,143	1,135	51%	100%	2,2	39%	370
Repetición 1	199	73	0,532	1,067	66%	100%	3,5	55%	240
Repetición 2	199	87	0,946	0,923	71%	100%	5,0	44%	80
Repetición 3	199	87	0,880	0,954	73%	100%	5,1	46%	100
Repetición 1	297	122	0,718	0,992	65%	100%	3,7	30%	524
Repetición 2	303	134	1,103	1,017	67%	100%	3,8	59%	73
Repetición 1	394	152	0,766	1,032	68%	100%	3,9	49%	68
Repetición 2	398	153	1,304	0,956	75%	100%	5,4	51%	101

5.2 Suelo 2

5.2.1 Corte directo residual⁶¹

En la Figura 86 se muestra la superficie de falla para el ensayo con de 49 kPa de presión normal. Típicamente para este tipo de ensayos se observó al final de las fallas una superficie de falla puntual y localizada en la división de la caja de corte, plana y con pocas y muy pequeñas irregularidades.



Figura 86. Superficie de falla típica al final de los ensayos del suelo 2 (Shearmatic)

A continuación se presentan los resultados obtenidos gráficamente en los ensayos realizados en la máquina *Shearmatic* con muestra del suelo 2, la caja de corte cuadrada. En orden ascendente de esfuerzo normal se presentan los gráficos de resistencia-deformación horizontal, deformación vertical-deformación horizontal acumulada y resistencia-deformación con esfuerzos corregidos⁶² de cada ensayo. Se indica en los gráficos de deformación horizontal acumulada el fin de cada ciclo o retorno al origen.

⁶¹ Para comprender por qué se forman los “valles” de esfuerzo en los gráficos de esfuerzo-deformación, presentados en esta sección, refiérase a l Apéndice 1.

⁶² Se utiliza en el título de estos gráficos el esfuerzo normal inicial como referencia, posteriormente se reporta el valor corregido de esfuerzo normal para cada esfuerzo de corte reportado.

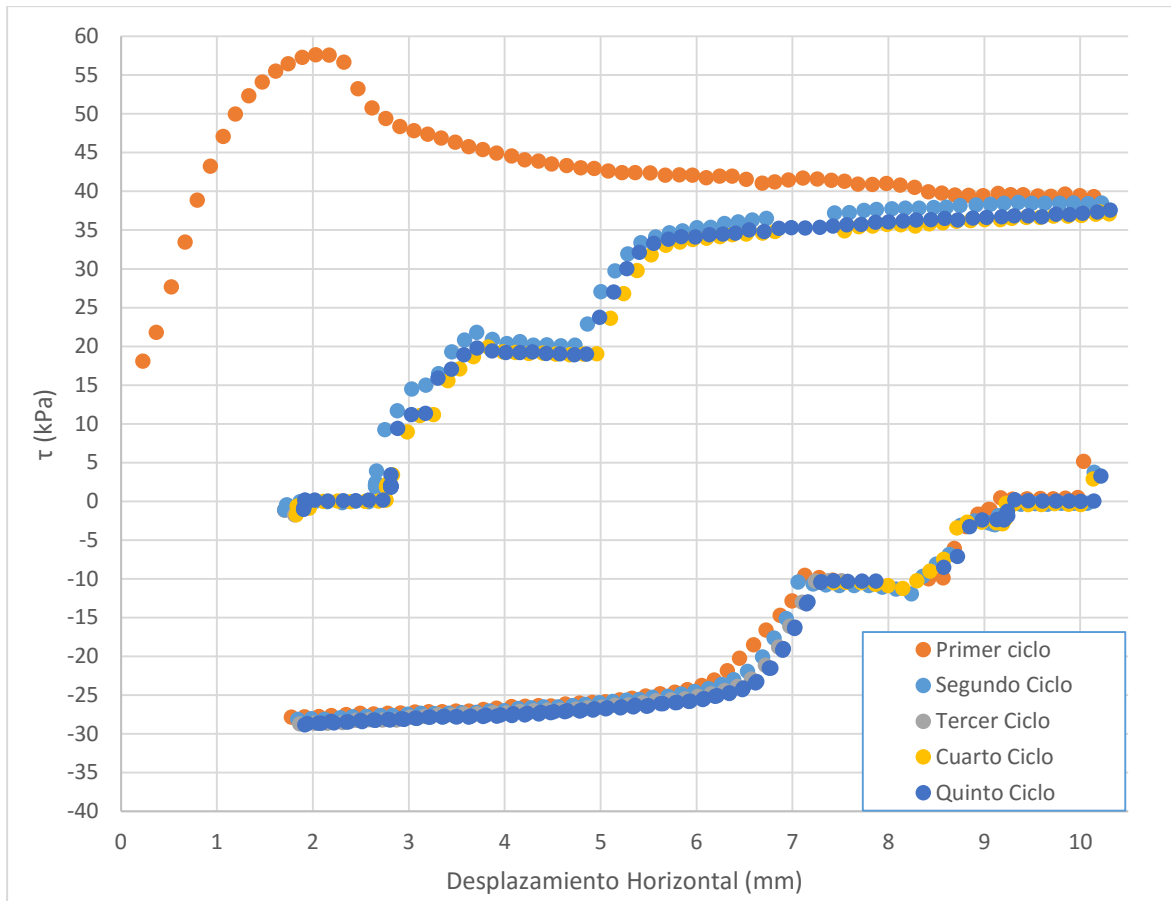


Figura 87. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 49 kPa)

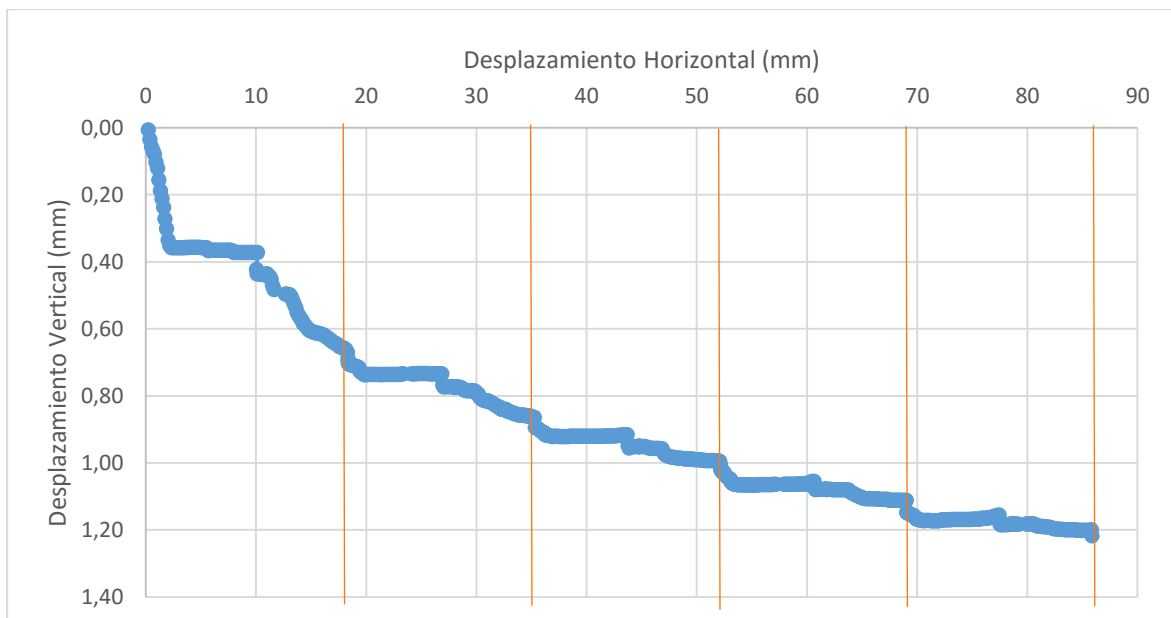


Figura 88. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 49 kPa)

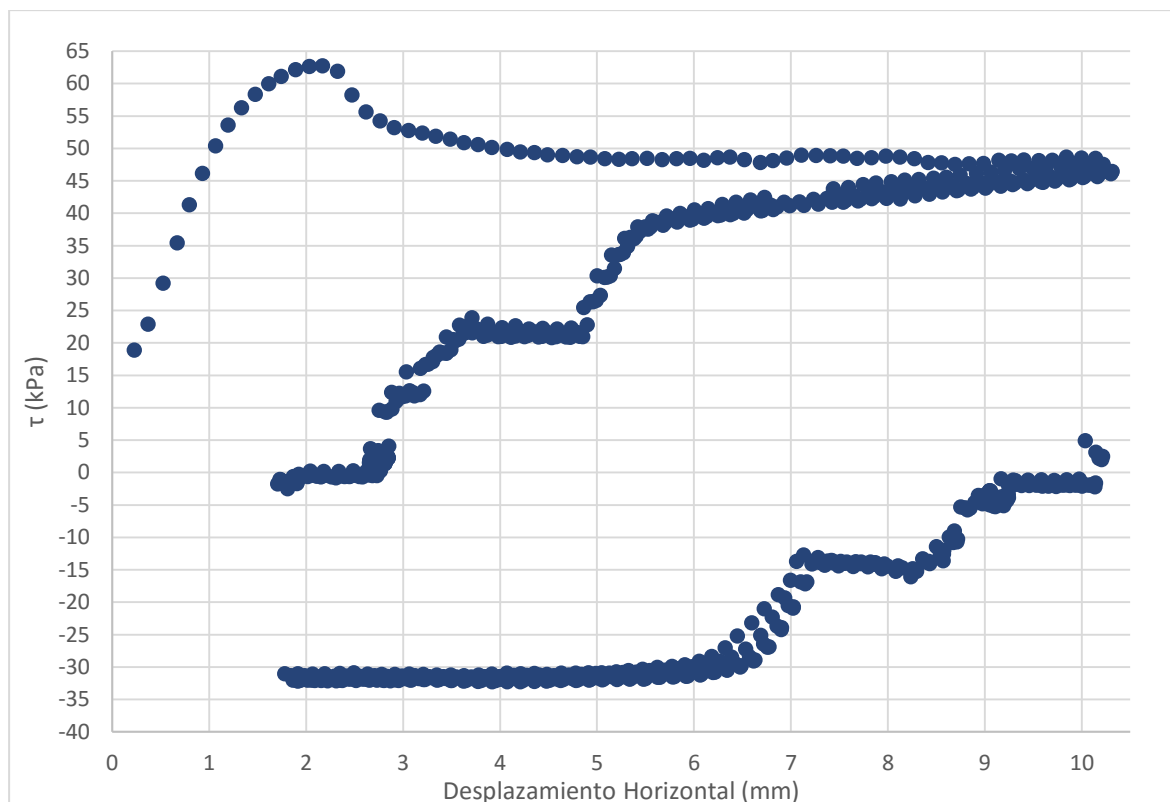


Figura 89. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 49 kPa)

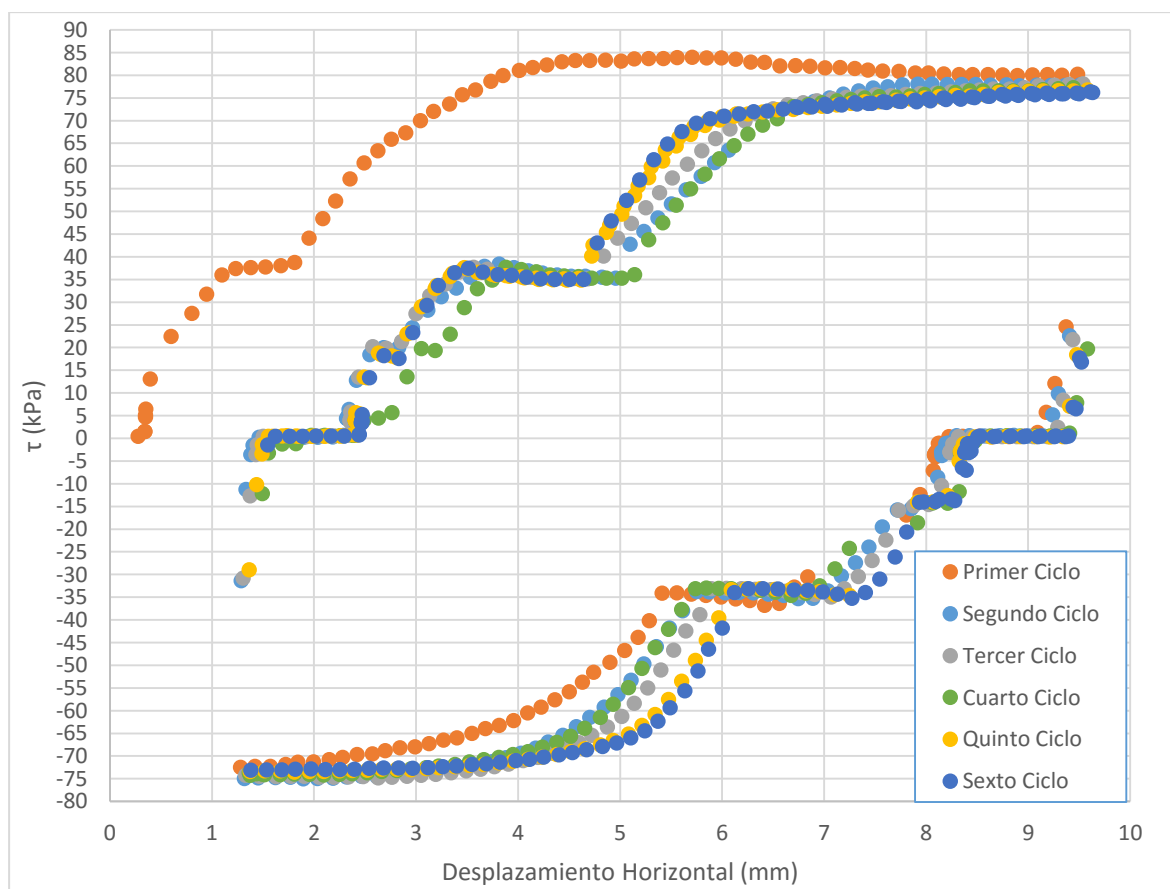


Figura 90. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 101 kPa)

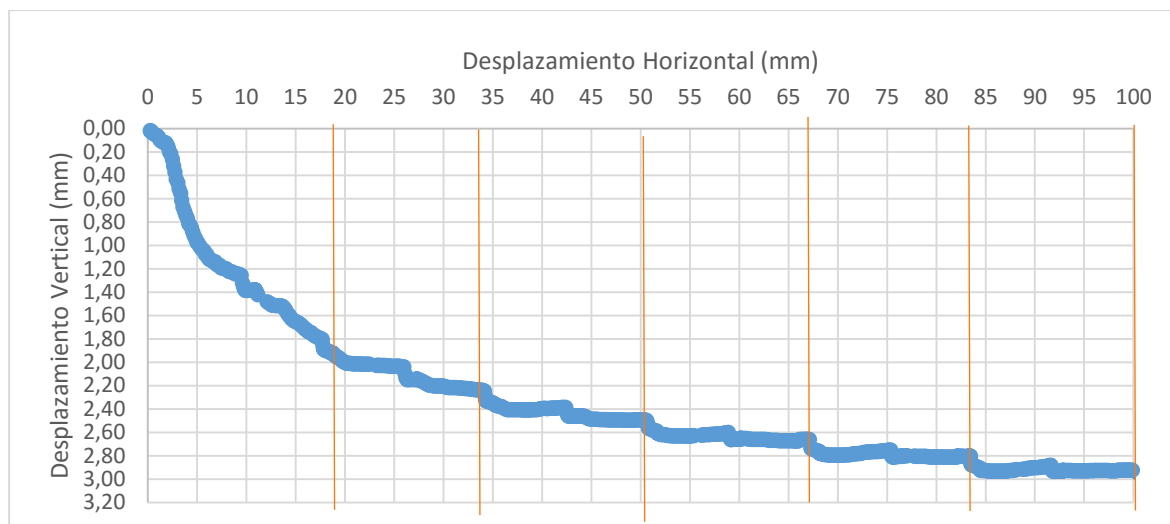


Figura 91. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 101 kPa)

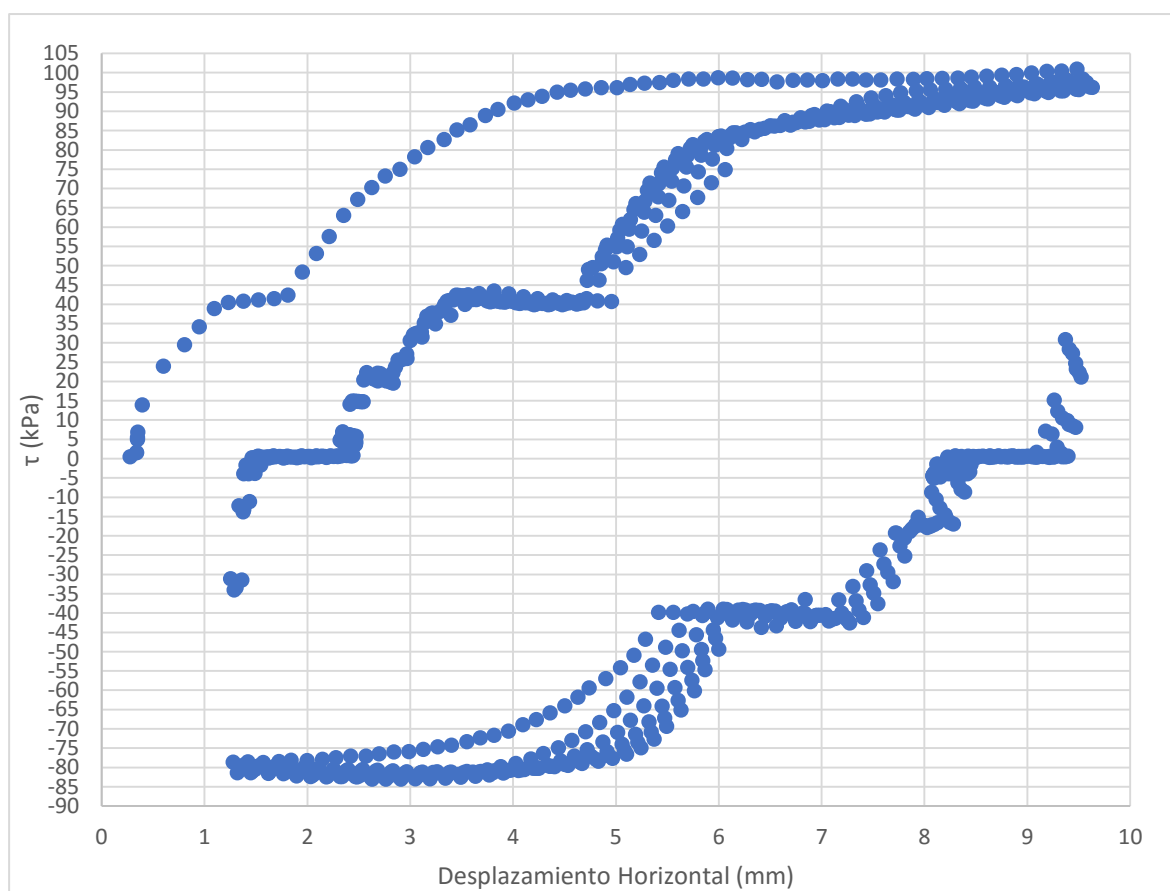


Figura 92. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 101 kPa)

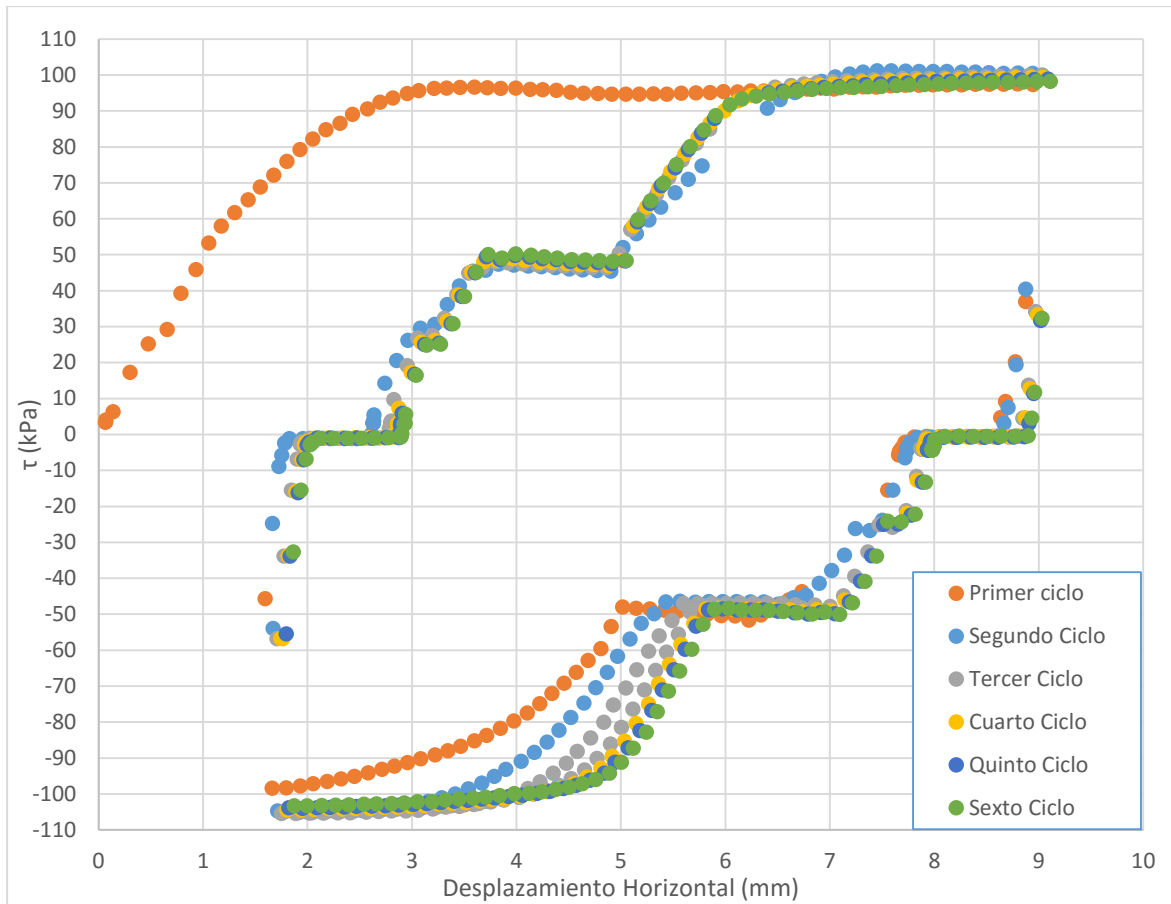


Figura 93. Gráfico esfuerzo – deformación (Esfuerzo Normal 199 kPa)

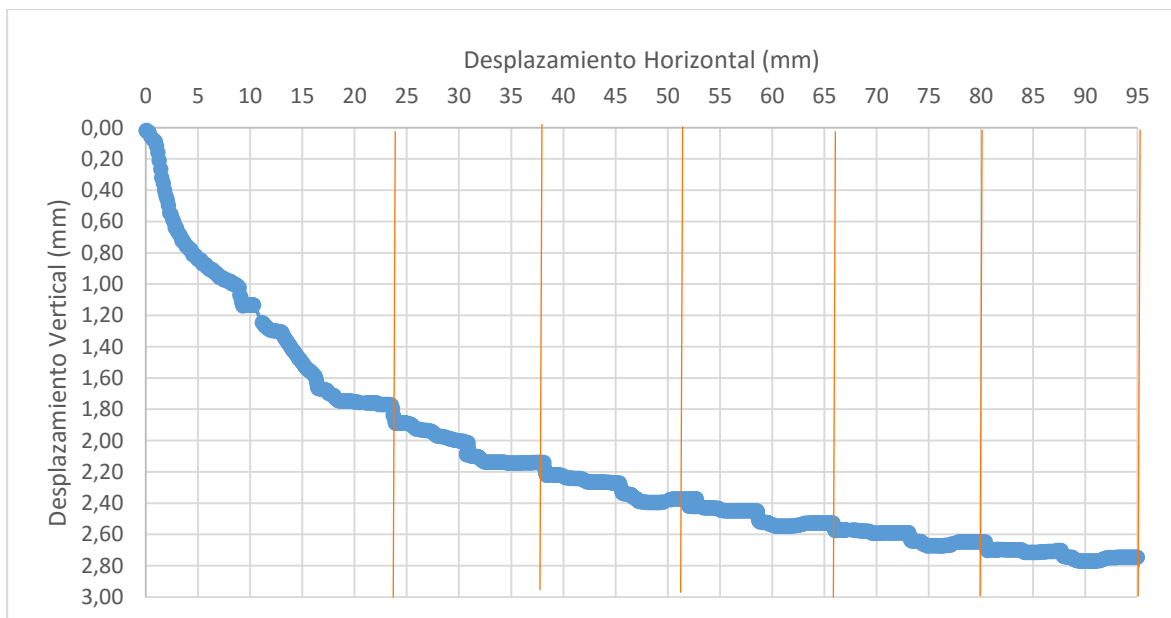


Figura 94. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 199 kPa)

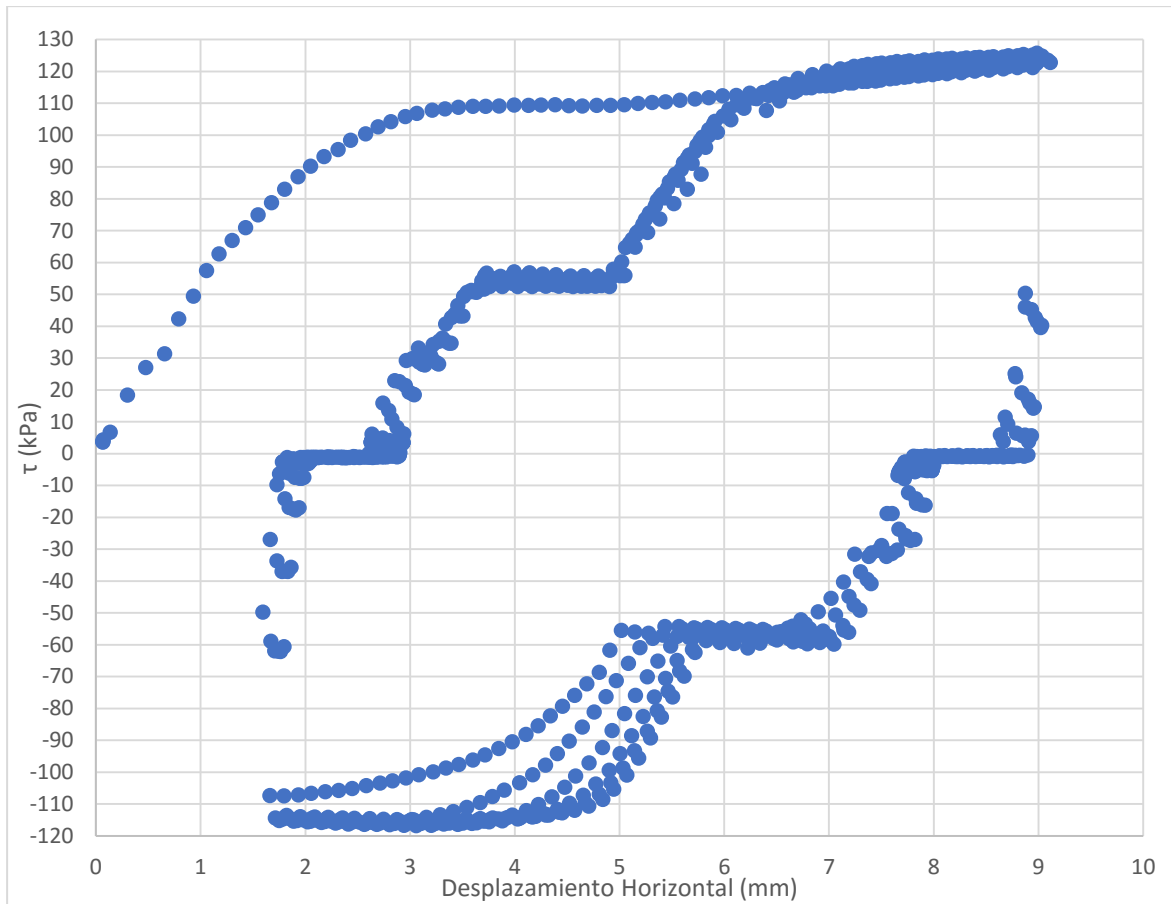


Figura 95. Gráfico esfuerzo – deformación con corrección de área (Esfuerzo Normal 199 kPa)

5.2.1.1 Resumen

El Cuadro 21, es un resumen de los resultados más importantes obtenidos en los ensayos de corte "reversivo" en la máquina *Shearmatic* para el suelo 2. Se presentan los resultados tal como en 5.1.1.3.

Cuadro 21. Resultados de la máquina Shearmatic en el suelo 2

Caja	Ciclos completados	τ_{pico} (kPa)	τ_{res} Arriba (kPa)	τ_{res} Abajo (kPa)	σ' Corregido para D (kPa)	τ_{pico} (Corregido (kPa)	σ' Corregido para E (kPa)	τ_{res} Arriba Corregido (kPa)	σ' Corregido para F (kPa)	τ_{res} Abajo A Corregido (kPa)	τ_{pico} (kPa)	ρ_d (g/cm ³)	w_o	S_o^*	e_o	w_f	d_f (mm)	d_r (mm) ⁶³
Cuadrada	5	49	58	37	29	51	63	59	46	51	32	0,917	73%	100%	5,14	77%	2	44
Cuadrada	6	101	84	76	72	113	99	121	96	104	79	0,911	66%	100%	4,14	74%	6	92
Cuadrada	6	199	97	97	98	213	109	233	121	204	107	0,942	73%	100%	5,08	69%	3,6	9

*Se reportan valores de saturación de 100% también cuando los cálculos resultan en valores superiores

⁶³ Se consideró que el d_r (o que se alcanza la estabilidad) se encontraba al finalizar alguno de los movimientos hacia adelante. Arriba en los gráficos de esfuerzo-deformación

5.2.2 Corte torsional residual

A continuación se presentan todas las curvas esfuerzo cortante – deformación horizontal y deformación vertical – deformación horizontal para todos los ensayos realizados con el suelo 2.

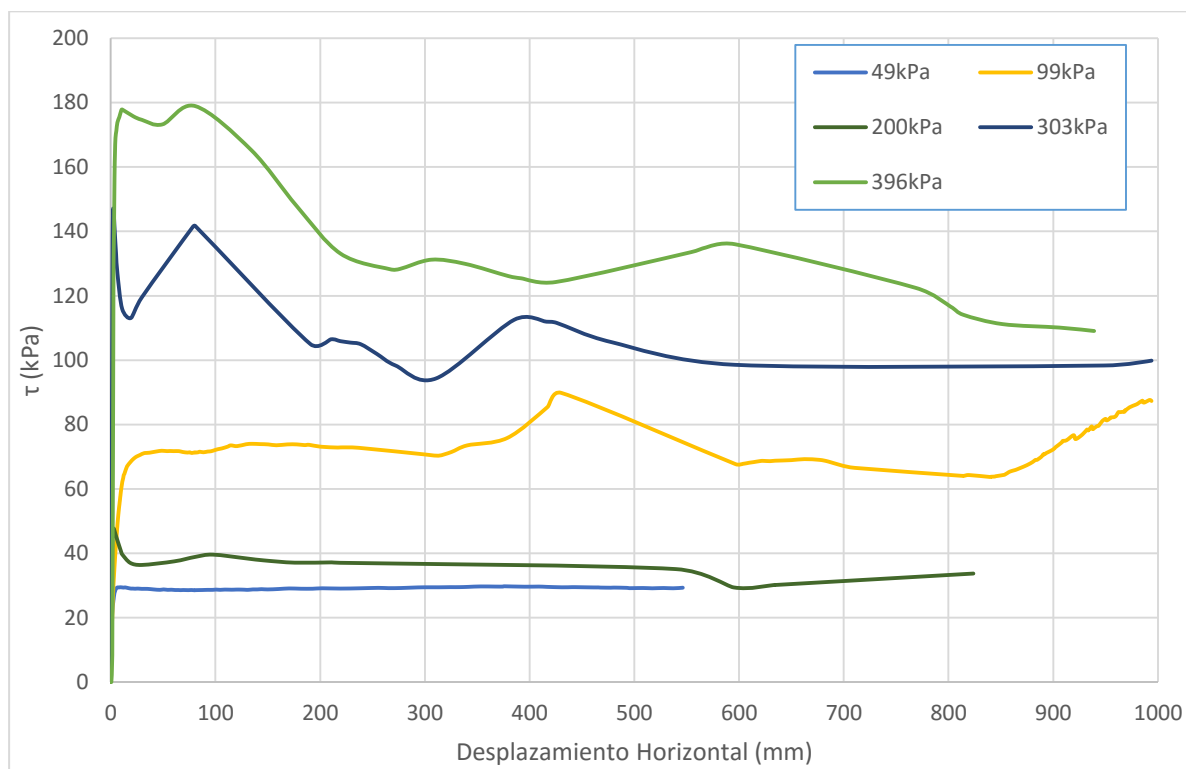


Figura 96. Curvas deformación vertical – deformación horizontal

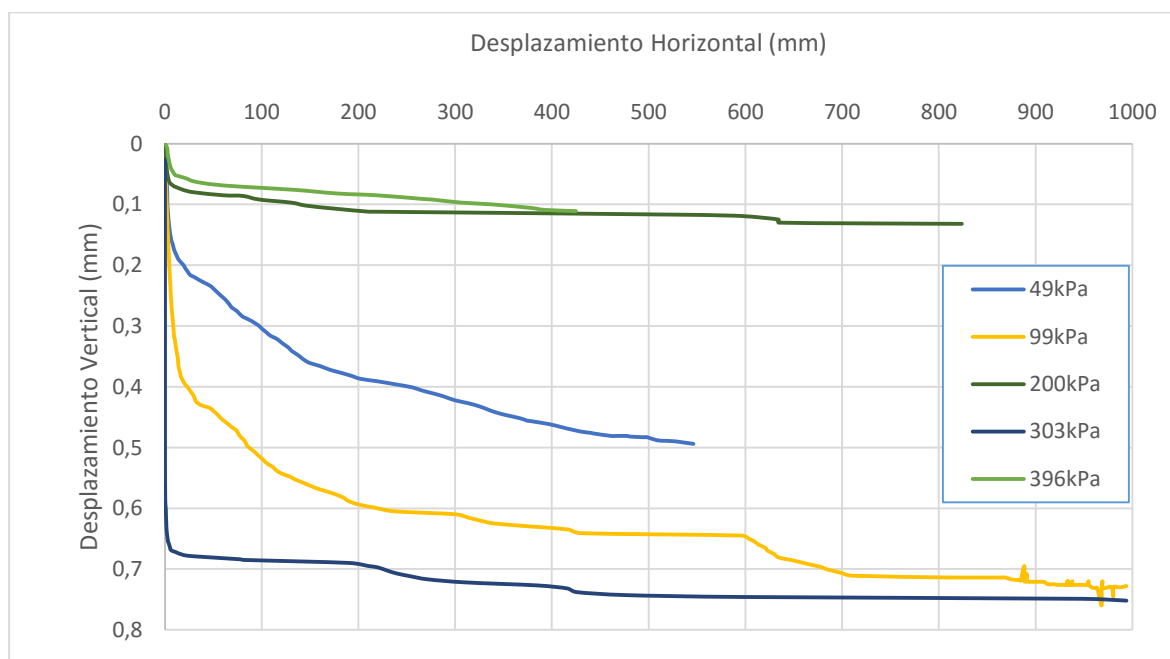


Figura 97. Curvas deformación vertical – deformación horizontal

En la Figura 98 se muestra la superficie de falla de uno de los ensayos. Típicamente para este tipo de ensayos se observó al final de las fallas una superficie de falla puntual y localizada y plana. Igual que para el suelo 1, la superficie de falla se formó como lo describieron Meehan *et. al*/(2007) en la Figura 13: se adhiere el suelo a la tapa superior y lo demás queda fijo en la cavidad anular. Para el suelo 2 se encontró una superficie de falla más lisa.

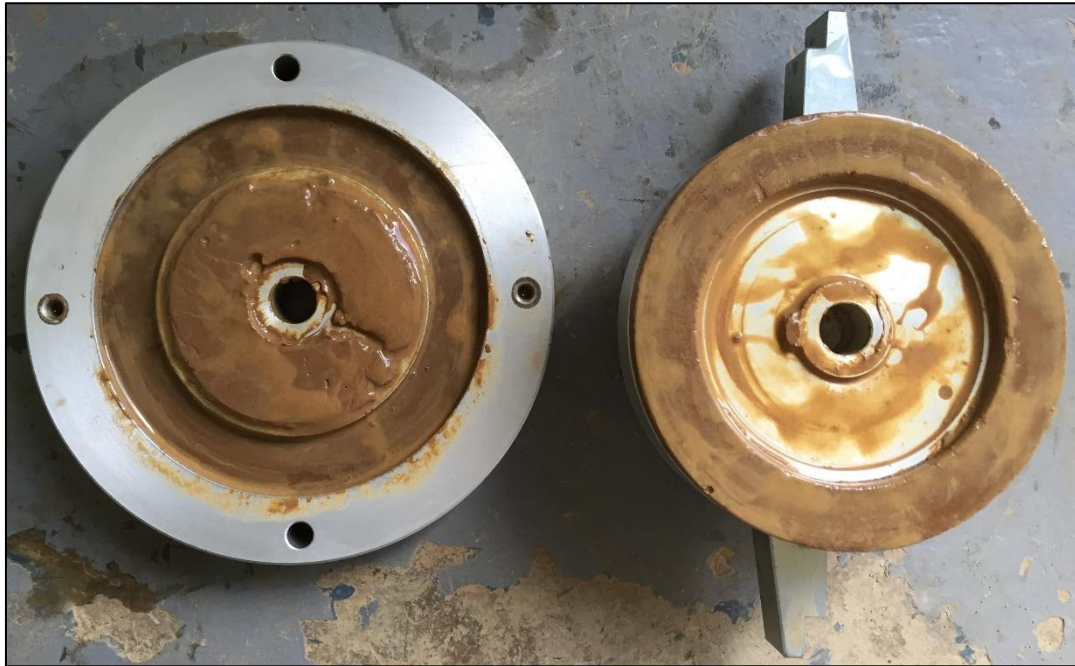


Figura 98. Superficie de falla típica al final de los ensayos del suelo 2 (*Torshear*)

5.2.2.1 Resumen

Como en 5.1.2.1, el Cuadro 22, es un resumen de los resultados más importantes obtenidos en los ensayos de corte torsional en la máquina *Torshear*, ahora para el suelo 2.

Cuadro 22. Resultados de la máquina *Torshear* en el suelo 2

Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo Cortante Residual (kPa)	v (mm/min)	ρ_d (g/cm ³)	w _o	S _o	e _o	w _f	d _r (mm)
49	29	0,367	0,996	70%	100%	4,2	57%	81
99	64	0,341	0,955	71%	100%	4,7	57%	800
200	29	0,517	0,985	70%	100%	4,2	57%	600
303	94	0,93	0,975	75%	100%	5,2	51%	310
396	109	1,464	0,936	76%	100%	5,6	52%	940

6 Análisis de resultados

Inicialmente, en este capítulo, se genera un punto de comparación bibliográfico y teórico de lo esperado en términos de resistencia residual para cada uno de los suelos evaluados.

Los resultados obtenidos con cada una de estas máquinas (*Shearmatic*, *Torshear*), en correspondencia con los objetivos de este trabajo, son interpretados de forma tal que se reporta una resistencia residual en forma de envolvente lineal o curva o en forma puntual para cada uno de los esfuerzos normales utilizados; siempre tomando en cuenta que teóricamente no existe una cohesión real efectiva residual, pero aparece como artificio matemático de ajuste.

Además, en este capítulo, se comparan los equipos utilizados: ambas máquinas y tipos de caja de corte directo y las formas de interpretación de los gráficos resultantes de los ensayos de la máquina *Shearmatic*.

6.1 Resultados esperados

Retomando lo expuesto en el capítulo 3 (características de los suelos utilizados) y capítulo 2 (marco teórico), se puede, antes de analizar los resultados de los ensayos de resistencia residual como tal; tener una idea de lo que se puede esperar del suelo en cuestión. Esto, enmarcando al suelo en un grupo con ciertas características físico-mecánicas y a partir de correlaciones planteadas por otros.

En este capítulo se reportan valores obtenidos de correlaciones mencionadas en el Capítulo 2. Estos valores se analizan y comparan con los obtenidos desde dos puntos de vista: tomándolos como referencia de valores esperados, para validar que los valores obtenidos se encuentran dentro de lo esperado; y tomando los valores obtenidos como referencia para evaluar las correlaciones propuestas por otros autores y validar su potencial de ser utilizadas cuando no hay posibilidad de realizar ensayos de campo y/o laboratorio.

Para el suelo 1, con FA de 42,7% y una actividad de 0,82 se puede leer de la Figura 9 que el ϕ_{rs}' para un esfuerzo normal de 100 kPa es 17°. Ahora, según Figura 10 (Stark & Eid, 1994) considerando el LL de 65 y el FA entre 25 y 45% se puede leer un ϕ_{rs}' de 17° para 700 kPa de esfuerzo normal y 19° para 100 kPa. El suelo 1 presentó predominancia del mineral Caolinita en los análisis mineralógicos realizados por lo que un ϕ_r' cercano a 15° es esperable, la presencia de minerales no arcillosos con estructuras cristalinas puede aumentar el valor del ángulo de fricción.

Para el suelo 2, con FA de 50,4% y una actividad de 0,48 se puede leer de la Figura 9 que el ángulo de resistencia residual secante para un esfuerzo normal de 100 kPa es 10°. Ahora, con la Figura 10 (Stark & Eid, 1994) considerando el LL de 66 y el FA mayor que 50% se puede leer un ángulo de fricción secante de 11° para 700 kPa de esfuerzo normal y 15° para 100 kPa. El suelo 2 presentó predominancia del mineral Caolinita en el análisis de TGA/DTG realizado por lo que un ángulo cercano a 15° es esperable.

Como indican Hawkins & Privett (1985), la curvatura de la envolvente de falla residual depende del tipo de arcilla y la fracción de arcilla, siendo más común encontrar curvaturas más pronunciadas para suelos con una fracción de arcilla mayor. Se podría esperar entonces que para el suelo 1 no se note curvatura y para el suelo 2 sí. Por su parte, para los ensayos con muestra inalterada, en la curvas de esfuerzo-deformación, se puede esperar además de una caída de esfuerzo a razón de un aumento del contenido de agua, una caída prolongada a razón de una reorientación de las partículas, como lo ilustra la Figura 7 (a).

La Figura 7 indica una diferencia en el comportamiento de las curvas cuando el esfuerzo normal aplicado es mayor o menor que la carga de preconsolidación. En el caso de ensayos con muestra remodelada (*Torshear*) no se puede esperar ver esto, puesto que la preparación de la muestra ha "borrado toda memoria" que el suelo pueda tener. En los ensayos de muestra inalterada (*Shearmatic*), la situación es diferente, ahí se aprecia esta diferencia, como lo indica la Figura 3.

En 3.1.3.6.2 se presentaron los resultados de ensayos de Difracción con Rayos X y la interpretación de dichos ensayos. Inicialmente, la idea de implementar estos ensayos iba más allá de cualitativamente describir la composición mineralógica del suelo. Tiwari & Mauri (2005) proponen tres formas de cuantificar las proporciones de la composición mineralógica. Se pretendía utilizar el método de cuentas (cuantificar a partir de la intensidad de los patrones de difracción en términos de cuentas) y luego utilizar estos porcentajes (de Montmorillonita, Caolinita y minerales no arcillosos) para leer el diagrama ternario propuesto por los mismos autores (Figura 11) y evaluar la correlación o comparar este valor, como uno esperado, con los valores obtenidos. A la hora de cuantificar, se obtuvo valores fuera de lo físicamente posible (mayores al 100%), de modo que no fue posible ir más allá de la descripción cualitativa. Además, el equipo de difracción tuvo una falla y estuvo fuera de servicio desde pocos días después de entregadas las muestras hasta cerca del final de la elaboración del trabajo, por lo que no se tuvo oportunidad de ahondar más en el tema realizando más pruebas y refinando la aplicación del método de cuantificación.

También se valoró tomar algunas fotografías con microscopio electrónico de barrido disponible en el CIEMic-UCR, para observar el cambio en la superficie de falla del suelo al entrar en el estado residual. Sin embargo esto no se logró.

6.2 Forma de las curvas esfuerzo-deformación y cambios volumétricos

En esta sección se analiza el comportamiento de las curvas obtenidas con ambos equipos en cada uno de los suelos y su coincidencia con el comportamiento esperado detallado en el marco teórico (especialmente el ilustrado en la Figura 3 y la Figura 7).

Lo analizado en esta sección es demostración de que los ensayos realizados fueron realmente drenados. Sin embargo, ninguno de los equipos utilizados cuenta con dispositivos de medición de la presión de poro para garantizarlo. De no haber sido así se habría obtenido diferencias más notables al comparar el comportamiento obtenido con el esperado, que delatarían que no se logró la condición drenada. Claro está que el objetivo de todo este trabajo finalmente son las envolventes obtenidas por lo que es importante considerar los grupos de ensayos como un todo y no cada ensayo realizado en particular.

6.2.1 Suelo 1

6.2.1.1 *Shearmatic*

Analizando las figuras presentadas en 5.1.1, y comparándolas con el comportamiento teórico esperado (2.2 y 2.3) se conformó el siguiente cuadro comparativo (Cuadro 23).

Cuadro 23. Comparación entre el comportamiento obtenido y el esperado para el suelo 1 (Shearmatic)

Caja	σ' (kPa)	Comportamiento drenado esperado	Esfuerzo-Deformación				Deformación Vertical	
			Pico	Descenso sostenido	Caída en cada ciclo	¿Comportamiento coincide con el esperado?	Cambio volumétrico (1er movimiento)	¿Comportamiento coincide con el esperado?
Cuadrada	49	PC	Evidente	Si	Si	Si	Expansión	Si
	99	PC	Evidente	Si	Si	Si	Expansión relativa ⁶⁴	Si
	196	NC	No	Si	Si	Si	Contracción	Si
Circular	51	PC	No marcado, presente	Si	Si	Si	Expansión relativa	Si
	99	PC	Sutil	Si	Si	No	Contracción	No
	201	NC	Sutil	Si	Si	Si	Contracción	Si

⁶⁴ Se indica como expansión relativa aquella que si bien es expansión se registra con valores negativos en las curvas de deformación vertical.

6.2.1.2 *Torshear*

En las gráficas esfuerzo-deformación se puede ver que existe un primer pico de esfuerzo y luego una caída más "lenta" hacia el estado residual, seguida, rápidamente ($\approx 250\text{mm}$ de deformación)⁶⁵ del estado crítico más estable. Posteriormente en el caso de los esfuerzos más altos (300 y 400 kPa) se puede ver variación en el registro de esfuerzos (subidas y bajadas al estado residual). Si bien se desconoce la razón que causa estas variaciones habiendo entrado ya en el estado residual es valioso que no se reportan bajas (ya habiendo encontrado la estabilidad en las mediciones de esfuerzo), es decir que se puede tener confianza en el valor de esfuerzo residual elegido a partir de los gráficos.

Como se indicó antes que se podría esperar, no es posible ver un pico más acentuado (inicial) en las curvas esfuerzo-deformación de esfuerzos normales mayores a la carga de preconsolidación. El comportamiento de todas las curvas es como el normalmente consolidado de la Figura 7. Un pico inicial para un suelo preconsolidado sería mayor que los que se pueden ver en estas gráficas, como los que se pueden ver en las gráficas obtenidas para esfuerzos normales de 50 y 100 kPa con muestra inalterada (Figura 56 y Figura 59).

Las curvas de deformación vertical demuestran siempre contracción, que es lo esperable: un comportamiento drenado para un suelo NC⁶⁶.

6.2.2 Suelo 2

6.2.2.1 *Shearmatic*

La gráfica de esfuerzo-deformación para 49 kPa (Figura 87) de esfuerzo normal es de las tres la única que tiene un pico marcado: un comportamiento de una arcilla rígida o preconsolidada (al compararla con este esfuerzo). En la misma gráfica ahora para 101 kPa (σ') hay un pico (Figura 90), pero no es marcado: hay una disminución (posterior a la deformación pseudo-elástica y la resistencia pico) pero es pequeña. En la gráfica de 199 kPa (σ') no hay disminución del esfuerzo cortante medido (Figura 93)⁶⁷. En el Cuadro 14, se reporta un esfuerzo de preconsolidación de 120 kPa por lo que este comportamiento es el esperado.

⁶⁶ NC por ser una muestra remoldeada

⁶⁷ En esta más bien hay un aumento sutil, no considerable.

Las gráficas de deformación vertical son consecuentes con este comportamiento (drenado PC). A pesar de que en la primera (Figura 88. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 49 kPa)) no hay una expansión como tal, si hay una expansión relativa después de algunos milímetros de deformación horizontal⁶⁸. En la segunda y tercera hay sólo contracción (comportamiento drenado NC)⁶⁹. (Figura 91. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 101 kPa) y Figura 94. Gráfico deformación vertical – deformación horizontal (Esfuerzo Normal 199 kPa))

6.2.2.2 *Torshear*

Los gráficos de esfuerzo-deformación (Figura 96) con este suelo, en esta máquina, resultaron comportarse de forma un poco inusual: diferente a lo que pasó con el suelo 1, para este suelo en las gráficas no hay una estabilidad tan clara como la que se encontró para el suelo 1:

- Para la de 49 kPa todo es normal
- Para la de 99 kPa se puede ver que primero se ha entrado en un “valle” estable pero luego hay un aumento y el valor estable posterior al aumento es menor que el primer valle.
- Para la de 200 kPa se puede ver un comportamiento estable desde los 400mm de deformación pero el valor reportado es el coincidente con 600mm de deformación, donde hay una baja.
- Para la de 300 kPa se puede ver que se alcanza la estabilidad (600mm de deformación) pero el valor reportado de resistencia residual es el menor (coincidente con 300mm de deformación)
- Para la de 400 kPa no se logra encontrar un comportamiento estable por lo que se toma el último valor registrado (que es el menor).

En el caso de las curvas para 99, 100 y 200 kPa de esfuerzo normal, la diferencia entre el valor tomado y el valor estable no es de más de 5 kPa por lo que se considera que esto no afecta el comportamiento de las envolventes residuales. Se considera que los altibajos o irregularidades opacan la estabilidad de la curva para 400 kPa, pero se debe reportar un valor. Al menos es positivo que si existe una tendencia hacia el punto tomado como el

⁶⁸ Registrada como valores constantes de deformación vertical. La observación va más dirigida a un cambio en el comportamiento de la gráfica que cualquier otra cosa.

⁶⁹ Para 101kPa (σ') el comportamiento no es claramente definido NC o PC: σ' es muy cercano a σ_{PC} como para esperar diferencia evidente.

estado residual. Por este mismo comportamiento es difícil definir un d_r , se reporta (Cuadro 22) el que coincide con τ_{residual} , pero con cierta reserva.

No se sabe con claridad a qué atribuir estas irregularidades, tanto en las curvas de este suelo como del primero (300 y 400 kPa). Es posible que, la muestra del suelo 2, por tener una densidad tan baja y una relación de vacíos alta, atrapaba aire en burbujas⁷⁰, al moverse la muestra con el anillo. Las burbujas de aire dentro de la pasta de suelo resisten presión (generan una subida en la gráfica) y luego ceden (vuelve el registro de esfuerzos al valor residual). Esto es coincidente con el hecho de que por lo general antes de estos picos ya se había entrado en un estado residual y luego se vuelve a él.

Las curvas de deformación vertical demuestran siempre contracción (Figura 97), igual que para el suelo 1, era lo esperado.

Sin embargo en al menos en las tres primeras curvas (49, 99 y 200 kPa) esfuerzo deformación, es visible que no hay, entre 50 y 200 mm de deformación, una disminución sostenida de τ . Este comportamiento, presente en el suelo 1, que se otorga a la reorientación de las partículas no es visible en el suelo 2.

6.2.3 Contenido de humedad

Se ha descrito el comportamiento de los suelos durante los ensayos en esta sección, en parte, los cambios volumétricos que sufrieron las muestras. Los cambios volumétricos del suelo pueden estar relacionados con los cambios en el contenido de humedad.

En las muestras de ambos suelos el comportamiento de w fue similar y sigue una tendencia que se considera es la esperada y está en concordancia con los comentarios expuestos anteriormente en esta sección: para los ensayos realizados en la Torshear el w_0 resultó ser mayor que w_f (w disminuye) y en la Shearmatic w_0 es menor (w aumenta).

Se debe destacar que en los ensayos para el suelo 1 en la máquina *Shearmatic* algunos valores de w_f son mayores (hasta 10% aprox.) que la humedad de saturación reportada para este suelo. Esto no debería haber sucedido. No se encontró una razón especial para que esto sucediera. Se considera que este error se encuentra dentro de un margen aceptable de variabilidad entre los valores reales y reportados de w .

⁷⁰ En el suelo 1 la razón sería la misma pero las muestras de este al tener relaciones de vacíos más bajas y densidades más altas, no presentaron este comportamiento hasta encontrarse con esfuerzos más altos, en los que se esperaría haya reacomodos más bruscos.

6.3 Resultados obtenidos en la máquina Shearmatic

6.3.1 Resistencia pico encontrada

Este trabajo no trata principalmente de resistencia pico, sin embargo es posible determinar la resistencia pico del material estudiado a partir de los datos encontrados, reportados en el Cuadro 19 y el Cuadro 21.

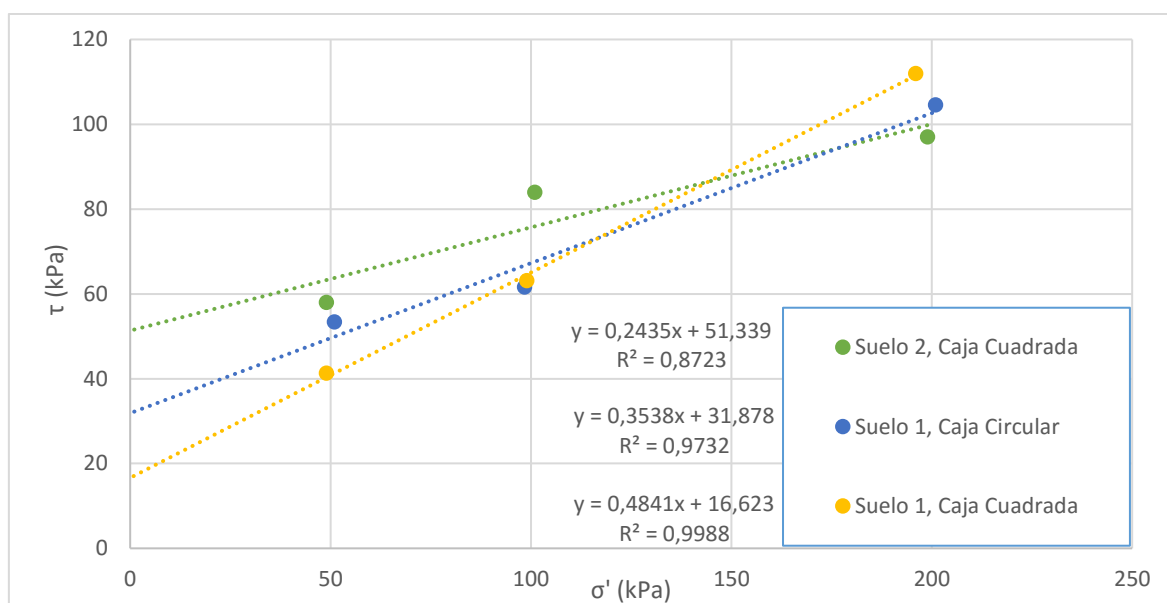


Figura 99. Envolventes de resistencia pico sin considerar corrección de área⁷¹

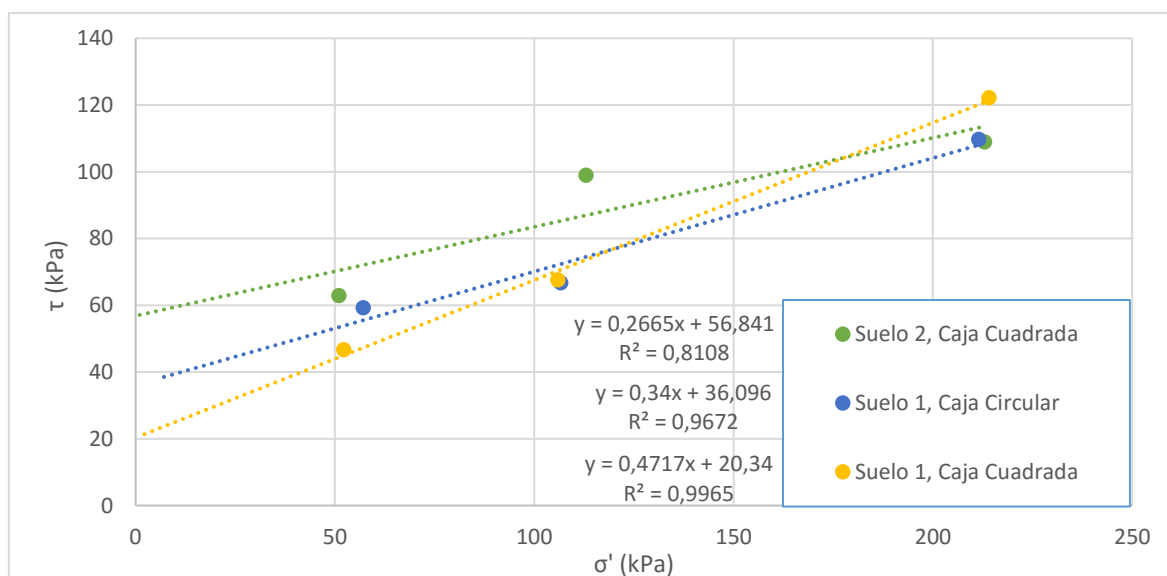


Figura 100. Envolventes de resistencia pico considerando corrección de área

⁷¹ Desde este gráfico y en adelante, para las envolventes con ajustes, se reporta la ecuación de mejor ajuste y el R^2 justo al lado de la leyenda de los datos en cuestión.

Cuadro 24. Envolventes de resistencia pico

Suelo	Caja	Corrección de área		Sin corrección de área	
		c'(kPa)	ϕ' (°)	c'(kPa)	ϕ' (°)
1	Circular	36,1	18,8	31,9	19,5
	Cuadrada	20,3	25,8	16,6	25,3
2	Cuadrada	56,8	14,9	51,3	13,7

A partir de lo anterior es notable que:

- La corrección de área no afecta mucho los valores que describen las envolventes. Los valores de ángulo de fricción son casi iguales, los valores de cohesión son similares, pero es sabido que son más influyentes a la hora de realizar un análisis de estabilidad de taludes.
- Al comparar los valores obtenidos con las diferentes cajas, para el suelo 1, se puede ver que se reportan valores distintos, la cohesión es más baja y el ángulo de fricción más alto en la caja cuadrada, lo que se puede considerar más conservador.
- La cohesión en el suelo 2 es mayor y el ángulo de fricción menor que en el suelo 1.

6.3.2 Análisis de caída (en cada ciclo) de resistencia reportada

Como es sabido, la máquina *Shearmatic* funciona deformando la muestra de forma cíclica. El valor de resistencia medido al final de cada movimiento es el valor de resistencia residual que se tomaría, en caso de ser este el último movimiento. A excepción de que ya se haya reportado un valor más bajo en un movimiento anterior, este caso ocurrió en escasas ocasiones.

La curva verde de la Figura 101 es otra forma de presentar los resultados antes expuestos: con el desplazamiento acumulado en el eje x, en vez de la posición o el desplazamiento simple. La línea amarilla y la línea roja pasan por los valores finales de resistencia cada movimiento. Estas tienen una pendiente negativa, porque los valores disminuyen. Esta pendiente se reduce conforme se avanza por el eje x porque la línea converge a un valor es decir que los valores dejarán de disminuir, o al menos es lo que se espera.

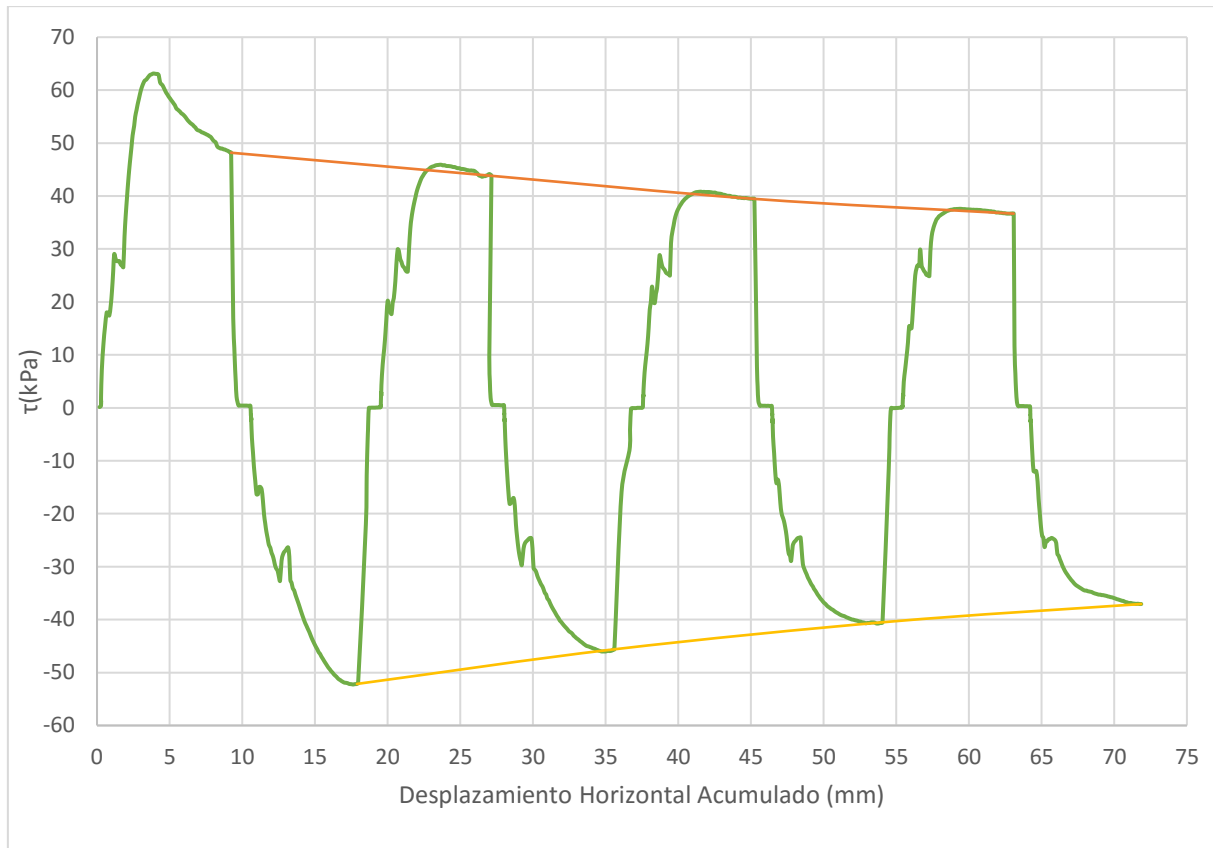


Figura 101. Resultado ensayo de corte directo "reversivo" (suelo 1, 99 kPa)

Hay preguntas que es importante resolver al analizar los valores de ángulo de fricción y cohesión o las curvas de resistencia que se presentan más adelante. Estas son:

1. ¿Cuál es el valor de resistencia residual que se debe tomar, el leído cuando la deformación es hacia adelante (dirección de falla) o en el retorno?
2. ¿Estos deberían ser iguales?
3. ¿Son iguales?
4. ¿Realmente se ha alcanzado un valor estable de resistencia residual en cada ensayo?
5. ¿Se puede alcanzar esta estabilidad en este ensayo?

Para aclarar estos temas se confeccionaron el Cuadro 25 y el Cuadro 26⁷². En estos se reporta ese último valor de resistencia medido al final de cada movimiento y se compara con el mismo movimiento en el ciclo anterior (Adelante-Adelante; $\Delta A-A$) (Retorno-Retorno; R-R) y con el movimiento contrario del mismo ciclo (Adelante-Retorno; $\Delta A-R$).

⁷² Los datos analizados esta sección son sin corrección de área.

Cuadro 25. Análisis de caída de la resistencia para ensayos realizados con el suelo 1

σ' (kPa)	Caja	Ciclo	Esfuerzo de corte al final del avance (kPa)	Esfuerzo de corte al final del retorno (kPa)	$\Delta A-R$	$\Delta A-A$	$\Delta R-R$
49	Circular	1	39,55	31,73	19,80%		
		2	31,92	29,63	7,20%	-19,30%	-6,60%
		3	29,66	28,45	4,10%	-7,10%	-4,00%
		4	27,54			-7,10%	
98	Circular	1	51,73	43,02	16,80%		
		2	45,79	40,44	11,70%	-11,50%	-6,00%
		3	42,41	36,02	15,10%	-7,40%	-10,90%
		4	39,61	33,06	16,50%	-6,60%	-8,20%
		5	37,61	30,39	19,20%	-5,00%	-8,10%
201	Circular	1	110,59	87,57	20,80%		
		2	77,1	82,22	-6,60%	-30,30%	-6,10%
		3	70,39	76,63	-8,90%	-8,70%	-6,80%
		4	65,69	71,44	-8,80%	-6,70%	-6,80%
		5	61,21	67,44	-10,20%	-6,80%	-5,60%
49	Cuadrada	1	29,44	25,44	13,60%		
		2	27,73	26,25	5,30%	-5,80%	3,20%
		3	26,3	26,27	0,10%	-5,20%	0,10%
		4	25,75	25,88	-0,50%	-2,10%	-1,50%
		5	25,23	25,83	-2,40%	-2,00%	-0,20%
99	Cuadrada	1	48,17	52,15	-8,30%		
		2	43,82	45,61	-4,10%	-9,00%	-12,50%
		3	39,46	40,39	-2,40%	-9,90%	-11,40%
		4	36,67	37,06	-1,10%	-7,10%	-8,20%
196	Cuadrada	1	98,81	89,12	9,80%		
		2	88,3	83,49	5,40%	-10,60%	-6,30%
		3	80,49	77,34	3,90%	-8,80%	-7,40%
		4	74,44	72,3	2,90%	-7,50%	-6,50%
		5	68,95	68,85	0,10%	-7,40%	-4,80%

Cuadro 26. Análisis de caída de la resistencia para ensayos realizados con el suelo 2

σ' (kPa)	Caja	Ciclo	Esfuerzo de corte al final del avance (kPa)	Esfuerzo de corte al final del retorno (kPa)	$\Delta A-R$	$\Delta A-A$	$\Delta R-R$
49	Cuadrada	1	39,29	29,87	24,0%		
		2	38,49	28,13	26,9%	-2,0%	-5,8%
		3	37,63	28,73	23,7%	-2,2%	2,1%
		4	37,34	28,86	22,7%	-0,8%	0,5%
		5	37,58	28,70	23,6%	0,6%	-0,6%
101	Cuadrada	1	80,17	72,52	9,5%		
		2	77,86	75,00	3,7%	-2,9%	3,4%
		3	78,07	74,24	4,9%	0,3%	-1,0%
		4	77,26	73,96	4,3%	-1,0%	-0,4%
		5	76,74	73,28	4,5%	-0,7%	-0,9%
		6	76,30	73,13	4,2%	-0,6%	-0,2%
199	Cuadrada	1	97,29	98,43	-1,2%		
		2	100,44	104,76	-4,3%	3,2%	6,4%
		3	100,80	105,46	-4,6%	0,4%	0,7%
		4	100,00	105,13	-5,1%	-0,8%	-0,3%
		5	99,29	104,50	-5,2%	-0,7%	-0,6%
		6	98,83	103,88	-5,1%	-0,5%	-0,6%
		7	98,26	103,33	-5,2%	-0,6%	-0,5%

No se encontró aportes bibliográficos que ayudasen a responder con determinación el **primer cuestionamiento**. Sin embargo, Skempton (1985) menciona que se debe preferir medir los valores de resistencia en una sola dirección (en este caso se hizo en ambas) ya que en el sitio de un eventual desplazamiento de una masa de suelo, este sería en una sola dirección. No es claro al respecto de cómo hacerlo; si se quita la carga en el retorno existe una relajación que puede ser influyente en los resultados y no se da en el sitio, si no se quita la carga pero se realiza el retorno a otra velocidad, existe la posibilidad de que no se libere la presión de poro adquirida en este movimiento; si se realiza el retorno con la carga y con la misma velocidad de la falla. No medir los valores de resistencia residual es como taparse los ojos mientras la caja de corte realiza el retorno de forma que se considera que lo mejor es tomar los datos y que generen un aporte a pesar de que no se comprenda a cabalidad lo que implican o significan al compararse con los datos reales o retro calculados del sitio.

Más adelante se debe tomar en consideración que en el sitio la deformación no cambia de dirección, lo que empujaría por tomar los valores medidos hacia adelante como los más

correctos pero ¿por qué? Si según el concepto estos valores deberían ser iguales al existir una superficie de falla en estado residual. Lo que lleva al **segundo cuestionamiento**. Sí, deberían ser iguales, si las partículas de suelo estuviesen totalmente paralelas a la superficie de falla; pero no se puede comprobar que suceda esto en un 100%, ni si es posible para las partículas (por su tamaño, forma y textura) existentes en esta superficie; además el cambio de dirección puede trabajar en contra de que se alcance esta configuración paralela. Esto y el Cuadro 25 y Cuadro 26 (en la columna $\Delta A-R$, del mismo ciclo) responden la **pregunta 3**: Los valores sí parecen ser iguales, o muy similares, sólo en 3 de 9 ensayos se supera una diferencia del 6% en el valor de resistencia residual en el último ciclo medido; pero en 3 de 9 se superó esta diferencia y esto no implica que el ensayo esté mal o los valores mal medidos o influenciados por la dirección del movimiento. No se puede establecer una relación de la resistencia con la dirección del movimiento, i.e. no coincide un valor mayor con el movimiento hacia adelante o viceversa.

Más adelante se analizan estas consideraciones (valores hacia adelante, o retorno y ambos). Se retoma este punto como aporte para concluir cuál forma de reportar la resistencia residual es mejor.

Antes se indicó que las líneas de color rojo y amarillo de la Figura 101 convergerían o esto sería lo esperado; para evaluar qué tan cierto es esto, de paso respondiendo **la cuarta inquietud**, se puede tomar en cuenta las columnas $\Delta R-R$ y $\Delta A-A$ del Cuadro 25 y Cuadro 26. Estas columnas representan el cambio porcentual que hubo en las mediciones de resistencia de un ciclo a otro:

- Para el suelo 2 son menores que un 1% desde el tercer ciclo y menores que un 2,5% desde el segundo, en todos los ensayos. Se puede considerar estos valores de cambio insignificantes lo que significa que rápidamente se ha alcanzado la estabilidad en las mediciones. Por esta razón los valores de d_r reportados son mucho menores que para el suelo 1.
- Para el suelo 1 no se puede decir lo mismo, pero si se puede ver que a partir del segundo ciclo en cada ciclo estos porcentajes tienden a la baja por lo que se puede comprobar que habrá una convergencia. Ahora, si se considera que un cambio de un 8% ya es despreciable entonces en todos los casos se ha alcanzado la estabilidad de la medición de resistencia.

Por lo anterior se puede corroborar lo supuesto antes: se alcanza la estabilidad o el estado residual en 5 ciclos y en algunos casos en 4. Claro está, que esto depende del criterio de aceptación que se utilice para determinar esto.

En todos los casos excepto uno (caja circular, suelo 1, 98 kPa, $\Delta R-R$) la diferencia entre un ciclo y el siguiente (en resistencia medida) disminuye, lo que comprueba que se puede alcanzar la estabilidad. La **pregunta 5** se discute en esta sección porque, analizando los datos crudos (no porcentuales, diferenciales) se puede ver que siempre hay una disminución en el valor de resistencia medido. Además, en el caso del suelo 1 se observó que al realizarse los ensayos se perdía mucho material (desprendido de la superficie de falla) durante el ensayo, lo que podría estar modificando la superficie de falla y por lo tanto disminuyendo los valores de resistencia obtenidos en cada ciclo (no se descarta esta posibilidad, solo el hecho de que por esta razón no se alcanzaría la estabilidad).

Dos aportes importantes adicionales de esta sección son los siguientes:

Al comparar los valores de $\Delta A-R$ se puede notar que los valores son menores al utilizar la caja cuadrada (con el suelo 1, Cuadro 25). Esto puede deberse a que existe una menos influyente condición de frontera. Por esta razón para el suelo 2 se utilizó solo la caja cuadrada.

En general los valores de $\Delta A-R$, $\Delta A-A$ y $\Delta R-R$ son menores en el suelo 2, casi nulos (Cuadro 26). El comportamiento es distinto al del suelo 1. Se alcanza la estabilidad más rápidamente. Esto puede ser un indicador de que las partículas de ambos suelos se comportan de forma distinta respaldando lo planteado en el marco teórico de este trabajo. En el suelo 2 parece no haber disminución (o hay poca) asociada a la reorientación de partículas, sólo a la caída post-pico (en los ensayos realizados por debajo de la carga de preconsolidación); un comportamiento más similar a Figura 7 (b). Esto también se pudo ver en las gráficas obtenidas con la máquina *Torshear* (se menciona al final de 6.2.2.2).

Este comportamiento puede ser un indicador de que es necesario revisar más que la fracción de arcilla para predecir uno u otro comportamiento, tal vez esto esté más relacionado con A . Ya Skempton (1964), había sugerido correlaciones y una gran relación entre los parámetros de resistencia y A .

6.3.3 Resistencia residual encontrada

Como se mencionó antes, se puede reportar la resistencia residual de diferentes formas:

Skempton (1985) propone hablar de la resistencia residual del suelo a un esfuerzo normal efectivo (σ'), como el ángulo de fricción residual secante (ecuación (5)): la tangente inversa del coeficiente de fricción residual (τ_r/σ'), considerando nula la cohesión.

$$\phi'_r = \tan^{-1} \left(\frac{\tau_r}{\sigma'} \right) \quad (5)$$

Esta orientación tiene sentido ya que en numerosos ensayos realizados por quien la propone no se encontraron valores de cohesión considerables, sin embargo otros si los han encontrado de forma tal que la envolvente de falla es curva (como explican Hawkins & Privett (1985)) o lineal (como comúnmente se expresan las envolventes pico) considerando que existe una fuerza que se deja pasar como cohesión sin definitivamente saber cómo se genera o explica, ya que, en teoría, para haber alcanzado el estado residual se ha roto la estructura del suelo, dejando este de poder considerarse un sólido para formar dos, *i.e.* la cohesión efectiva en el estado residual no existe.

A continuación se presentan estas tres formas de reportar la resistencia residual a partir de los resultados obtenidos con esta máquina.

6.3.3.1 Ángulo de fricción residual secante efectivo (ϕ'_{rs})

Cuadro 27. Ángulos de fricción residual secante (ϕ'_{rs}) obtenidos con la máquina Shearmatic

Suelo	Caja	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo Cortante Residual Arriba (kPa)	ϕ'_{rs} (°)	Esfuerzo Cortante Residual Abajo (kPa)	ϕ'_{rs} (°)
1	Circular	51	28	28,8	29	29,6
	Circular	98	38	21,2	30	17,0
	Circular	201	66	18,2	62	17,1
	Cuadrada	49	25	27,0	26	27,9
	Cuadrada	99	37	20,5	37	20,5
	Cuadrada	196	69	19,4	69	19,4
2	Cuadrada	49	37	37,1	29	30,6
	Cuadrada	101	76	37,0	72	35,5
	Cuadrada	199	97	26,0	98	26,2

A partir del Cuadro 27 se puede observar que:

- Los valores calculados con los valores de resistencia medidos hacia adelante y hacia atrás son muy similares, esto como refuerzo de lo que ya se había mencionado en la sección anterior.
- Los ángulos del suelo 2 son mayores que los del suelo 1
- El valor del ángulo de fricción secante disminuye con el aumento en esfuerzo normal. Esto puede respaldar la idea de que la resistencia residual depende del esfuerzo normal y la envolvente real es curva o bien, de que existe una fuerza que en el ajuste lineal de los datos analizados, se comporta como cohesión.

6.3.3.2 Envolvente de falla residual curva

Se puede ver en la Figura 102 que es posible considerar la envolvente como una curva a pesar de que al parecer el comportamiento es más lineal. Para tener un criterio más completo deberían considerarse más puntos para la curva; cosa que no es posible con las condiciones limitantes de este equipo, mencionadas anteriormente. Cabe destacar que en este sentido los valores obtenidos con las diferentes cajas son muy similares.

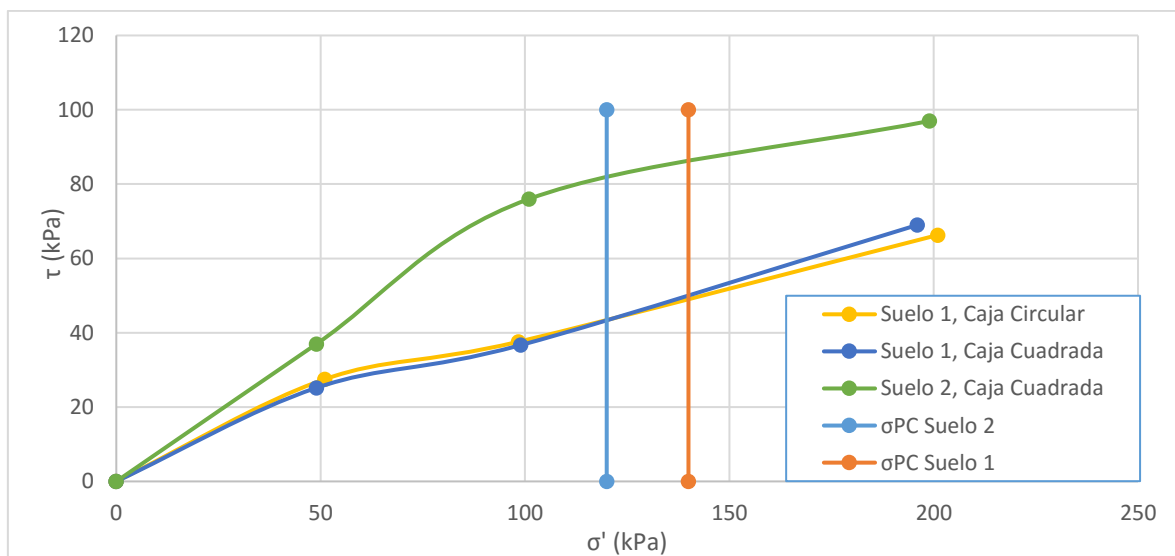


Figura 102. Envolventes curvas de falla residual (Shearmatic)⁷³

Más adelante, en 6.4.1.2 se retoma este tema con los resultados del otro equipo, y más datos para esfuerzos normales más altos.

6.3.3.3 Envolvente lineal

⁷³ Los valores reportados son los leídos "arriba" en las gráficas esfuerzo-deformación

En esta sección y en 6.4.1.3 se abordan los resultados desde una perspectiva que ajusta la envolvente de falla residual a una recta.

6.3.3.3.1 Considerando intercepto cero

Si se obliga el ajuste de los datos a pasar por el origen, que en teoría es correcto; se obtiene lo siguiente:

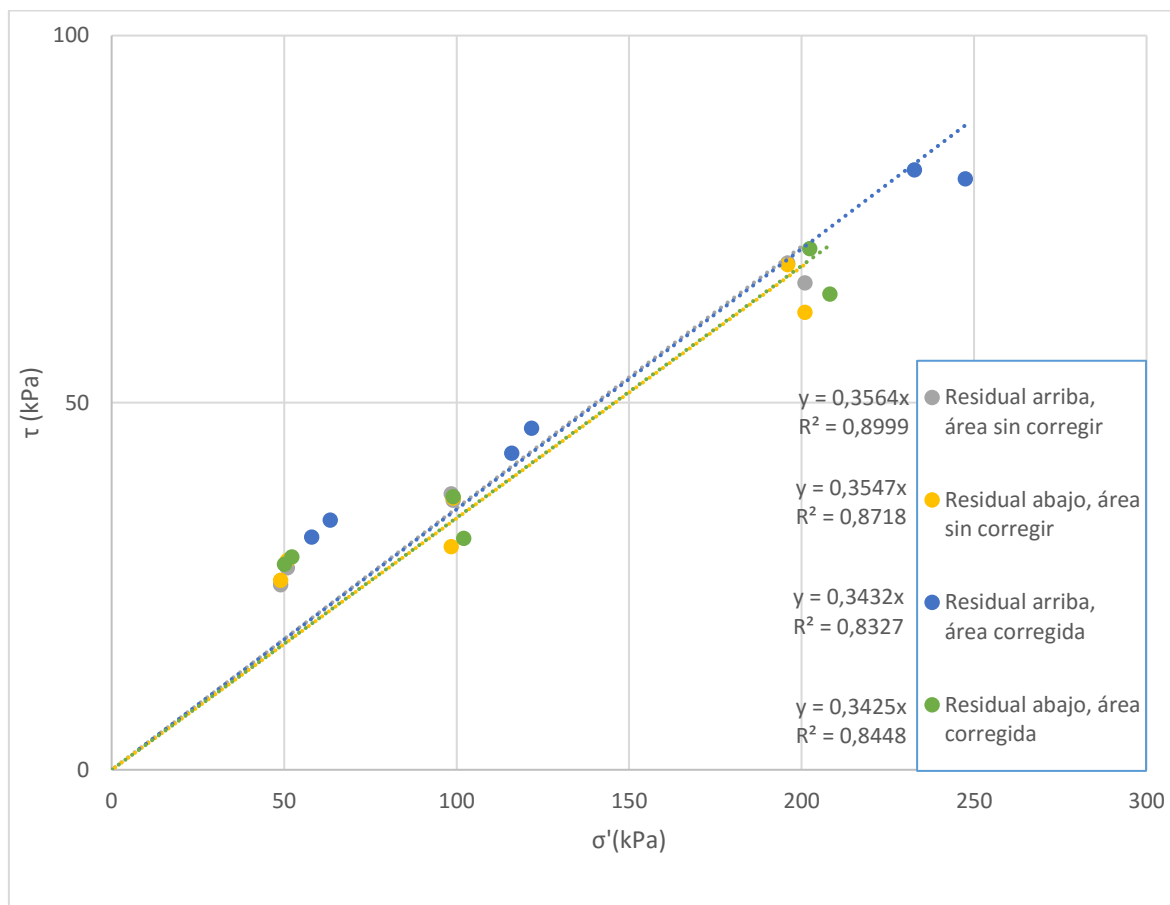


Figura 103. Envolventes lineales para el suelo 1 (cohesión cero) [caja cuadrada y caja circular]

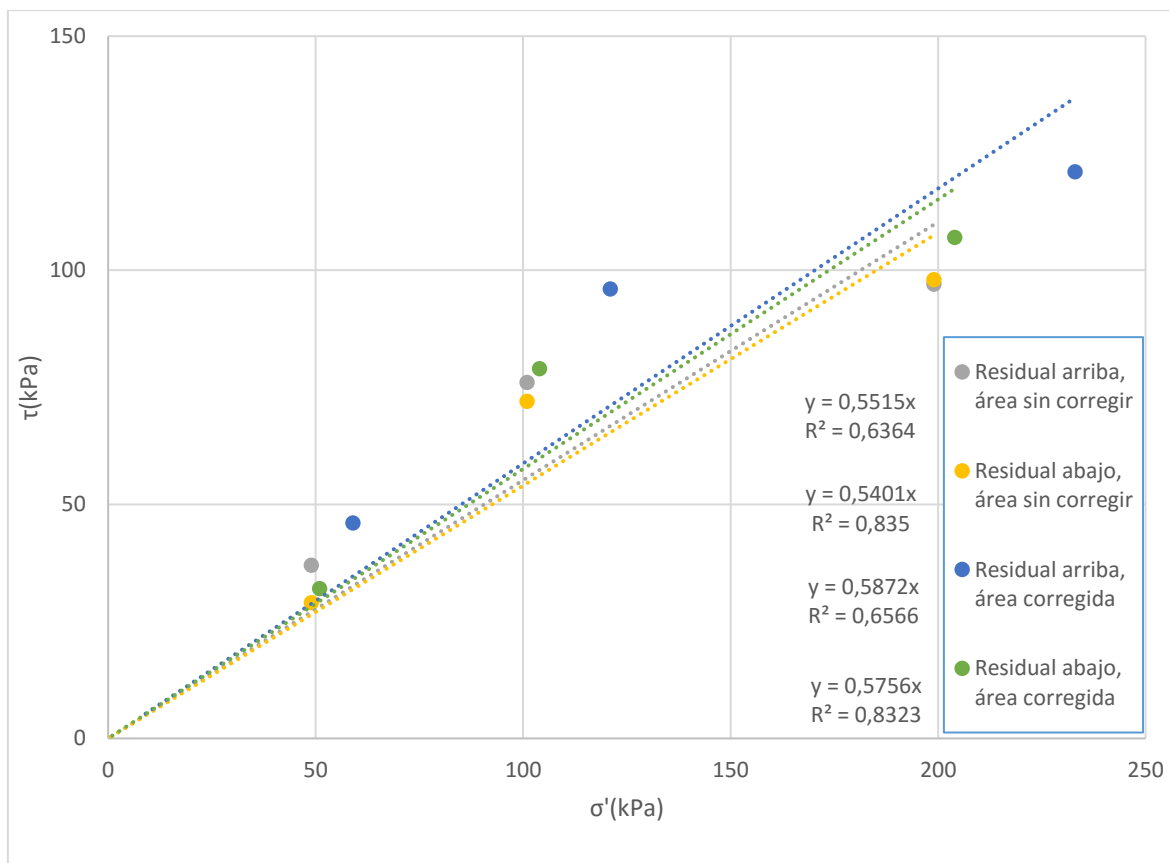


Figura 104. Envolventes lineales para el suelo 2 (cohesión cero)

Indistintamente de si se considera la corrección de área, o se lean los datos “arriba” o “abajo”, es evidente que se está ignorando el grupo de datos obtenidos para 49 kPa (Suelo 1, Figura 103) o para 99 kPa (Suelo 2, Figura 104). Hay una manipulación de datos innecesaria y además es demasiado conservador ignorar que puede existir una cohesión, al menos de ajuste.

Cuadro 28. Envolventes lineales con cohesión cero (Shearmatic)

Suelo	Área	Medición	ϕ_r' (°)
1	Sin Corregir	Arriba	19,6
		Abajo	19,6
	Corregida	Arriba	18,9
		Abajo	18,9
2	Sin Corregir	Arriba	28,9
		Abajo	28,4
	Corregida	Arriba	30,4
		Abajo	29,9

6.3.3.3.2 Considerando intercepto de ajuste

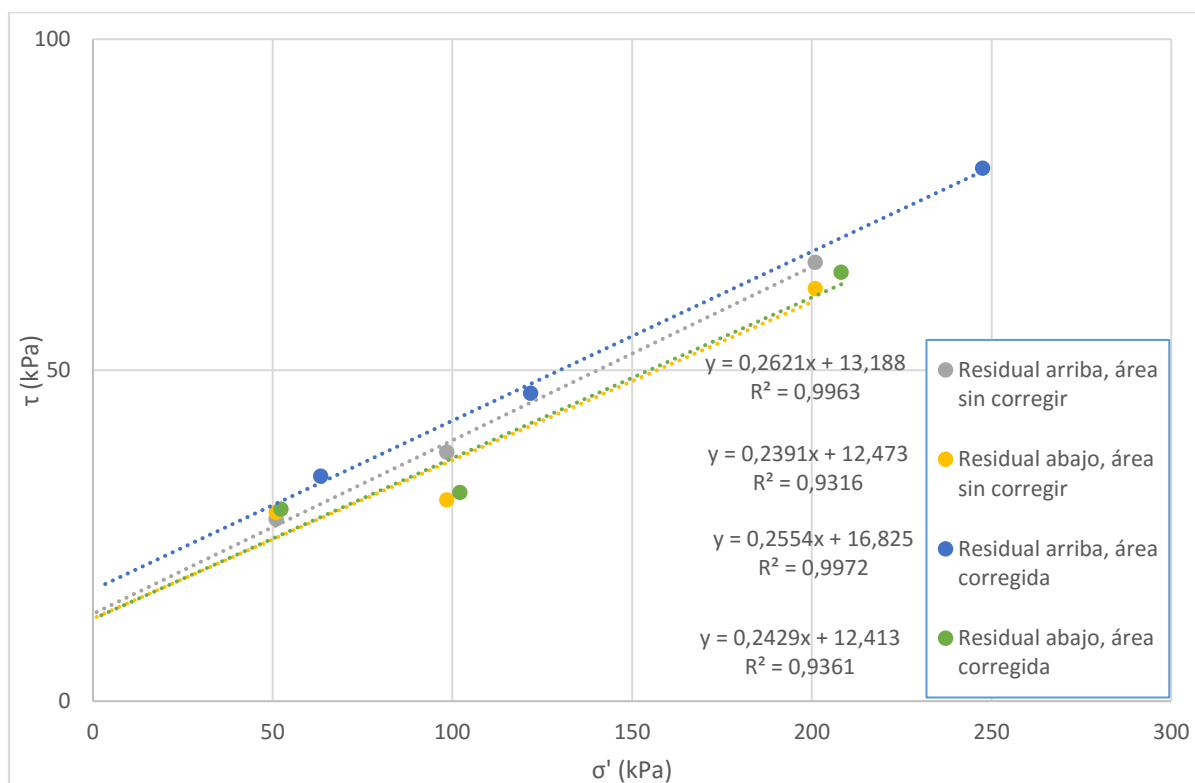


Figura 105. Envolventes lineales para el suelo 1 (cohesión de ajuste) [caja circular]

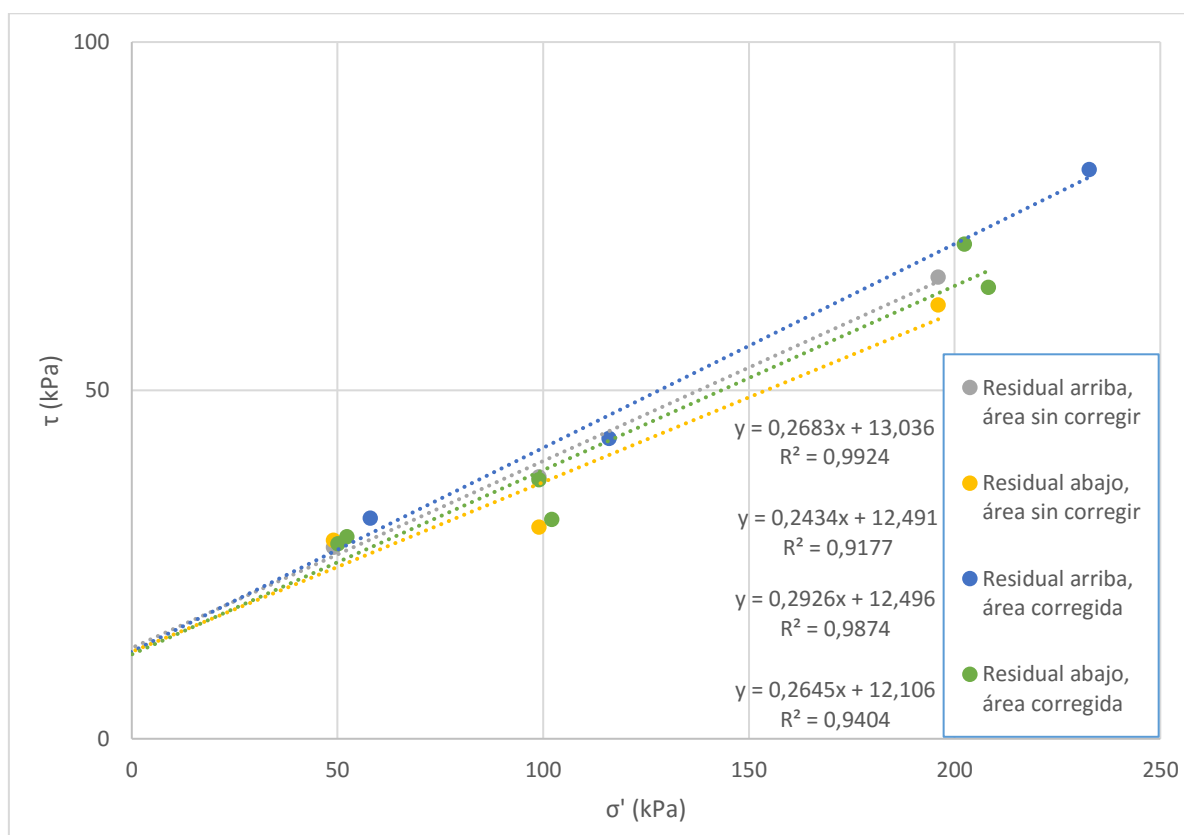


Figura 106. Envolventes lineales para el suelo 1 (cohesión de ajuste) [caja cuadrada]

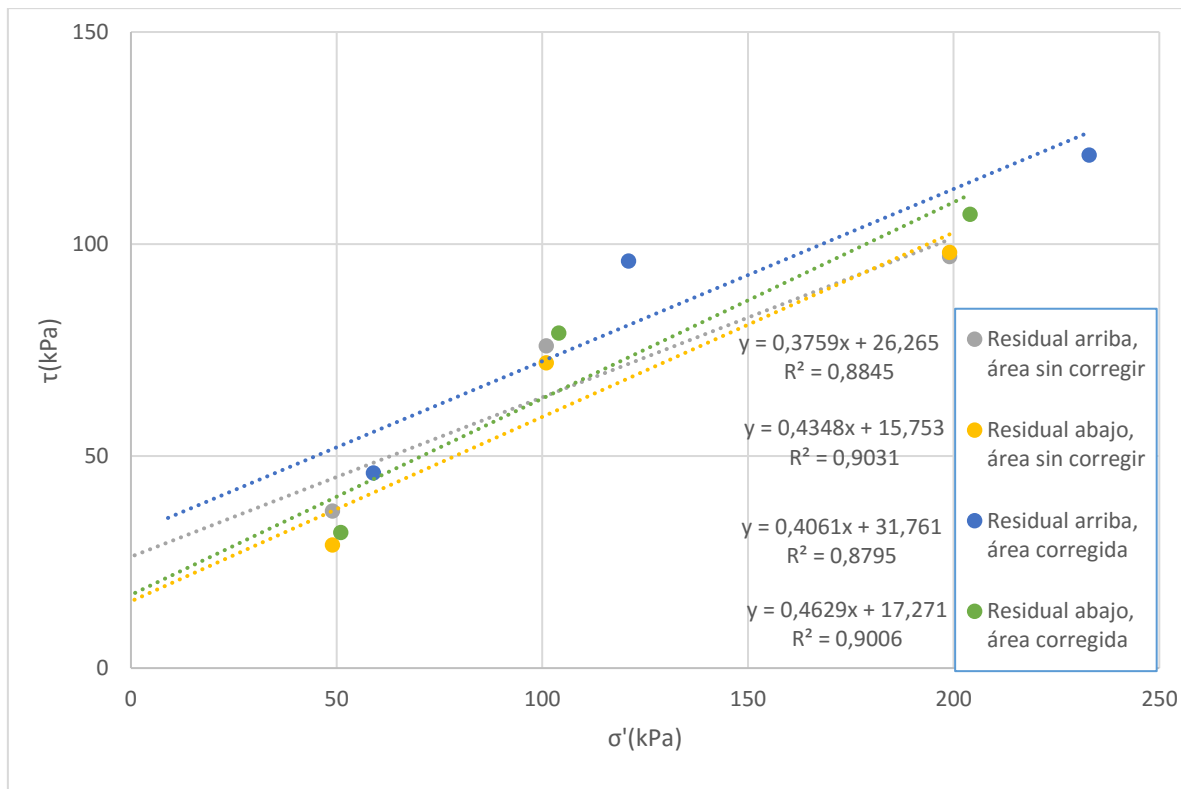


Figura 107. Envolventes lineales para el suelo 2 (cohesión de ajuste)

Se resume la información anterior en el Cuadro 29 :

Cuadro 29. Envolventes lineales con cohesión de ajuste (Shearmatic)

Suelo	Caja	Área	Medición	$\phi_r'(^{\circ})$	$c' \text{ (kPa)}$
1	Circular	Sin Corregir	Arriba	14,7	13,2
			Abajo	13,4	12,5
		Corregida	Arriba	14,3	16,8
			Abajo	13,7	12,4
	Cuadrada	Sin Corregir	Arriba	15,0	13,0
			Abajo	13,7	12,5
		Corregida	Arriba	16,3	14,5
			Abajo	14,8	12,1
2	Cuadrada	Sin Corregir	Arriba	20,6	26,3
			Abajo	23,5	15,8
		Corregida	Arriba	22,1	31,8
			Abajo	24,8	17,3

A partir de esta información se puede ver que:

- Los valores de cohesión efectiva (de ajuste) y ángulo de fricción efectivo son muy similares ya sea considerando la corrección de área o no, utilizando una u otra caja o leyendo los valores medidos "arriba" o "abajo" en el suelo 1.

- En el suelo 2 existe más variabilidad en los valores de c' : son más altos los valores medidos "arriba" y son más altos los valores al corregir el área en el cálculo de los esfuerzos.
- Los valores de cohesión efectiva (de ajuste) leídos para los valores de resistencia registrados "arriba" son mayores que los registrados "abajo".
- Lo mismo sucede para ϕ_r' en el suelo 1 pero sucede lo contrario en el suelo 2.
- Los valores de ϕ_r' y c' son mayores para el suelo 2 que para el suelo 1.

Es evidente que el ajuste de una envolvente con intercepto es mejor. Los R^2 reportados son superiores o similares a 0,9 para las envolventes lineales con el intercepto y menores para cuando se "fuerza" la envolvente a pasar por el origen.

6.3.4 Deformación en el momento de la falla y velocidad drenada

Se supuso, en la metodología que la deformación a la que el suelo fallaría era 5mm. No se encontró alguna relación entre d_f y el σ' . En promedio, para el suelo 1, d_f fue 4mm; para el suelo 2, fue de 3,9mm (Cuadro 19 y Cuadro 21). d_f para estos suelos es menor que la supuesta de 5mm y recomendada por las normas ASTM. Al considerar esta corrección se obtienen velocidades menores a las utilizadas.

Cuando se realizaron estos cálculos se utilizó un valor de consolidación (U) de 97,5% cuando se pudo haber utilizado hasta uno de 95% según Gibson & Henkel (1954). Por esta razón, no es suficiente el saber que el d_f se sobreestimó para determinar que las velocidades de falla calculadas eran mayores que la velocidad drenada real (que no se conoce pero se estima).

El tiempo a la falla (t_f) calculado con la ecuación (6) (2.5.2) con $U=95\%$ es 105min. Utilizando este valor y un d_f de 4mm, se obtiene una $v=0,038\text{mm}/\text{min}$ que es mayor que la finalmente recomendada y utilizada de $0,023\text{mm}/\text{min}$. Esto implica que: a pesar de que se sobreestimó el valor de d_f en 1mm, no se utilizaron velocidades mayores a la velocidad drenada, i.e. los ensayos fueron drenados. Esto, claro está, depende de que tan correcto y aplicable a las muestras de suelo utilizadas es la teoría de Gibson & Henkel (1954). No es posible de ninguna forma garantizar que los ensayos realizados fueron completamente en condición drenada; como si lo hubiera sido de haber tenido en el laboratorio una forma de medir la presión poro en la muestra durante los ensayos.

El anterior análisis no se puede hacer para los ensayos realizados en la máquina *Torshear* ya que por la metodología utilizada (remoldeo) no existe la falla de la muestra de suelo durante el ensayo por lo que no se puede registrar en qué deformación sucedió.

6.3.5 Comparación Pico vs. Residual

Otra forma de reportar la envolvente residual es considerando indiferente la dirección de la caja. En este análisis se compara la resistencia pico⁷⁴ con la resistencia residual⁷⁵. Para ninguna de las envolventes se distingue entre resultados obtenidos en una u otra caja.

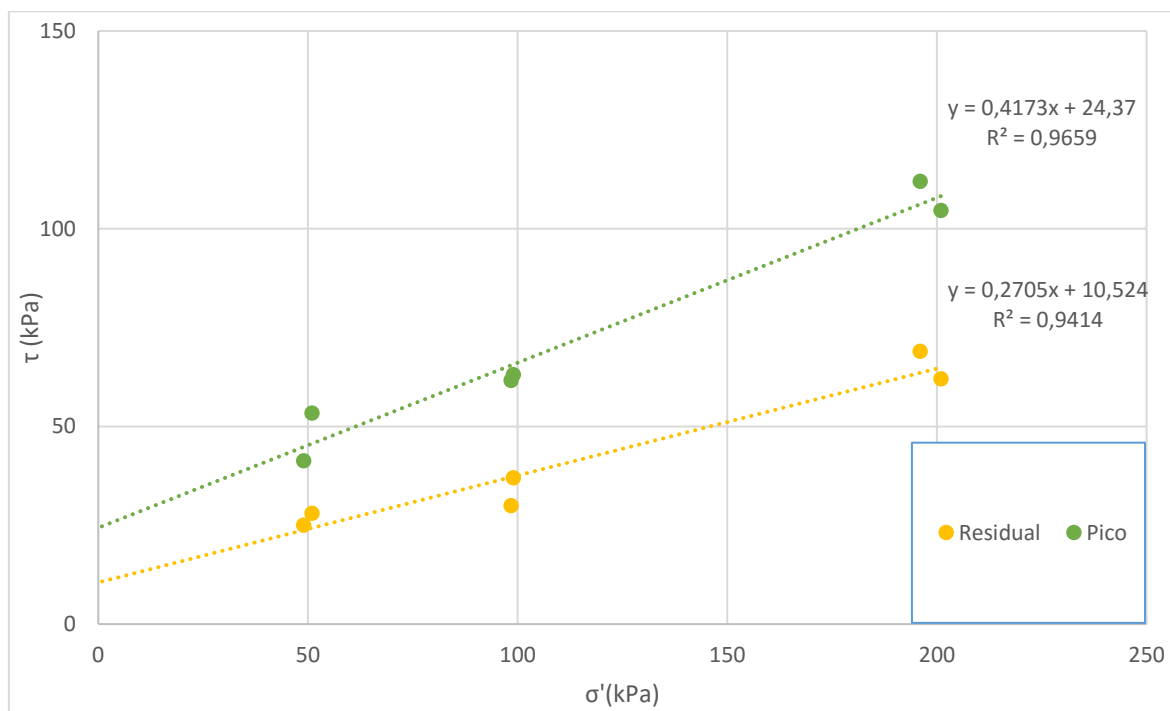


Figura 108. Comparación resistencia pico con residual (suelo 1)

⁷⁴ Sin corrección de área

⁷⁵ Sin corrección de área y tomando el menor valor de las gráficas esfuerzo-deformación sin importar si está "arriba" o "abajo".

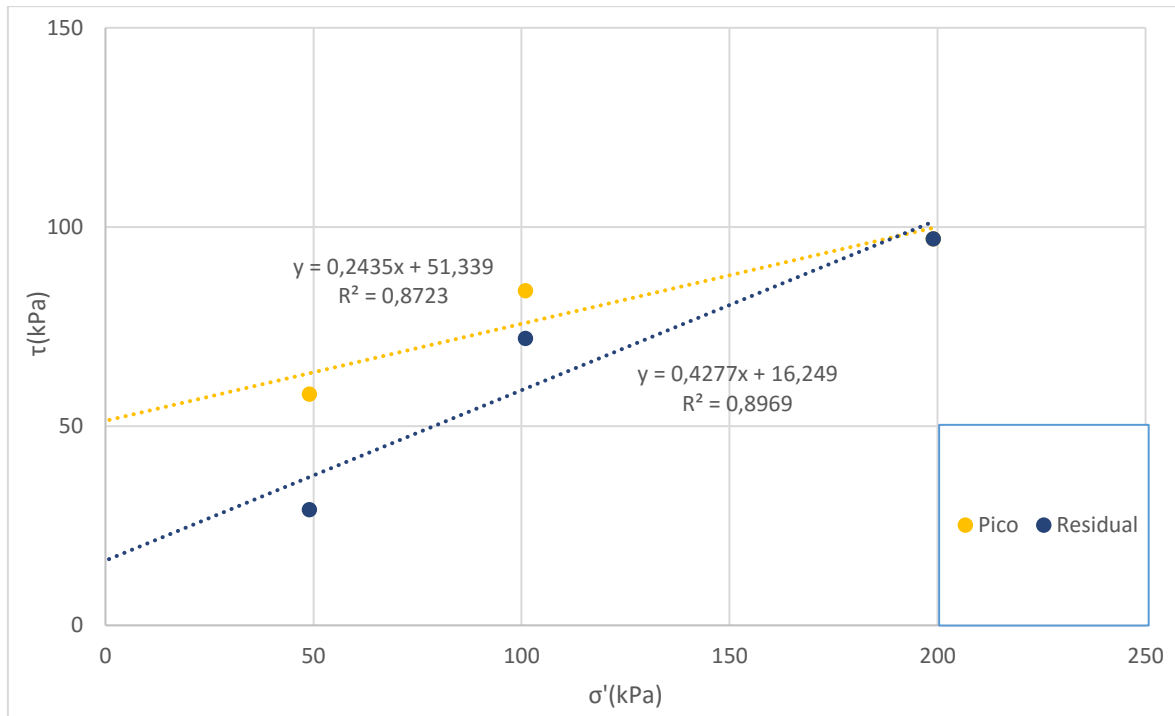


Figura 109. Comparación resistencia pico con residual (suelo 2)

Cuadro 30. Comparación resistencia pico con residual (ambos suelos)

Suelo	Envolvente	c_r' (kPa)	ϕ_r' ($^\circ$)
1	Pico	24,4	22,7
	Residual	10,5	15,1
2	Pico	51,3	13,7
	Residual	16,3	23,2

La resistencia del suelo 1 al entrar en estado residual ha considerablemente perdido (57%) una parte de su componente cohesiva y también algo de su componente friccionante (33%). Al definirse una superficie de falla la matriz de suelo se rompe y con ella la adherencia entre sus partículas (de un lado de la superficie y el otro) reduciendo la cohesión, para llegar al estado residual, en teoría, todas esta adherencia desaparece (Figura 5), cosa que evidentemente no fue así en los ensayos realizados para este trabajo. El hecho de que se haya reducido también el ángulo de fricción es evidencia de que existe un reacomodo de partículas: estas pasan de una configuración más friccionante a acomodarse, una contra la otra, por su lado menos rugoso. Esto particularmente, es posible si los minerales arcillosos tienen una forma laminar, y no tanto si es algo redondeada (donde todos los lados de las partículas son similares).

La resistencia del suelo 2 también pierde gran parte de su cohesión al entrar en estado residual (68%) pero según los ajustes matemáticos presentados aumenta su ángulo de

fricción (41%). El valor de ángulo de fricción para este suelo es particularmente bajo y el ángulo de fricción residual es extrañamente alto. Lastimosamente para este suelo se realizaron menos ensayos que para el suelo 1 y particularmente el ensayo mayor esfuerzo es el que causa este comportamiento por lo que no se puede tener tanta confianza en los valores de ángulos de fricción reportados. Sin embargo es notable que conforme aumenta el esfuerzo normal, se encuentran más cercanos los valores pico con los de esfuerzo cortante residual que puede ser una tendencia del comportamiento importante.

Una recopilación y análisis de este tipo de comparación puede resultar en valores típicos que relacionen la resistencia pico con la residual como el índice de fragilidad de Bishop.

6.3.6 Comparación entre cajas

Es notable que al comparar los resultados obtenidos en una u otra caja no se pueden distinguir diferencias importantes o tendencias que influyan en los resultados reportados.

La única ventaja que se puede notar de la caja cuadrada sobre la caja circular, sin saber que realmente es la forma de la caja la razón, es que la diferencia entre los valores tomados "arriba" o "abajo" es casi nula en la caja cuadrada y no así en la caja circular. Cuando la caja circular deforma la muestra en la dirección de la falla, el área se reduce y la geometría del área por la que pasan los esfuerzos normales cambia. Con la caja cuadrada se reduce el área pero la forma geométrica es la misma, un rectángulo. Es posible que las condiciones de frontera, que aplican esfuerzos concentrados a la muestra, sean más agresivamente influyentes en la caja circular.

6.3.7 Arriba o abajo

En general los resultados leídos "arriba" en las gráficas esfuerzo deformación resultan ser mayores o iguales a los leídos "abajo". Otra forma de reportar la resistencia residual es no considerar esta diferencia, tomando para cada esfuerzo normal el menor valor de esfuerzo cortante indistintamente de la dirección del desplazamiento; como en 6.3.5.

Se puede justificar utilizar solo los valores "arriba" ya que la deformación en el campo es en una sola dirección. El considerar los valores en retroceso sería un error porque la reorientación de las láminas se da en una dirección y restringe el movimiento en la otra. Se puede también justificar utilizar el menor valor en cada caso argumentando que no tienen por qué ser distintos ya que conceptualmente, en el estado residual no deberían serlo.

Otra opción es reportar la doble amplitud que es la diferencia entre el valor medido "arriba" y "abajo" e indicar que la resistencia sería el promedio: la mitad de la doble amplitud.

Finalmente, no hay aún una forma correcta de cómo interpretar los resultados, faltan cosas por aclarar antes de que esto sea posible. Es decisión de quién aplique los resultados cuál utilizar si es conservador o considera una u otra forma más correcta que otra.

6.3.8 Corrección de área

Se corrigió a la hora de presentar lo obtenido el área para el cálculo de esfuerzos. Si bien no se sabe por qué, los resultados, cuando se corrigió el área, no se comportaron de forma usual y más bien podrían guiar a conclusiones erróneas conceptualmente como que el esfuerzo pico corregido resulte menor que el residual corregido (Figura 92). Finalmente, no se alejaron los resultados de la tendencia (6.6.3)

Si bien teóricamente parece todo funcionar, se hace esta advertencia de que los resultados en la práctica no fueron los esperados con tal de que se tome en cuenta en el futuro; quedan dudas de si son adecuadas y necesarias estas correcciones o no.

Ninguna norma consultada o referencia de autores investigadores recomienda como tal realizar esta corrección. Esta corrección se conoce en la teoría pero no es tan popular en la práctica.

6.4 Resultados obtenidos en la máquina *Torshear*

6.4.1 Resistencia residual encontrada

6.4.1.1 Ángulo de fricción residual secante efectivo (ϕ'_{rs})

Cuadro 31. Ángulos de fricción residual secante (ϕ_{rs}) obtenidos con la máquina *Torshear*

Esfuerzo normal (kPa)	Suelo 1		Suelo 2
	ϕ_{rs} (°)	Desviación Estándar (kPa)	ϕ_{rs} (°)**
49	25,6	3,6	30,6
99	22,4	1,7	32,9
199	22,8	1,7	8,3
300*	23,1	1,1	17,2
400*	21,0	0,0	15,4

*Aprox.

**No se reporta desviación estándar porque solo hay un valor

A partir del Cuadro 31 se puede observar que:

- Los valores de desviación son bajos lo que indica que hay baja dispersión de los datos de ensayos repetidos. Esto genera confianza en realizar un solo ensayo por esfuerzo normal.
- El valor de ϕ_{rs} y el valor de esfuerzo cortante residual reportado para 99 y 200 kPa (Cuadro 22), para el suelo 2 son inusuales y no siguen la tendencia esperada. Esto lleva a pensar que sería bueno repetir algunos ensayos que salgan del comportamiento causal lógico.
- El valor del ángulo de fricción secante disminuye con el aumento en esfuerzo normal (más en el suelo 2 que en el 1). Esto puede respaldar la idea de que la envolvente residual es curva o de que existe una cohesión, ya sea de ajuste o real. En este caso más aún que en el Cuadro 27, ya que se tienen datos para más valores de esfuerzo normal.

6.4.1.2 Envolvente de falla residual curva

Existen diferentes acercamientos para definir un criterio de falla, alguno podría considerar la curvatura de la envolvente de falla residual, en esta sección se presentan los resultados como curvas, como en 6.3.3.2, y no como rectas.

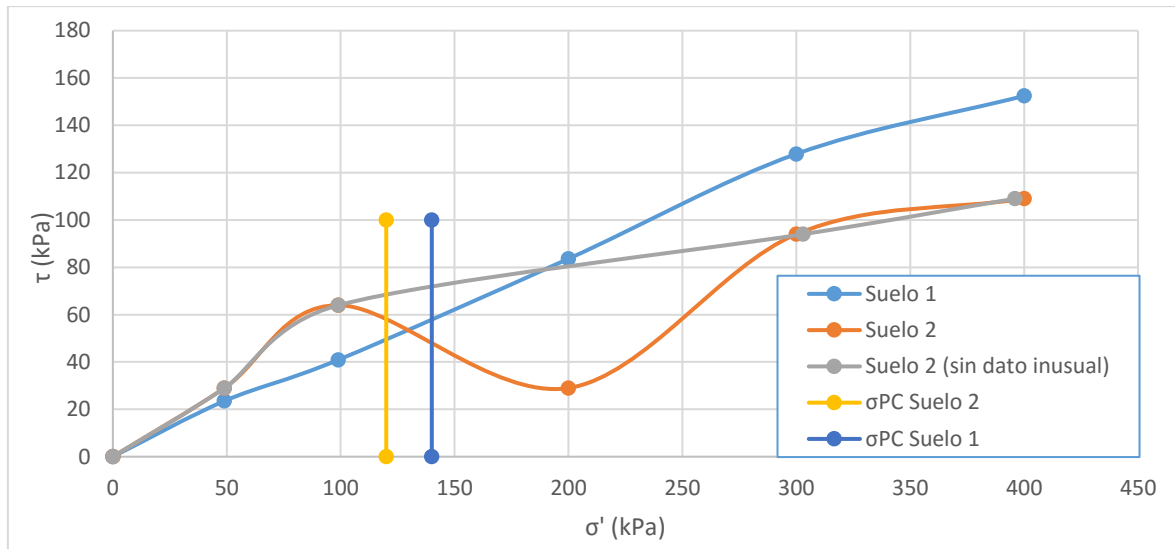


Figura 110. Envolventes curvas de falla residual (Torshear)

Se reconoce a partir de la curva del suelo 1 (Figura 110) que hay un comportamiento curvo sutil, sin embargo es notable que un acercamiento lineal se justifica. Parece haber un comportamiento más curvo en el suelo 2, a pesar del comportamiento poco razonable de los puntos encontrados para 99 y 199 kPa. Esto coincide con lo planteado en el marco teórico, al tener este un mayor contenido de finos que el suelo 1, estando ambos en zona de transición, se puede esperar un comportamiento curvo más predominante. En ambos casos, como se mencionó antes, es notable que el ángulo de fricción residual efectivo disminuye.

Una opción es no considerar el dato para 200 kPa de esfuerzo normal obtenido para el suelo 2 (curva amarilla a triángulos en la Figura 110). En este caso el comportamiento de la curva es similar a la del suelo 1, con una curvatura más pronunciada.

6.4.1.3 Envolvente lineal

Hay dos formas posibles de ajustarse al criterio de falla lineal de Mohr-Coulomb. Considerando un intercepto o ajustando los parámetros para que el intercepto o cohesión sea nula, como es conceptualmente aceptado.

6.4.1.3.1 Considerando intercepto de ajuste

Cuadro 32. Datos para la confección de envolventes lineales (Torshear)

Suelo	1		2
Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo Cortante Residual (kPa)	Desviación Estándar	Esfuerzo Cortante Residual (kPa)
49	24	3,8	29
99	41	3,5	64
200	84	6,9	29
300*	128	8,7	94
400*	152	0,7	109

*Aprox.

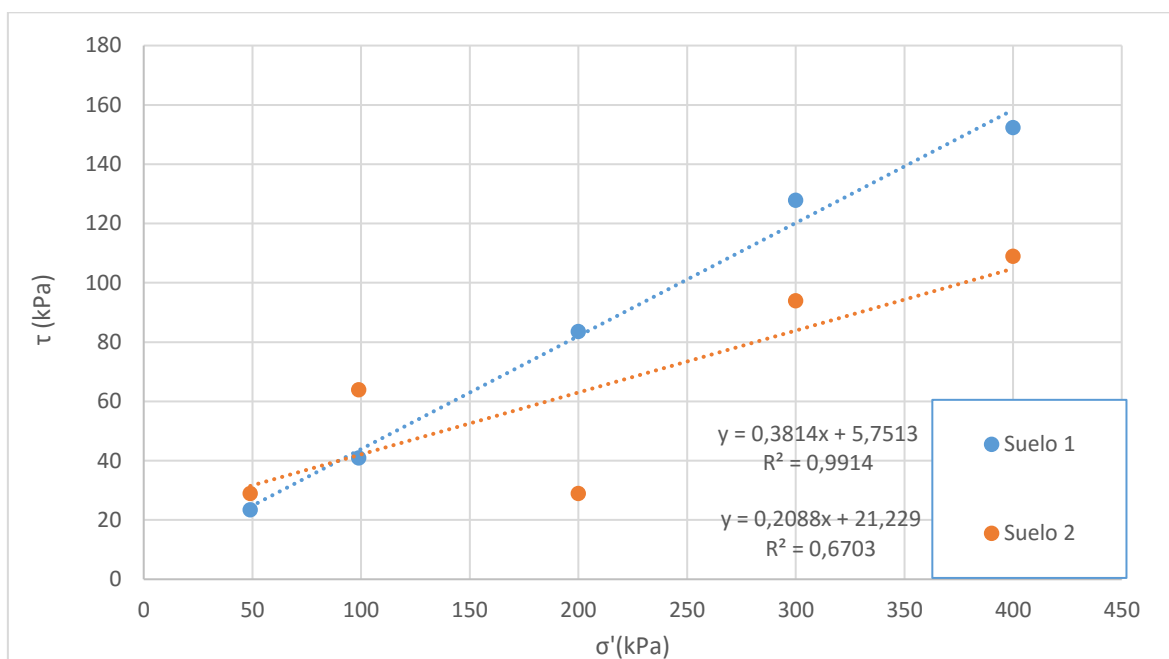


Figura 111. Envolventes lineales (cohesión de ajuste)

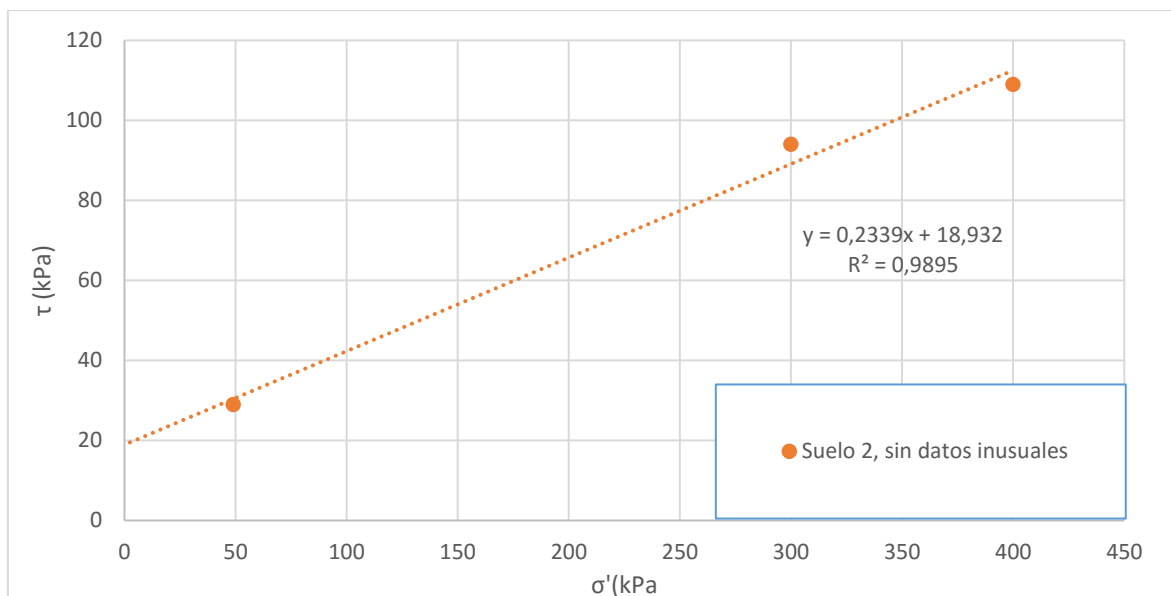


Figura 112. Envolventes lineales (cohesión de ajuste) 2

Cuadro 33. Envolventes lineales con cohesión de ajuste (Torshear)

Suelo	ϕ_r' (°)	c' (kPa)
1	20,9	5,8
2 ⁷⁶	13,2	21,2

6.4.1.3.2 Considerando intercepto cero

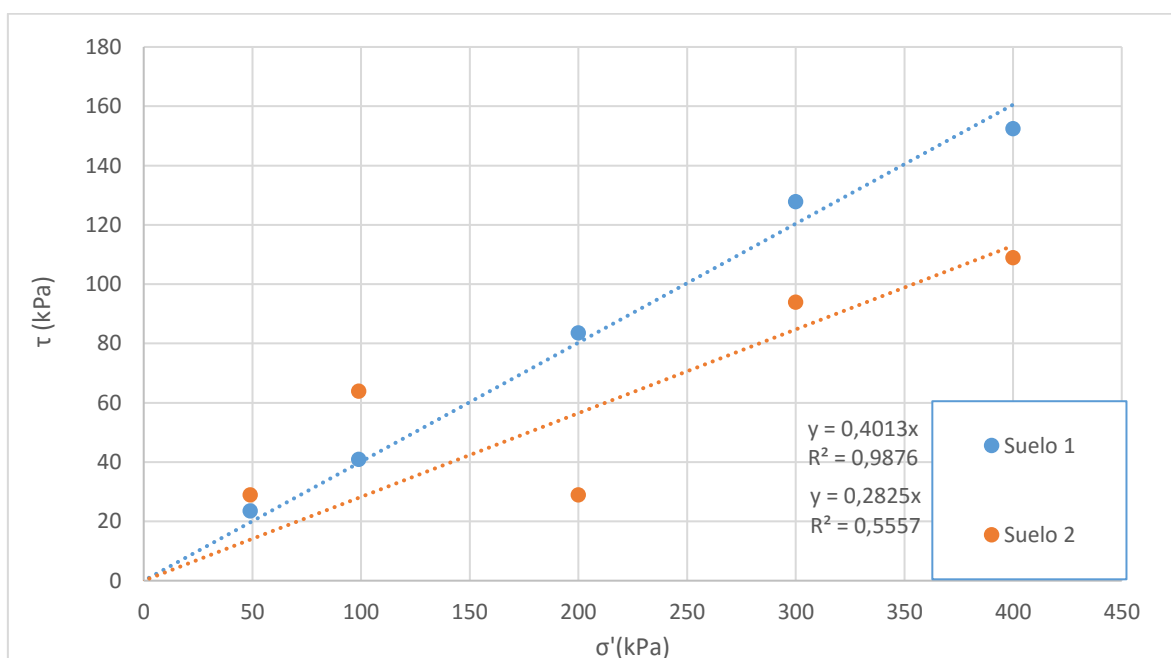


Figura 113. Envolventes lineales (cohesión cero)

⁷⁶ Sin datos inusuales

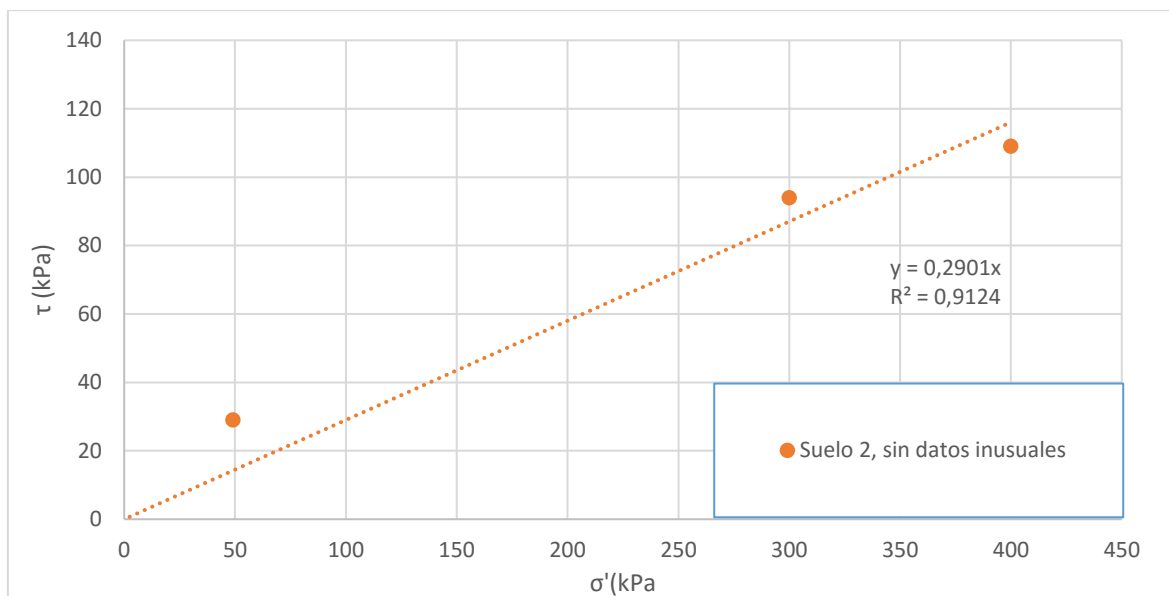


Figura 114. Envolventes lineales (cohesión cero) 2

Cuadro 34. Envolventes lineales con cohesión cero (Torshear)

Suelo	ϕ_r' (°)
1	21,9
2 ⁷⁷	16,2

El R^2 obtenido para las envolventes con intercepto es mayor que para las envolventes en las que se "forzó" a pasar por el origen; igual que en los resultados obtenidos en la *Shearmatic*. La disminución en el R^2 al forzar la envolvente a pasar por el origen es menor en los gráficos obtenidos a partir de resultados de la *Torshear* que en los de la *Shearmatic*. En general la cohesión aparente influye menos en los resultados obtenidos con la *Torshear*.

⁷⁷ Ídem

6.5 Comparación entre las máquinas utilizadas

Al comparar las dos máquinas utilizadas conviene antes hacer mención de algunos importantes detalles.

Se tuvo algunos problemas asociados con los resultados obtenidos con la máquina *Shearmatic*. Estos a su vez están relacionados con el funcionamiento de la máquina. Sin embargo, se considera que no fueron influyentes en los resultados reportados y que no porque se hayan dado estos conflictos se debe perder la confianza en los resultados obtenidos. Se explica a fondo esta situación en el Apéndice 1.

Al utilizar la máquina *Shearmatic*, cuando la caja de corte se encontraba en una posición de alta deformación la tapa que va encima de la muestra se acostaba hacia el lado (donde la parte superior de la muestra pierde contacto con su parte inferior) como se puede ver en la Figura 115. Esto pudo haber alterado los esfuerzos leídos o "sentidos" por la muestra. También, como lo indican Stark & Eid (1994) al utilizar esta máquina se nota pérdida de material, en específico de la zona de corte (superficie de falla).

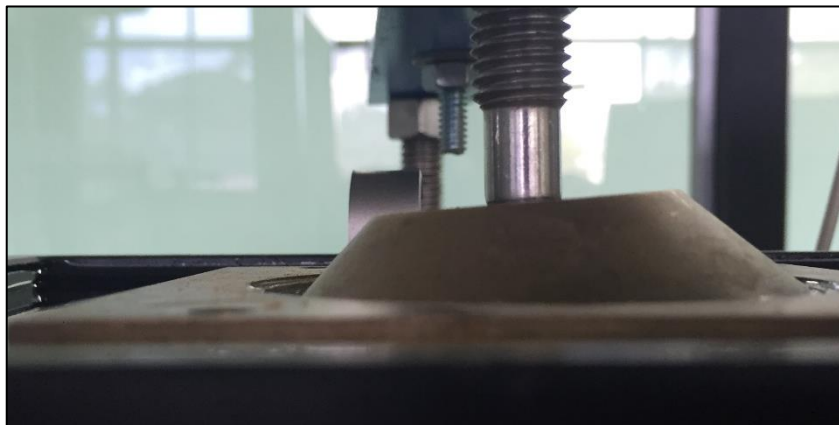


Figura 115. Movimiento de la tapa superior de la caja de corte directo

Cuando se utilizó la *Torshear*, especialmente con esfuerzos altos, se notó que hubo pérdida importante de material (se sale de la cavidad durante la consolidación). Esta situación se podría resolver utilizando densidades más altas en las muestras preparadas. Esto puede haber influido en los resultados al generarse esfuerzos ajenos al suelo, controlados por las condiciones de borde, al estar las tapas de la cavidad demasiado cerca.

6.5.1 Diferencias en los resultados obtenidos

6.5.1.1 Ángulo de fricción residual secante efectivo (ϕ'_{rs})

Al comparar los datos de ϕ'_{rs} reportados en el Cuadro 27 y el Cuadro 31 para el suelo 1 se puede ver que los valores para un esfuerzo de 49 kPa son mayores al ser obtenidos con la *Shearmatic* pero para 99 y 199 kPa son mayores los obtenidos en la *Torshear*.

6.5.1.2 Envolvente de falla curva

Al ser posible encontrar puntos de las curvas con mayores valores de esfuerzo normal en la máquina *Torshear* es posible realizar un análisis de la curvatura de la envolvente de falla residual; esto no es posible con la *Shearmatic* por las limitaciones que tiene.

6.5.1.3 Envolvente lineal

Al comparar los resultados del Cuadro 29 y el Cuadro 33 se puede ver que:

- En el suelo 1 con los resultados de la *Torshear* se ha encontrado un ϕ'_r mayor (shear. $\approx 15^\circ$ y tor=20,9°) y una c' menor (shear. ≈ 13 kPa y tor=5,8 kPa) que con la *Shearmatic*. *i.e.* a partir de aproximadamente de 64 kPa de esfuerzo normal, la resistencia reportada por los resultados de la *Torshear* es mayor. Antes, la resistencia obtenida con la *Shearmatic* es mayor.
- En el caso del suelo 2, ϕ'_r es mayor al ser obtenido con la *Shearmatic* (shear. $\approx 22^\circ$ y tor=13,2°). Si se considera la medición "arriba" en los resultados de la *Shearmatic* (27 kPa), entonces el valor de c' es mayor que con los resultados de la *Torshear* (21,2 kPa); si se considera la medición "abajo", es menor (17 kPa). En el primer caso, la resistencia reportada por la *Shearmatic* es mayor siempre, en el segundo es mayor a partir de 25 kPa (aprox.) de esfuerzo normal.

Para los resultados obtenidos en la *Torshear* los R^2 en general son más altos que para el *Shearmatic*.

6.5.1.4 Deformación residual

El d_r puede depender de la máquina utilizada y puede ser un descriptor de algunas cosas que suceden o se deben considerar al realizar los ensayos.

El suelo 1, en promedio, para la *Shearmatic* tomó 81mm para llegar al estado residual; pero este valor coincide con el último registrado; es decir que perfectamente podría ser mayor si se hubiera continuado con el ensayo.

Lo mismo sucede con τ_{res} , en estos ensayos se registró como el valor residual el último registrado. Queda esta duda de si ese valor seguiría reduciéndose considerablemente, aunque por la tendencia analizada en 6.3.2, se espera que no sea así. Por otro lado, tomar en cuenta que el descenso en las gráficas de la máquina *Torshear* es paulatino puede ser que faltaban algunos ciclos para llegar al estado residual en la *Shearmatic* y que el criterio utilizado para encontrar la estabilidad en 6.3.2 fue menos riguroso de lo que se pensaba.

En la *Torshear*, el suelo 1, requirió de deformaciones más grandes para llegar al estado residual, aunque hubo mucha variabilidad, solo el 19% de los ensayos necesitaron menos de 90mm para alcanzar el estado residual, el promedio fue de 196mm y el máximo registrado de 524mm. Esto puede reforzar lo indicado en el párrafo anterior.

Además, considerando que la muestra en la *Shearmatic* es inalterada y la *Torshear* es remoldeada después de pasar por la malla #200, lo esperado sería que en la *Torshear* se requiera menos deformación para alcanzar el estado residual. Esta podría ser una explicación a que se registren valores de resistencia mayores en máquinas de corte directo que en máquinas de corte anular. Tal vez Stark & Eid (1994), Bayin *et. al.* (2012), Vithana *et. al.* (2011) y Skempton (1985)⁷⁸ obtuvieron estos resultados porque no llegaron realmente a alcanzar el estado residual con la máquina de corte directo; simplemente detuvieron antes de tiempo los ensayos. Esto no significa que esté mal el ensayo, la metodología simplemente es así y puede ser que una tendencia en los resultados sea consecuencia, en particular de la metodología elegida. Podría entonces encontrarse un factor de ajuste o corrección como alternativa a tener que realizar muchos más ciclos en el ensayo de corte directo residual.

El suelo 2, requirió en la máquina *Shearmatic* 47mm de deformación acumulada, en promedio, para llegar al estado residual. En el Cuadro 25, queda evidenciado que se alcanzó, sin duda, el estado residual, y antes de llegar al último ciclo del ensayo. Esto hace más comparables los resultados de las distintas máquinas que los resultados del suelo 1.

En la máquina *Torshear* con la muestra del suelo 2, se tuvo algunas irregularidades que hacen que los valores de d_f no sean comparables. En promedio se obtuvo 546mm de deformación y se registraron valores desde por debajo de 100mm hasta 900mm.

⁷⁸ Estos autores se mencionaron antes en 2.4.3 , concluyeron en sus trabajos que se obtienen resultados mayores en ensayos de corte directo que en ensayos de corte torsional.

Es difícil decir que en una u otra máquina los valores de d_r deben ser iguales o mayor en una o en otra; lo cierto es que tampoco se puede decir si fue así en los ensayos realizados para este trabajo: para el suelo 1, existen dudas del valor d_r registrado en la *Shearmatic* y en el suelo 2 con los registrados en la *Torshear*.

6.5.2 Compendio de vivencias, resultados y bibliografía

Se podría confirmar que (considerando el suelo 2 [FA=50,4%>50%]) para materiales con fracción de arcilla altos, los valores obtenidos con la máquina de corte directo son mayores que con el anillo torsional (Skempton, 1985). Fuera de esto no se puede relacionar, a partir de los resultados obtenidos en este proyecto, un tipo de máquina con una tendencia en los resultados ni reforzar alguna otra de las posiciones planteadas en el marco teórico.

Se muestran los más importantes puntos de comparación entre los equipos en el Cuadro 35.

Cuadro 35. Puntos de comparación entre los equipos

Punto de comparación	<i>Shearmatic</i>	<i>Torshear</i>
Aplicación del esfuerzo	Deformación controlada, cortante directo	Deformación controlada, cortante torsional
Deformación	Restringida, cíclica	Ilimitada ⁷⁹ , continua
Concentración de esfuerzo	En los bordes, distinto para distintas cajas, acentuado por tipo de deformación	Inexistente
Drenaje	Dos direcciones, inferior y superior	Dos direcciones, inferior y superior
Estado de la muestra	Inalterada, completa	Remoldeada, $T_{max} < 0.075 \text{ mm}$
Altura de la muestra	20mm	5mm
Superficie de falla	Inducida, a media altura	Generada por adherencia del material a la tapa superior
Secuencia de falla	Falla, estado residual; una sola etapa	Precorte, estado residual; dos etapas
Resistencia pico	Se registra	No ⁸⁰ se registra
Área del espécimen	Cambiante	Constante
Pérdida de material	En la falla, de la superficie de falla	En la consolidación, en precorte y falla también aunque menor
Duración de ensayos ⁸¹	8 días por esfuerzo normal	3 días por esfuerzo normal
	24 días para una envolvente de tres puntos (llegando a 90mm de deformación acumulada)	10 días para una envolvente de 5 puntos (llegando a 900mm de deformación)

⁷⁹ Relativamente pues la máquina permite hasta 999,9° de rotación

⁸⁰ Realmente no se intentó, podría probarse si es posible obtenerla eliminando la etapa de precorte y utilizando muestra inalterada.

⁸¹ Estos valores dependen mucho del suelo, pero se pueden utilizar de referencia par arcillas con FA cercana al 50%.

Los beneficios notables, sin considerar la confiabilidad de los resultados⁸², de la máquina de corte directo sobre la de corte torsional son que: siguiendo la metodología aquí planteada se puede obtener la resistencia pico y que se evalúa la resistencia de toda la matriz de suelo de forma inalterada. La máquina *Torshear* sólo falla la parte fina del suelo (pasando la #200) porque según la literatura el estado residual es controlado por estas partículas. Si bien, así parece, esto puede no ser totalmente cierto de modo que en suelos en los que la parte más gruesa (que 0,075mm) es influyente en el estado residual se podría estar midiendo de forma errónea la resistencia del suelo, aunque de manera conservadora

Los demás puntos de comparación apuntan a que el ensayo realizado con la máquina *Torshear* es más apegado a la realidad, es más fácil y rápido, y existen menos dudas metodológicas y de interpretación de los resultados que al usar la *Shearmatic*. Además de que con la *Shearmatic* solo se pueden ver los primeros ≈ 90 mm de los gráficos de la *Torshear*; es evidente que es difícil que se haya alcanzado la estabilidad residual con el ensayo de corte directo reversivo. Las condiciones encontradas en el Lanamme-UCR, descritas en este documento, también llevan a pensar que el usar este equipo es lo más adecuado para determinar la resistencia residual. De modo que, siguiendo las tendencias de las referencias consultadas, en caso de tener que elegir un equipo sobre el otro lo mejor sería utilizar el equipo *Torshear*.

6.6 Comentarios finales

6.6.1 Cohesión residual efectiva

Stark, Eid, Schmertmann, Suárez (Figura 5) y muchos otros autores han defendido que no existe una cohesión residual efectiva; ¿por qué iría a existir? Por definición no existe y si se ha alcanzado un estado crítico y se ha destruido, para llegar a este estado, todo enlace entre un lado y el otro de la superficie de falla. Ha pasado el suelo de considerarse un sólido a dos (al haberse deformado tanto el punto de unión) entre los cuales sólo puede haber fricción y no adherencia. En esta misma tendencia cabe la teoría de una envolvente curva de Hawkins & Privett.

Otros autores como Vithana *et. al.* y el mismo Skempton han argumentado que lo mejor para un análisis de estabilidad de un talud es reportar una cohesión de ajuste (intersección con el eje "y") y un ángulo de fricción y olvidarse de la posible curvatura (tema que tampoco

⁸² Tema aún irresuelto; podría ser influyente.

es claro) o el misterio de una fuerza conceptualmente imposible. No es cohesión, es otra cosa, pero ¿qué es?

El tema de la cohesión residual efectiva es un tema controversial que se ha dejado, hasta cierto punto de lado en este análisis, hasta ahora. En esta sección se trata de responder a la pregunta: ¿Por qué se registraron valores de cohesión residual efectiva si no debería existir? ¿Cómo se justifica que haya pasado esto?

Siempre está la posibilidad de que la envolvente de resistencia residual se ajuste más a un criterio de falla que considere la curvatura, de los dos suelos analizados en este trabajo el suelo 2 muestra esta tendencia pero no de forma clara. El suelo 1, más parece ajustarse a un acercamiento lineal.

Podría ser también que la velocidad de los ensayos no haya sido drenada sino más rápida; que se hayan obtenido resultados parcialmente drenados y esto se traduce en cohesión de ajuste; aunque los procedimientos se ajustaron a lo que se sugiere en la literatura y normativas.

En 6.2 se argumenta que la forma de las curvas presentadas es una prueba de que los ensayos fueron realizados en condición drenada; sin embargo no se puede garantizar, para esto habría que haber medido la presión de poro, una forma de hacerlo hubiera sido realizar ensayos en la máquina Triaxial.

Además es probable, si bien no sea lo esperado o más aceptado, que la preconsolidación o la "historia" del suelo no se desprende totalmente de él al estar en el estado residual, es decir que aún a esas deformaciones existe una atracción que no se logra disipar; al romperse los enlaces entre las partículas de suelo no hay nada que llene ese espacio, el vacío por succión mantiene adheridos los lados de la superficie y se registra una resistencia a la tracción efectiva y residual. Por esta razón se estabilizarían las medidas en esfuerzos altos, de forma similar a como sucede para los valores pico.

Al separar los lados de la caja de corte directo, en todos los ensayos se sintió adherencia (resistencia a la tracción) y se sintió como se rompía la muestra que aún era un solo bloque no aquella separación total de dos sólidos distintos (que solo resiste el corte mediante la fricción) que se esperaba.

Por otro lado, no es posible garantizar que los ensayos se realizaron de forma saturada. Se dejaron en cámara húmeda, se inundaron un día antes de consolidar, se fallaron inundados (*Shearmatic*) o se molieron y pasaron por la malla #200, mezclaron con agua hasta el LL y

se dejó que el agua entrara en ellos por un día (*Torshear*), pero siguen siendo arcillosos, siguen siendo laminares, es difícil saturar un suelo arcilloso. Igualmente, en este caso, cabe destacar que se fue riguroso en aplicar lo que indica la literatura y las normativas.

Es posible que se hayan fallado de forma parcialmente saturada y aún había aire en la matriz del suelo generando meniscos contráctiles. Estos meniscos aumentaron la resistencia del suelo mientras encapsulaban el aire. La componente no saturada de la envolvente residual de falla se registra como cohesión efectiva residual en la resistencia saturada.

El hecho de que para el suelo 1 los valores medidos de c_r' encontrados fueran menores en la *Torshear* (mayores niveles de saturación esperados, por el método de preparación) respalda esta línea de pensamiento. Sin embargo, en el suelo 2 no fue así.

En fin, no hay una realidad absoluta o una verdad definitiva sino sólo posibilidades; por ahora.

6.6.2 Criterio de falla no lineal

En la Figura 102 y Figura 110 se presentan los resultados obtenidos con las máquinas *Torshear* y *Shearmatic*. En estas secciones se plantean las envolventes como curvas porque es posible que otros criterios de ruptura (no uno lineal Mohr-Coulomb) se ajuste mejor a los resultados obtenidos. Otras formas de interpretación abren posibilidades de no depender de encontrar un intercepto y pendiente para un ajuste lineal. En estos ensayos, sin embargo, parece ajustarse bien la alternativa lineal.

En los resultados obtenidos con la *Shearmatic* se puede apreciar que tal vez una interpretación bilineal es más adecuada: Una primera recta con intercepto cero y pendiente más grande, desde origen hasta un esfuerzo similar al de la carga de preconsolidación ($\sigma_{pc}=120$ kPa para el suelo 2 y 140 kPa para el suelo 1) y otra con un intercepto más alto y pendiente más baja, para esfuerzos mayores.

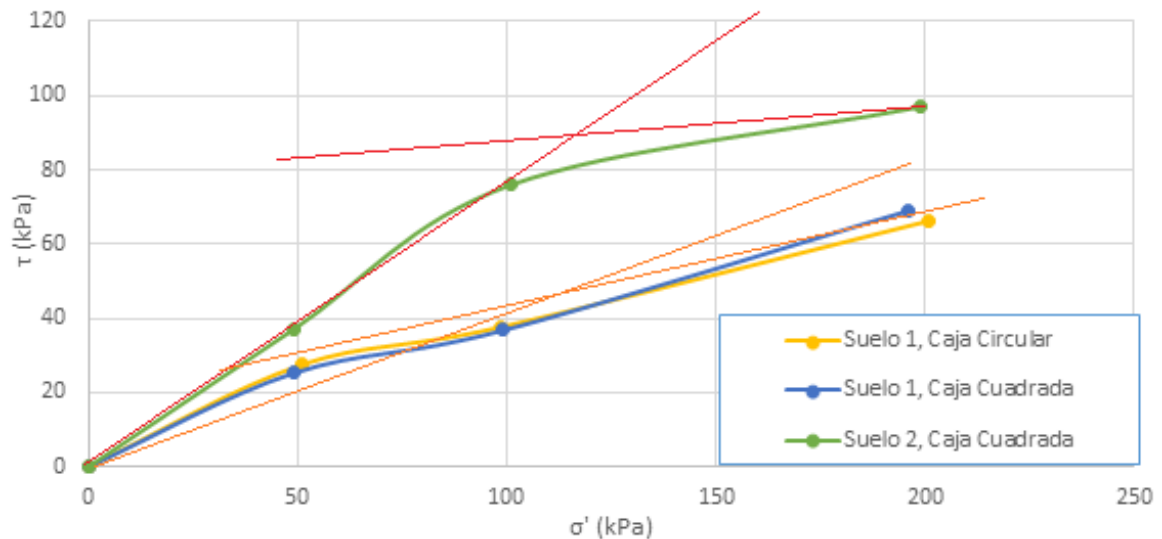


Figura 116. Posibilidad de envolvente bilineal

En los resultados de la *Torshear* se puede ver una tendencia similar para un punto de cambio mayor. Además, un análisis que considerara por separado los valores de resistencia residual para los esfuerzos por encima y por debajo del esfuerzo de preconsolidación podría disminuir la dispersión de los resultados del suelo 2. No se realizó este análisis por que se consideró fuera del alcance del trabajo y los límites temporales determinados para realizarlo.

6.6.3 Valores más representativos de resistencia residual

Es conveniente analizar todos los resultados juntos para conocer la tendencia del conjunto y los datos que más se dispersan del comportamiento promedio. La Figura 117 y Figura 118 presentan esto. Se puede ver como para el suelo 1 la dispersión es pequeña y para el suelo 2 es más grande. Siguiendo el comportamiento descrito antes los resultados de la *Shearmatic* parecen ser menores en el suelo 1 y mayores en el suelo 2 que lo obtenido en la *Torshear*. Se puede ver también en la Figura 117 que los datos más alejados del comportamiento promedio son los de la caja circular leídos en dirección contraria a la de la falla. Esto coincide con lo que discutió anteriormente (6.3.6 y 6.3.7). Además se vuelve notable ahora (Figura 118) que existe una tendencia curva en la envolvente de falla del suelo 2 que antes no fue posible apreciar y que el valor hallado para 99 kPa (σ') en la *Torshear* no estaba tan mal.

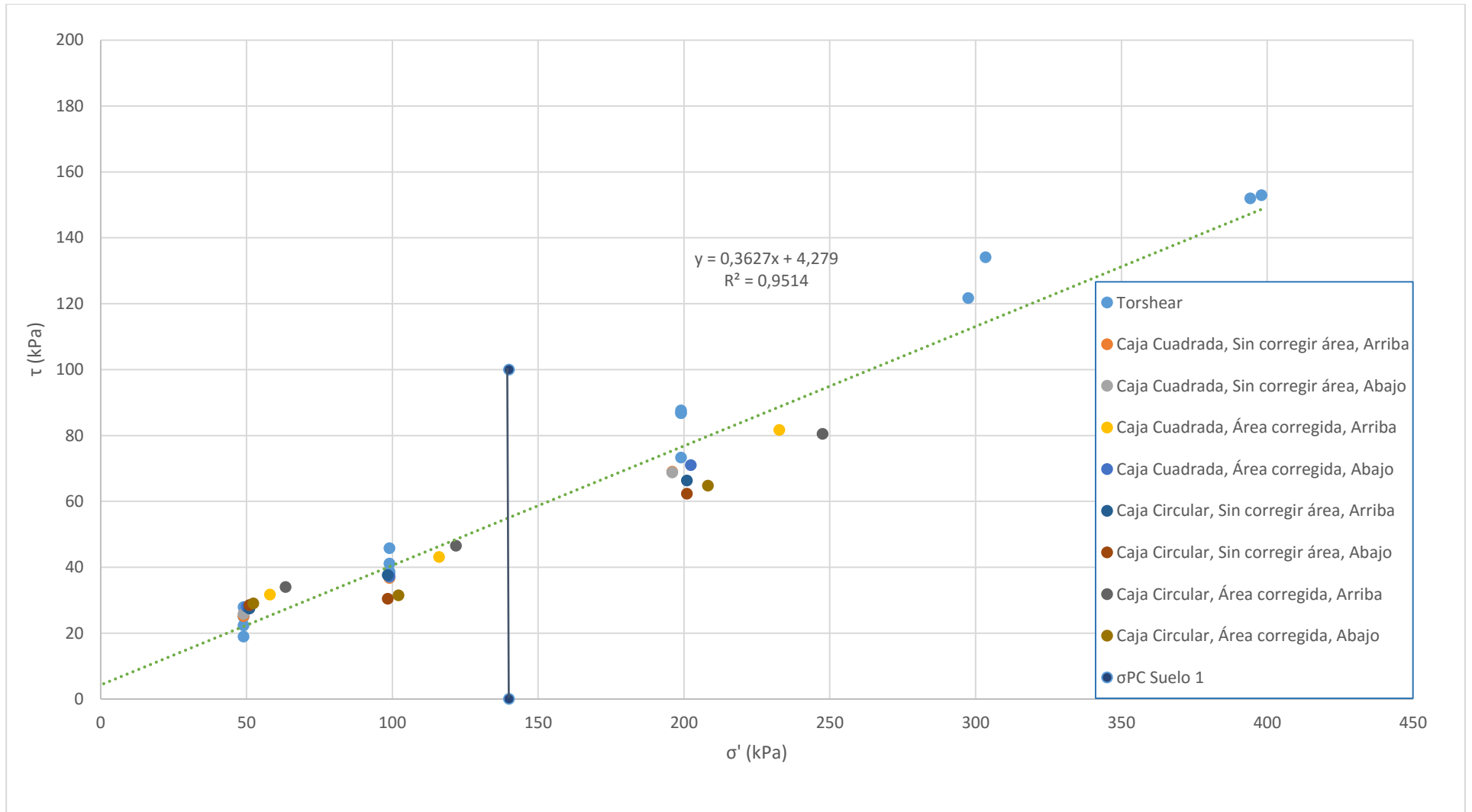


Figura 117. Todos los resultados, suelo 1

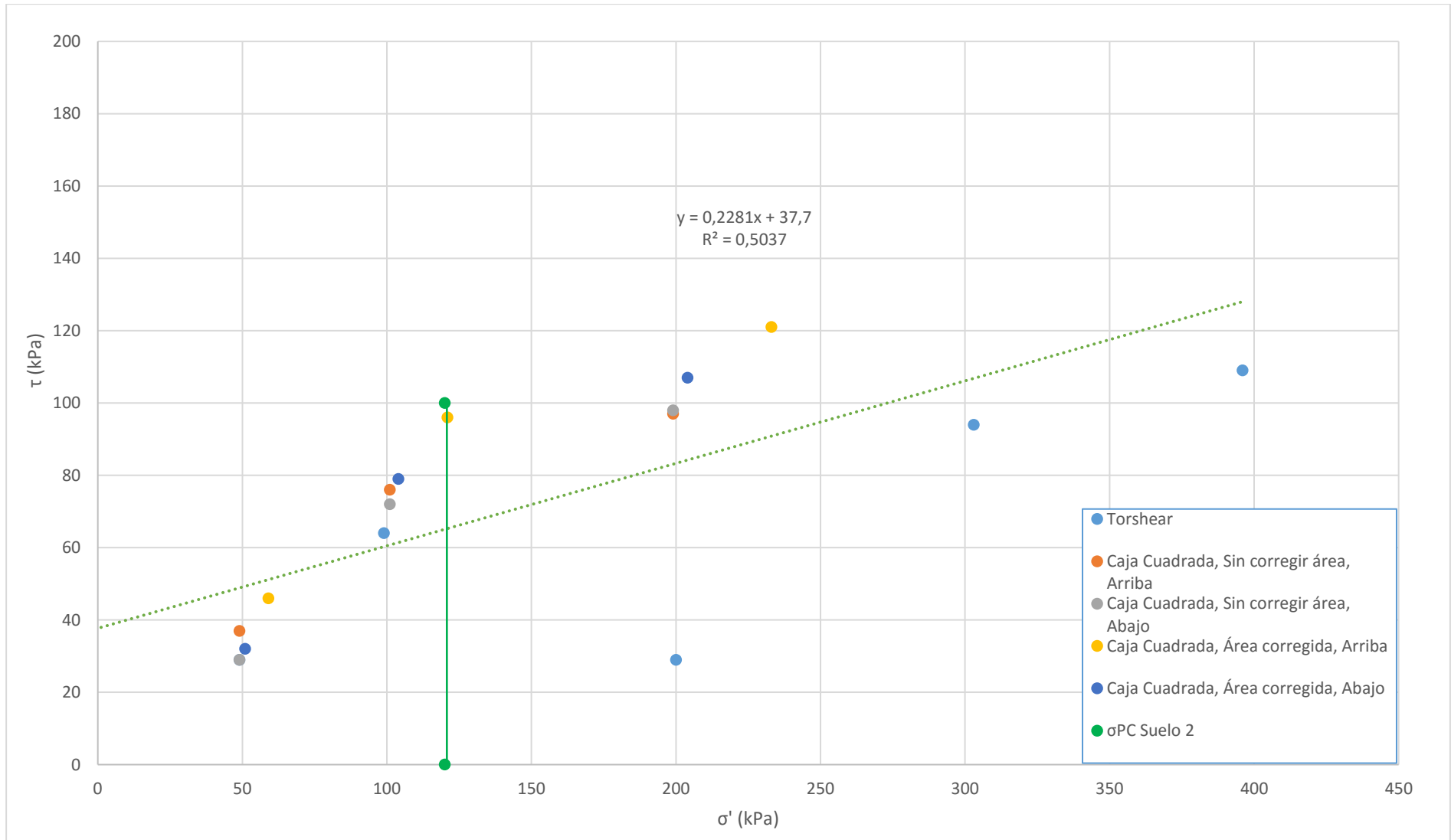


Figura 118. Todos los resultados, suelo 2

Cuadro 36. Envolventes lineales considerando todos los resultados

Suelo	c_r' (kPa)	ϕ_r' (°)
1	4,3	19,9
2	37,7	12,8

Se reportan en el Cuadro 36, los parámetros de las envolventes lineales obtenidas al considerar todos los resultados obtenidos.

En la Figura 118, se puede ver que el valor obtenido en la máquina *Torshear* para el suelo 2, con 200 kPa de esfuerzo normal tiene un comportamiento totalmente fuera de lo esperado, y fuera del comportamiento de los demás puntos. No se encontró ninguna particularidad del ensayo que pudiera haber causado esto, aunque probablemente alguna razón de este tipo sea la justificación. Este ensayo no se repitió porque se consideró que los demás puntos eran suficientes para describir el comportamiento residual y por falta de tiempo. En un caso como este lo recomendable es repetir el ensayo. Si se volviera a registrar un valor similar habría que realizar una revisión más a fondo de lo que está sucediendo.

Finalmente se reporta a continuación los intervalos en los que variaron los resultados obtenidos en este trabajo:

- El suelo 1 tiene un ángulo de fricción residual efectivo que en los ensayos realizados resultó ser medido entre los 13,4° y 21,9° y una cohesión residual c_r' efectiva (de ajuste o que existe) entre 4,3 y 16,8 kPa (o se considera nula). Su ángulo de fricción residual secante va desde los 28,8° a los 18,8° para crecientes esfuerzos normales.
- El suelo 2 tiene un ángulo de fricción residual efectivo que en los ensayos realizados resultó ser medido entre los 13,2° y 30,4° y una cohesión residual efectiva (de ajuste o que existe) entre 15,8 y 37,7 kPa (o se considera nula). Su ángulo de fricción residual secante va desde los 37,7° a los 15,4° para crecientes esfuerzos normales.

Finalmente es difícil comparar estos intervalos con los valores esperados planteados pero en definitiva se puede asegurar que están cerca. Se puede cotejar los valores puntuales obtenidos y presentados en 6.3.3 y 6.4.1 recapitulando lo que se esperaba descrito en 6.1.

A juzgar por la mineralogía del suelo 1, se esperaba encontrar un ϕ_r' un poco superior a los 15° , y fue así: $19,9^\circ$ para la tendencia de todos los ensayos juntos.⁸³ Para el ϕ_{rs}' se esperaba un valor de $17-19^\circ$, para 100 kPa de esfuerzo normal y se obtuvo uno ligeramente superior, de $20,5^\circ$ ⁸⁴ con la máquina *Shearmatic* y de 23° para la *Torshear*.

El ϕ_r' se esperaba en 15° según la mineralogía del suelo 2 y para la tendencia de todos los ensayos juntos se obtuvo uno de $12,8^\circ$.⁸⁵ Para el ϕ_{rs}' se esperaba un valor de $11-15^\circ$, para 100 kPa de esfuerzo normal y bastante distinto, de 37° ⁸⁶ con la máquina *Shearmatic*.

Hay temas que se trataron desde diferentes puntos de vista en este trabajo, tratando de abarcar todas las posibles interpretaciones. La realidad es que hay muchas decisiones que se deben tomar para obtener una envolvente de resistencia residual para un suelo si, por ejemplo, se quiere realizar un análisis de estabilidad de un talud o ladera. Investigaciones como esta y otras tal vez más orientadas a dar respuestas específicas a algunos de estos temas, proveen una fuente de información importante para el tomador de decisiones: ayudan a formar el criterio de un ingeniero analista. Es a fin a de cuentas decisión del ingeniero que recibe estos resultados de laboratorio cuáles aplica en su análisis. Puede querer ser conservador o tomar algunas decisiones basándose en otras experiencias o estudios que respalden el camino que decide tomar.

En todo caso se debe atender a qué esfuerzos normales corresponden los parámetros de resistencia residual utilizados. Ya sea considerando un intercepto diferente de cero, o cero, un ángulo de fricción tangente o secante, se debe tener en cuenta que al ajustar las características ingenieriles del suelo al criterio de falla Mohr-Coulomb el ajuste tiene un rango limitado de esfuerzos normales en los que se puede considerar válido.

⁸³ Si la teoría de la saturación parcial o alguna similar es correcta se podría esperar que los valores de c_r' reales sean nulos y los de ϕ_r' no cambien; de modo que estos valores se vuelven comparables.

⁸⁴ Caja cuadrada, leído "arriba"

⁸⁵ Si la teoría de la saturación parcial o alguna similar es correcta se podría esperar que los valores de c_r' reales sean nulos y los de ϕ_r' no cambien; de modo que estos valores se vuelven comparables.

⁸⁶ Leído "arriba"/ No se reporta el valor obtenido con la *Torshear* puesto que fue el ensayo que resultó ser inusual y por lo tanto no comparable.

7 Conclusiones y recomendaciones

7.1 Verificación de cumplimiento de los objetivos planteados

Al final de este trabajo se puede decir que, siguiendo la estructura y objetivos planteados (Capítulo 1), se logró determinar con cierto nivel de dispersión la resistencia residual drenada de dos suelos finos, provenientes de Ochomogo en Cartago (caracterizados en el Capítulo 3). Se determinó la resistencia residual utilizando los dos equipos disponibles (corte directo reversivo y corte torsional) y se compararon los resultados obtenidos. Para lograrlo se generó una metodología experimental suficiente y replicable (Capítulo 4). Se plantearon y aplicaron todas las formas de interpretación y reporte de resultados que se pueden encontrar en la literatura del tema (Capítulo 6). Se realizó una revisión bibliográfica para construir la base teórica que respalda estas metodologías e interpretaciones (Capítulo 2).

Gracias a lo anterior, se provee en este trabajo, además de la metodología para llegar a ellos con ambas máquinas, los primeros valores de referencia de resistencia residual de suelos esencialmente arcillosos, uno CH y otro MH, en Costa Rica. Estos podrían ser los primeros resultados publicados para este tipo de ensayos en la región, pues durante la revisión bibliográfica no se encontraron valores asignados a materiales con características semejantes.

Es necesario que se realicen más ensayos de estos para que se desarrolle cierta confianza en los resultados que se obtienen. Se espera que el trabajo de Ugarte (2014) y este, continúen por ser una guía accesible que permita la propagación de este tipo de ensayo.

7.2 Ideas más importantes que se desprenden de los resultados obtenidos

- La velocidad de falla parece no ser importante para determinar valores de resistencia residual como si es a la hora de determinar valores de resistencia pico en condición drenada.
- La similitud de los resultados obtenidos con uno u otro equipo, confirma que estos valores de resistencia residual son comparables, puesto que son indiferentes a la forma de la preparación de la muestra. Esto también respalda la idea de que la resistencia residual de los suelos finos esté controlada por las partículas de tamaños menores a 2 μm , denominadas arcillas.

- Como se esperaba, existe una pérdida de resistencia al pasar de un estado pico al residual. La magnitud de la pérdida parece depender del suelo.
- Fue posible comparar los valores de ϕ_r' y ϕ_{rs}' obtenidos con resultados de correlaciones propuestas por autores referentes en el tema: se obtuvo en la mayoría de los casos valores muy cercanos.

Se tomaron los valores de estas correlaciones como punto de comparación suficiente. Estas correlaciones parecen haber descrito bien el comportamiento del suelo 1, no tanto el del suelo 2, pues este caso se obtuvo más dispersión de los resultados, tal vez ocasionada por la falta de repetitividad.

- A pesar de haber encontrado más recomendable el uso de la máquina *Torshear*, existen insumos enriquecedores que nacen al comparar los resultados obtenidos en una y otra máquina y beneficios al utilizar la *Shearmatic*, como también obtener la envolvente pico.

7.3 Análisis mineralógicos

Si bien esto no era el objetivo principal del trabajo, realizar análisis mineralógicos toma importancia al considerar que es posible que la resistencia residual de los suelos finos esté controlada por las partículas de tamaños menores a 2 μm . Es valioso el aporte de estas curvas (así como patrones de difracción) por que abren posibilidades en el futuro de buscar desarrollar estos temas, ya que primero para lograr interpretaciones completas y mejores a partir de estos ensayos, hay que tener puntos de comparación.

Tal vez hubiera sido mejor, utilizar el ensayo DTA que mide cambios en la energía (el de TGA no). Según la experiencia del autor de este documento hay más información y curvas caracterizadas para este método de ensayo que para el TGA/DTG, que no ha sido bien estudiados como para asignar rangos de resultados para suelos típicos, por lo que hubiera sido más robusta la interpretación de las curvas.

El autor de este documento cree que existe mucho potencial en la interdisciplinariedad. Este tipo de investigaciones, mejoran al incluir acercamientos desde varias disciplinas.

7.4 Recomendaciones metodológicas

En primera instancia, se recomienda utilizar las metodologías planteadas en este trabajo como referencia para trabajos similares. No sólo en términos de cómo determinar la resistencia residual con los equipos utilizados sino además realizar ensayos de

caracterización y composición del suelo para plantear importantes relaciones y determinar órdenes de magnitud que den confianza a lo reportado.

Sin embargo, se reconoce que al final de este proceso hay decisiones que el autor hubiera deseado afrontar con el conocimiento que ahora tiene. Es importante este conocimiento para quien en el futuro tenga que pasar por procesos de toma de decisiones similares al desarrollar investigación en estos temas.

- A la hora de preparar las muestras de suelo para los ensayos en la máquina *Torshear*, hubiera sido una posibilidad llevar las muestras remoldeadas de suelo a un contenido de humedad menor que el LL, eso sí, siempre mayor que el LP. Utilizar w más bajos hubiera repercutido en que se obtuvieran muestras con densidades más altas.

Alguien, que al preparar la muestra la lleve a un w más bajo que el LL, debe atender a que no quede aire atrapado en la muestra y puede esperar una muestra menos pastosa pero más difícil de manipular que la que se obtuvo para estos ensayos. Además, podría esperar contracciones menos abruptas y menos pérdida de material.

- Existe la posibilidad de realizar los ensayos en ambas máquinas en la modalidad multietapa. Esto puede implicar ahorros considerables de tiempo y material. El reto de implementar esta modalidad está en estudiar las repercusiones posibles de su aplicación, para conocer qué tan viable es.
- Se recomienda, en la medida de lo posible, modificar alguna de las cajas de corte del laboratorio para que sea posible medir, durante los ensayos, la presión de poro.
- Se recomienda, en caso de decidir realizar una interpretación que diferencie los puntos por encima y por debajo del esfuerzo de preconsolidación, elegir los esfuerzos normales de los ensayos de tal forma que se obtengan suficientes resultados para analizar ambas condiciones.
- Podría, en el futuro, retomarse la iniciativa de relacionar valores de resistencia residual con la mineralogía a través de ensayos XRD en algún otro proyecto de investigación. El contacto realizado con el departamento coordinador (parte de la Escuela de Química de la UCR) de este equipo se puede retomar escribiendo al correo electrónico: DIFRACCIONRAYOSX.EQ@ucr.ac.cr
- También podría retomarse en algún otro proyecto de investigación, la idea de tomar fotografías microscópicas de las superficies de falla en sus distintos estados. El contacto realizado con el departamento coordinador de este equipo se puede retomar escribiendo al correo electrónico: adrian.pinto@ucr.ac.cr

- Finalmente, se recomienda siempre realizar repetición de los ensayos con tal de no tener dudas de haber cometido un error de medición o de montaje, y corroborar con confianza los resultados planteados al final de la investigación.

7.5 Futuras líneas de investigación

- Análisis de velocidades para ensayos de corte drenado.
 - Tanto para evaluar las propuestas de Gibson & Henkel (1954) para calcular t_f , como para determinar la validez del procedimiento recomendado por ASTM en la norma D6467 para ensayos en la máquina *Torshear*.
 - Análisis de la magnitud real de d_f .
- Generar valores de referencia para la resistencia residual de diferentes suelos.
- Investigar los efectos del cambio de densidad (diferencias en la preparación de la muestra) en la resistencia residual en la máquina *Torshear*. Como se indicó antes, en este proyecto se tuvo confianza en que los valores no cambian pero esta es una hipótesis que se debe poner a prueba.
- Realizar ensayos sin precorte con muestras inalteradas en la máquina *Torshear* con tal de tratar de obtener valores de resistencia pico además de la residual.
- Complementar trabajos en los que se determine la resistencia residual con ensayos de la máquina Triaxial para comparar los resultados, en especial los porcentajes de saturación y los resultados de resistencia en condición drenada.
- Investigar el comportamiento de la c_r' de ajuste y proveer una explicación fundamentada de su origen.
- Determinar valores de resistencia residual en condición no drenada.
- Investigar más a fondo y, generando más datos, la incidencia de utilizar uno u otro equipo. Un posible énfasis es probar la uniformidad de la aplicación de los esfuerzos en las muestras al utilizar las diferentes máquinas.
- Ahondar en la relación que existe entre el tamaño, la forma y la textura de las partículas (tamaño menor a 2 μm), mineralogía y plasticidad con la resistencia residual. Esta relación se tuvo presente a lo largo de este trabajo, sin embargo no se pudo investigar a fondo.

Nota: Se adjunta a este documento, en un CD, un apéndice digital con los datos medidos en crudo de todos los ensayos realizados en este trabajo, además de fotografías complementarias y las hojas de cálculo utilizadas para procesar dichos datos. También se adjuntan certificados de calibración de los equipos utilizados.

Referencias bibliográficas

- American Society for Testing Materials. (2006). Standard Test Methods for Torsional Ring Shear Test to Determine Drained Residual Shear Strength of Cohesive Soils. Designation D6467-13.
- American Society for Testing Materials. (2007). Standard Test Methods for Particle-Size Analysis of Soils. Designation D422-63 (Reapproved 2007).
- American Society for Testing Materials. (2009). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens. Designation D7263-09.
- American Society for Testing Materials. (2010). Standard Methods for Liquid Limit, Plastic Limit and Plasticity Index of Soils. Designation D4318-10.
- American Society for Testing Materials. (2010). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solid by Water Pycnometer. Designation D854-10.
- American Society for Testing Materials. (2011). Standard Practice Classifications of Soils for Engineering Purposes (Soil Unified Classification System). Designation 2487-11 .
- American Society for Testing Materials. (2011). Standard Test Methods for Direct Shear Test of Soil Under Consolidates Drained Conditions. Designation D3080/D3080M-11.
- American Society for Testing Materials. (2011). Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading. Designation D2435/D2435M-11.
- Asociación Costarricense de Geotecnia. (2009). *Código de Cimentaciones de Costa Rica*. Cartago: Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Bardet, J.-P. (1997). *Experimental Soil Mechanics*. Los Ángeles, California: Prentice Hall.
- Bayin, A., Cevikbilen, M. H., & Iyisan, R. (2012). Comparison of residual strength determined by different methods. *International Students' Conference of Civil Engineering*. Istanbul: ISCCE.
- British Standard Methods. (1990). *BS 1377: Part 7. Shear Strength tests (total stress)*.
- Bromhead, E. N. (1979, Junio). A simple ring shear apparatus. *Ground Engineering*, 12(5), 40-44.

- Bromhead, E. N., & Curtis, R. D. (1983). A comparison of alternative methods of measuring the residual strength of London clay. *Ground Engineering*, 16, 39-41.
- Bromhead, E. N., & Dixon, N. (1986). The field residual strength of London clay and its correlation with laboratory measurements, especially ring shear tests. *Géotechnique*, 36(3), 449-452.
- Brown, A. W. (1971). A New Ring Shear Apparatus and Its Application to the Measurement of Residual Strength. *Géotechnique*, 21(4), 273-328.
- Chandler, R. J., Pachakis, M., Mercer, J., & Wright, J. (1973). Four long term failures of embankments founded on landslips. *O.J.Eng.Geol.*, 6, 405-422.
- Das, B. M. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones*. México, DF: CENGAGE Learning.
- Gilltot, J. E. (1968). *Clay in engineering Geology*. Amsterdam London New York: Elsevier Publishing Company.
- Gonzales de Vallejo, L. (2015). *Ingeniería Geológica*. Pearson Educación.
- Hawkins, A. B., & Privett, K. D. (1985). Measurement and use of residual shear strength of cohesive soils. *Ground Engineering*, 22-29.
- Head, K. H. (1994). *Manual of Soil Laboratory Testing* (3 ed., Vol. 1). Dunbeath, Scotland, UK: Whittles Publishing.
- Hvorslev, M. (1937). *On the strength properties of remoulded cohesive soils*. Copenhagen: Danmarks Naturvidenskabelige Samfund.
- Hvorslev, M. (1939). Torsion shear tests and their place in the determination of the shearing resistance of soils. *Proc. Am. Soc. Test. Mater.*, 39, 999-1022.
- La Gatta, D. P. (1970). *Residual strength of clays and clay-shales by rotation shear tests*. Harvard University: Thesis (Ph. D.).
- Leal, G. R. (2012). Estimación de esfuerzos efectivos a partir del parámetro c de Bishop en una arena limosa. *Ingeniería Investigación y Tecnología, volumen XIV (número 2)*, 139-151.
- Libby, L. A. (1981). *Análisis de estabilidad para Taludes en Suelos Residuales. Autopista Tres Ríos-Cartago*. San José: Universidad de Costa Rica.

- Lupini, J. F., Skinner, A. E., & Vaughan, P. R. (1981). The drained residual strength of cohesive soils. *Géotechnique*, 31(2), 121-213.
- Mitchell, J. K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior* (2 ed.). University of Berkeley, California: Wiley & Sons.
- Nuñez, M. (2010). *Efecto del contenido de humedad inicial sobre los límites de consistencia de suelos derivados de cenizas volcánicas en Costa Rica*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Rodriguez, J. P. (2001). *Análisis del comportamiento de limos de baja plasticidad*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Skempton, A. (1953). The Colloidal "Activity" of Clays. *Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (pp. 57-61). Switzerland.
- Skempton, A. W. (1964). Long-Term Stability of Clay Slopes. *Géotechnique*, vol 14, num. 2, 77-102.
- Skempton, A. W. (1985). Residual Strength of Clays in Landslides, Folded Strata and the Laboratory. *Geotechnique*, vol 35, núm. 1, 3-18.
- Solís, V. (1998). *Determinación de la resistencia al corte en limos de baja plasticidad*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Stark, T., & Eid, H. (1993). Modified Bromhead Ring Shear Apparatus,. *Geotechnical Testing Journal*, 16(1), 100-107.
- Stark, T., & Eid, H. (1994). Drained residual strength of cohesive soil. *Geotechnical*, ASCE.
- Stark, T., & Eid, H. (1994, Mayo). Drained Residual Strength of Cohesive Soils,. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(5), 856-871.
- Stark, T., & Vettel, J. (1992, Marzo). Bromhead Ring Shear Test Procedure. *Geotechnical Testing Journal*, 15(1), 24-32.
- Suárez, J. (2002). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Universidad Industrial Santander.
- Thiel, R. (s.f). PEAK VS RESIDUAL SHEAR STRENGTH FOR LANDFILL BOTTOM LINER. *Thiel Engineering, Oregon House, CA, USA*.
- Tiwari, B., & Mauri, M. (2005). A New Method for the Correlation of Residual Shear.

- Tonle, I. K., & Detellier, C. (2008). Nanohybrid materials from interlayer functionalization of kaolinite. Application to the electrochemical preconcentration of cyanide. *Applied Clay Science*.
- Ugarte, M. (2014). *Implementación del equipo de corte torsional para la determinación de la resistencia residual en suelos cohesivos*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Vallejo, G. d., Ferrer, Ortuño, & Oteo. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- Vargas, C. (2012). *Efecto del remoldeo en las propiedades físico-mecánicas de suelos típicos del Gran Área Metropolitana*. San José: Universidad de Costa Rica.
- Vargas, W. (1998). *Ring shear tests on large deformations of sand*. Tokyo: University of Tokyo.
- Vargas, W. (2013). *Notas para el curso Mecánica de Suelos 1 impartido en la Universidad de Costa Rica en el primer semestre del 2013*. San José.
- Vargas, W. (s.f). *Notas para el curso Mecánica de Suelos 1 impartido en la Universidad de Costa Rica en el primer semestre del 2013*. San José.
- Vithana, S. B., Nakamura, S., Gibo, S., Yoshinaga, A., & Kimura, S. (2011). Correlation of large displacement drained shear. *Landslides*, 305-314.

Apéndices

Apéndice 1: Particularidades de funcionamiento de la máquina *Shearmatic* y manejo de datos de normalización de resultados

La presente sección pretende determinar, explicar y compensar o corregir incongruencias encontradas en los resultados obtenidos con la máquina de corte directo (normal y residual) *Shearmatic* (Figura 119) presente en el Laboratorio de Geotecnia del LanammeUCR

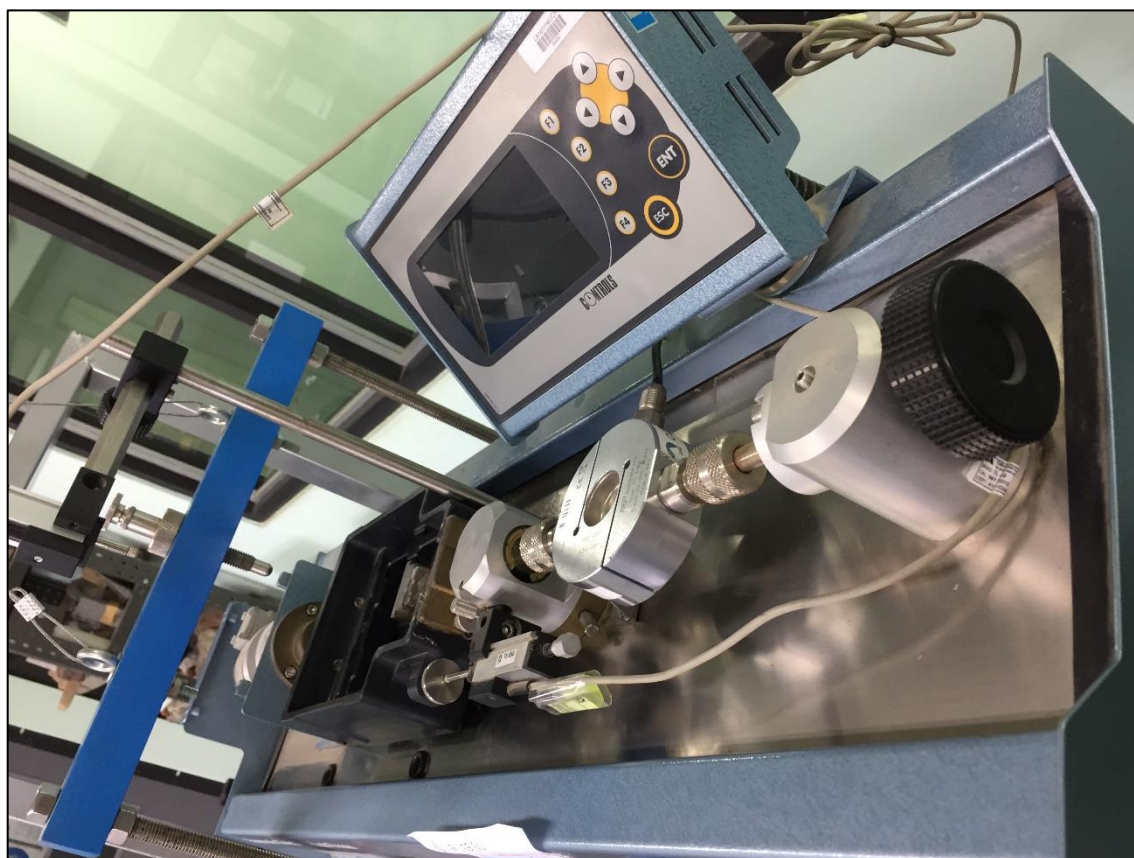


Figura 119. Máquina *Shearmatic*, Lanamme-UCR

Esta máquina no funcionó adecuadamente en el momento de su compra. Una parte neumática de la máquina que ejercía presión normal sobre los especímenes que se fallan fue removida y se adecuó un marco metálico para colocar las cargas normales manualmente. Se considera que el remiendo fue exitoso y no es causa de las incongruencias tratadas.

En el siguiente gráfico (Figura 120), generado con los datos medidos con la máquina, se indican tres fenómenos que no se explican de forma clara, son lo que se llama acá: incongruencias.

1. En desplazamiento cero, la fuerza es distinta de cero. Esto implicaría que sin haber desplazamiento (una acción) existe un esfuerzo cortante generado por el suelo (reacción).
2. En la parte inicial del ensayo, habiendo desplazamiento, no hay cambio en la fuerza medida. Esto implicaría que el suelo se está deformando y no presenta un cambio en la resistencia a esa deformación: que el suelo está en estado crítico desde el inicio del ensayo. Lo que no parece razonable.
3. En la parte elástica de la curva fuerza-deformación hay un valle de esfuerzo: desplazamiento sin cambio de resistencia. Pareciera como si el suelo tomara un valor de resistencia y lo perdiera, volviera a tomar más resistencia y la perdiera de nuevo... como si fuera discontinuo. Como es sabido, esto no ocurre en la resistencia del suelo al aplicarle deformación.

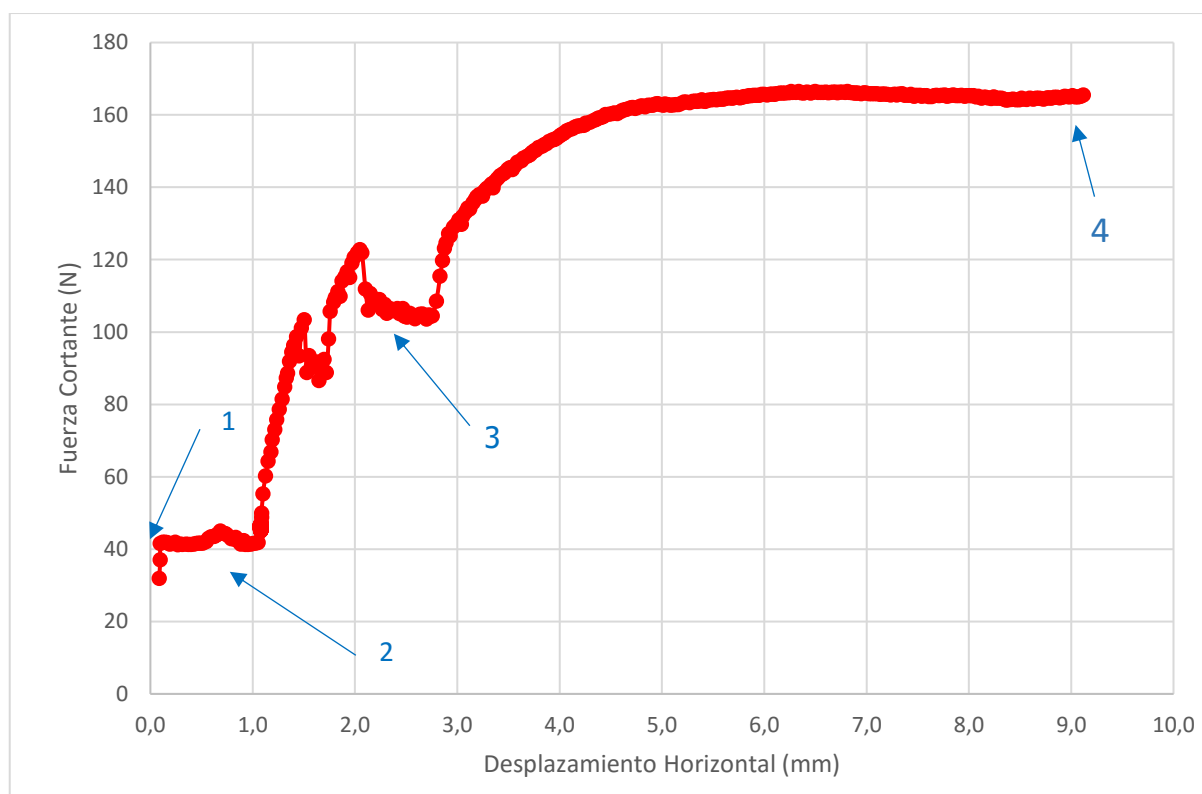


Figura 120. Gráfica fuerza-deformación de un suelo sometido a la falla de corte directo en la máquina Shearmatic

4. Se le puede indicar a la máquina que aplique una deformación dada y en el momento del ensayo la deformación resulta ser distinta. Por ejemplo, al realizar el ensayo del que se tomaron los datos representados en la Figura 120, se indicó a la máquina que se desplazara hasta los 10mm y sólo se registran datos de deformación cercanos

a los 9mm⁸⁷. Al realizar ensayos cíclicos sucede lo siguiente: la caja de corte no regresa hasta el origen sino que llega hasta cierta deformación y vuelve. (Figura 121)

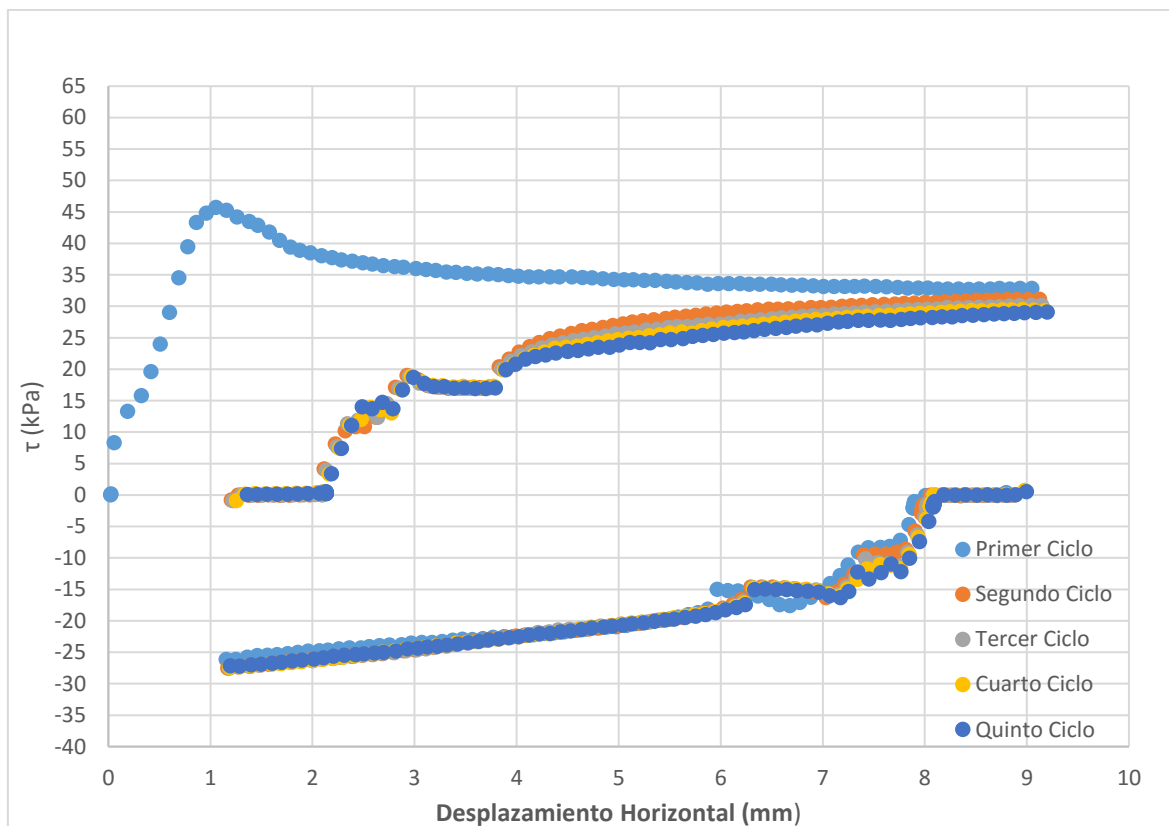


Figura 121. Gráfica esfuerzo-deformación de un suelo sometido a la falla de corte directo cíclico en la máquina Shearmatic

- Lo último y más importante, es que se notó que la deformación medida no era igual a la experimentada por la muestra. Por ejemplo, en la Figura 122, se muestra como al final de un ensayo, la deformación es de cerca de 4mm. Los medidores de la máquina indicaban cerca de 2mm, que era lo típico ya que la máquina no llegaba a la posición cero.

⁸⁷ Se considera que lo más lógico es que este problema se deba a los momentos en los cuales la caja de corte se detiene (se explica más adelante), es decir, como consecuencia de esto.

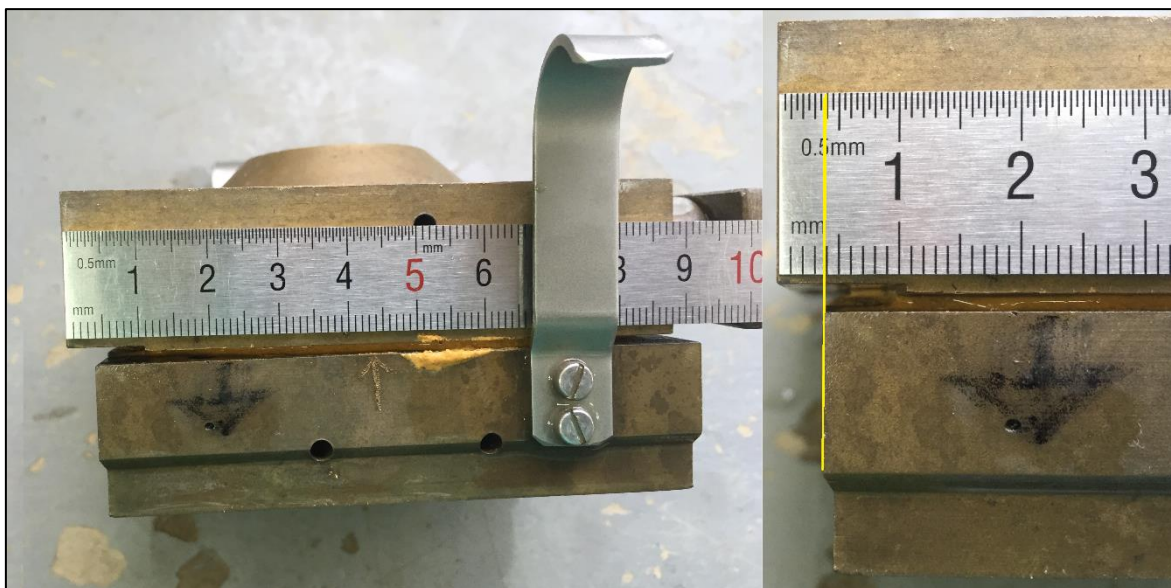


Figura 122. Caja de corte circular después de un ensayo de corte directo residual reversivo

Los puntos 4 y 5 (con más importancia el 5) implican limitaciones importantes en el control del ensayo al utilizar esta máquina y la confianza que se pueda tener en las deformaciones medidas.

Estas incongruencias se dan por desperfectos en la máquina.

Al iniciar un ensayo, la máquina se “recupera” llevando la caja de corte a una posición de inicio, este movimiento genera que se tome un valor de carga en la celda con el que se inicia el ensayo. La Figura 123 muestra el ensamble entre el brazo de carga y la caja de corte, que tiene forma de “T”; en esta se indica el espacio que existe entre el brazo que lleva a la celda de carga y el mecanismo de la caja de corte que, durante el ensayo, se mueve hacia el brazo. Este espacio que debe recorrer la caja de corte antes de estar en contacto con el brazo de carga, que es el que inmoviliza la parte superior de la caja en el ensayo, es el desplazamiento que no genera cambios en las mediciones de fuerza; porque la caja aún no toca el brazo de carga. Lo mismo sucede en el ensamble entre el pistón y la caja (ver Figura 124), que tiene una configuración similar a la del ensamble caja-brazo.

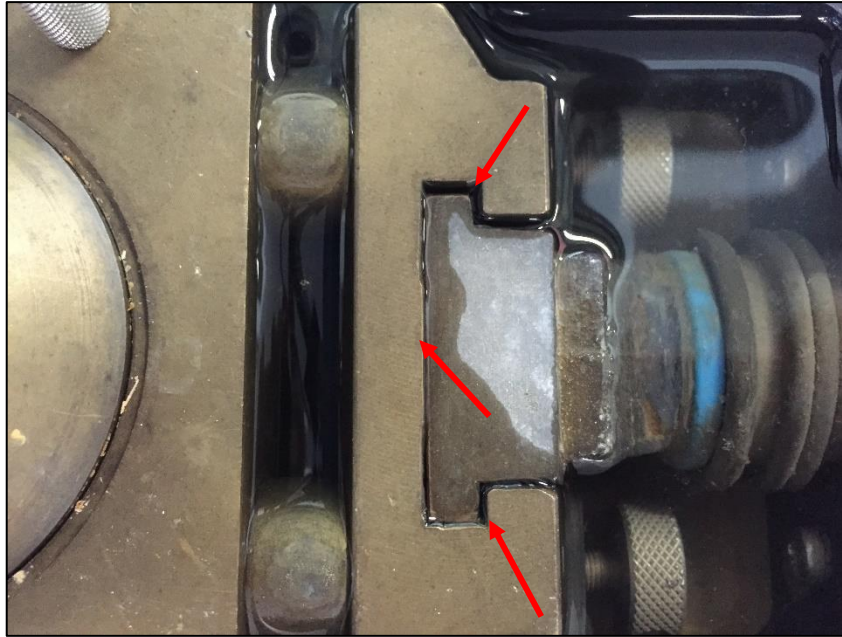


Figura 123. Ensamble caja-brazo de máquina Shearmatic

El mecanismo que mueve la caja de corte es un pistón que a su vez se moviliza por un motor (Figura 124). La caja de corte se desliza sobre dos tiras de balines que viajan a lo largo de dos rieles (Figura 125). El tercer fenómeno se debe a pérdidas o picos de fricción (resbalones) en estos componentes mecánicos. Estos generan fricción por algún obstáculo que se encuentran en su camino y la pérdida de esa fricción al sobrepasarlo. Al ser las fuerzas que se miden en estos ensayos bajas y las velocidades de corte lentas, se vuelven evidentes estas fuerzas que en otros casos serían despreciables.

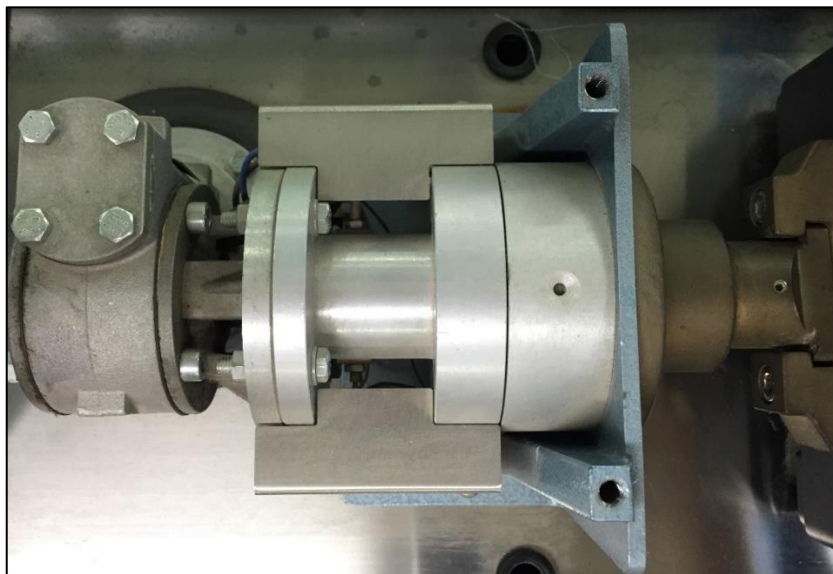


Figura 124. Motor y pistón que mueve la caja de corte de la máquina Shearmatic



Figura 125. Rieles y tiras de balines bajo la caja de corte de la máquina Shearmatic

Además, el motor de la máquina no mueve la caja de corte de forma constante, como se indica en la gráfica (Figura 126), se detiene en algunos puntos. Esto puede ser o no causado por la misma fricción que genera la incongruencia número 3.

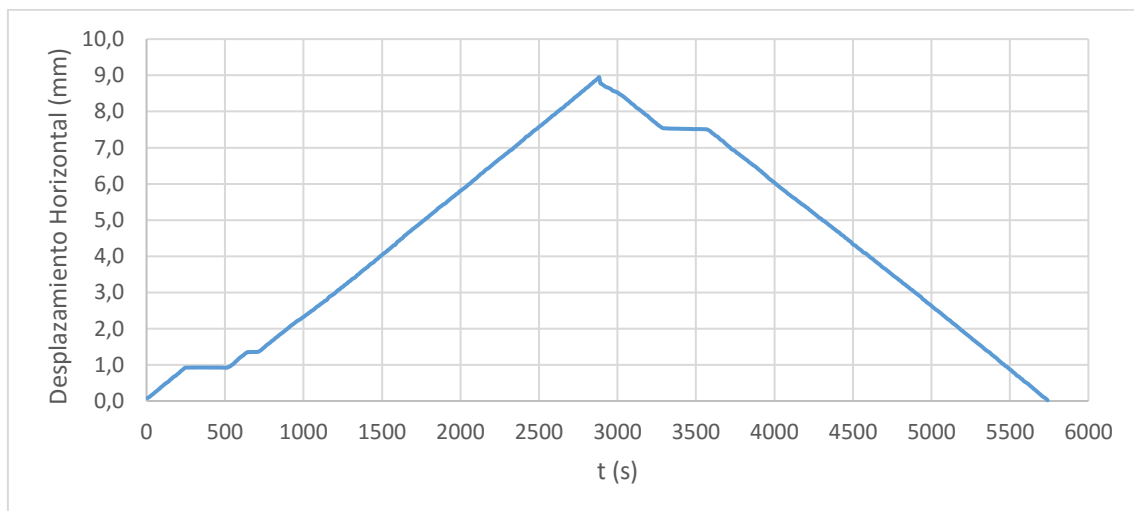


Figura 126. Gráfica de posición-tiempo de la caja de corte para un ensayo (hacia adelante y reversa) de corte directo en la máquina Shearmatic

Los conflictos señalados en los puntos 4 y 5 están relacionados entre sí y se considera que se dan como consecuencia de las observaciones recién detalladas.

Señaladas y explicadas las incongruencias, se indica cómo se enfrentaron.

La perilla negra que se encuentra al inicio del brazo de la celda de carga, que se puede ver en la Figura 119, mueve el brazo; si este se mueve hasta que el ensamble caja-brazo esté en contacto y el usuario se asegura de que la caja de corte esté en la posición de inicio

antes de iniciar el ensayo entonces se puede esperar que desaparezcan las incongruencias número 1 y 2.

En el caso del ensayo de corte directo residual (adelante y reversa) no se puede solventar la incongruencia número 2 de esta forma, puesto que al cambiar de dirección el ensamble dejará de estar en contacto. En algunos casos, no será posible ajustar a la perfección el ensamble y la "recuperación" de la máquina generará que la Figura 126 celda tome un valor de carga, este valor es ficticio; no se debe ajustar la perilla negra una vez que inicia el ensayo. En estos casos se debe corregir ajustando los datos medidos por la máquina para que la curva de fuerza-deformación inicie en el punto (0,0) y eliminar la parte de la gráfica que corresponde a la incongruencia número 2.

La incongruencia número 3 es más difícil de solventar, y tal vez siempre esté ahí pero se puede reducir haciendo labores periódicas de mantenimiento de limpieza y lubricación. Se puede eliminar esta parte de la gráfica y unir las partes congruentes en la fase de procesamiento de datos. Es posible identificar de qué parte del mecanismo exactamente proviene la disturbación con una revisión en detalle de la máquina.

Por otro lado, la configuración del sistema debe estar alineada, se desalinea con frecuencia por lo que es importante revisar y corregir esto antes de iniciar un ensayo. El ensayo de corte directo debe generar deformación sólo en la dirección en la que se mide el esfuerzo cortante.

Estas incongruencias son sistemáticas, controlables y compensables. Si se enfrentan correctamente, ninguna tiene por qué influir en el resultado final de los ensayos realizados en esta máquina. Además, y en particular para la investigación que compete al autor de este documento (resistencia residual), las incongruencias 1, 2 y 3 se dan lejos del estado crítico de la muestra (final de la gráfica), por lo que, con más razón, se cree que estas incongruencias no invalidan de ninguna forma los resultados obtenidos con los ensayos realizados en esta máquina.

Los conflictos 4 y 5 no se pueden arreglar o maquillar, están y son limitaciones importantes de la máquina. No implican que no se pueda conseguir determinar la resistencia residual de un suelo con esta máquina puesto que sólo afectan la medición de la deformación real.

Se considera que el hecho de que el motor se detenga en algunos puntos del ensayo no afecta los resultados obtenidos y no se debe hacer nada al respecto. Probablemente esto sea causado por un desperfecto en la parte neumática del sistema, esto se debe revisar

más a fondo si se quiere acreditar el ensayo o apegarse a las normas ASTM⁸⁸ respectivas ya que la velocidad de falla no sería constante; como se puede ver en la en los momentos en los que el movimiento no se detiene, la velocidad de corte parece ser constante y aproximadamente la deseada (aún que sí se registraron valores menores en el tercer decimal).

Todo lo anterior fue consultado y corroborado con el Ingeniero Mecánico Humberto Tioli Mora, Coordinador Unidad de Gestión de Calidad & Jefe Laboratorio de Fuerza del LANAMME UCR.

En una etapa posterior, en este proyecto, se consultó al respecto de la situación a Pier Luigi Ravioli de la empresa Controls (proveedora de los equipos). Él, en sus respuestas indicó, como se planteaba antes, que existen ciertas aberturas entre la caja de corte y el mecanismo que generan los problemas de falta de movimiento en determinados momentos del ensayo y que la caja no regrese a su punto de partida al final de los ciclos. Un aporte importante que señaló Ravioli, no considerado ni aplicado antes es que existen, a la derecha del carruaje (caja negra donde se coloca e inunda la caja de corte) dos tornillos plateados horizontales; se debe rotar en sentido horario estos tornillos, una vez que ya se ha colocado la caja de corte en su lugar, esto permite ajustar el carruaje de forma tal que no se mueva si no es por acción del motor de la máquina. Según Ravioli, probablemente esto solucione el problema de los "resbalonazos" y se elimine el problema señalado antes como incongruencia 3.

No hubo oportunidad de probar este ajuste durante este trabajo. No se cree que esta solución sea tan definitiva y efectiva como para evitar que los problemas se sigan dando. Lo cierto es que para poder realizar este ajuste se debe quitar el silicón que se utilizó para sellar la caja de corte (por que perdía agua) en algún momento (Figura 127), ya que esto impide realizar este ajuste de forma adecuada.

⁸⁸ En este caso, el conflicto 5 también debería arreglarse.

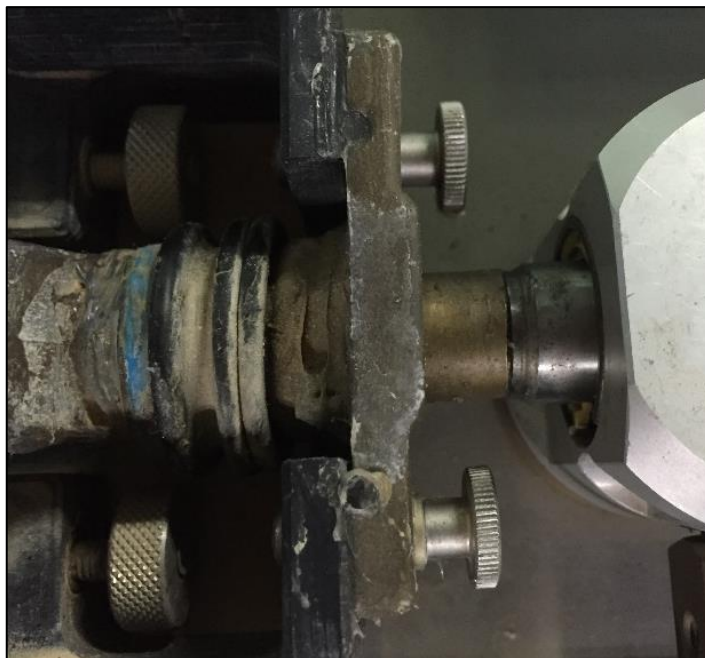


Figura 127. Pegas de silicón en la caja de corte de la Shearmatic

Para futuras referencias: El contacto con esta persona se realizó por el correo electrónico plraviolo@controls.it

Apéndice 2: Una herramienta para obtener muestras inalteradas y ensayarlas en la máquina Torshear

Como parte de esta investigación, se propuso la posibilidad de fallar muestras inalteradas en la máquina de corte anular torsional. Para lograr esto primero era necesario una herramienta para lograr moldear las muestras. Se realizaron los diseños (Figura 128) de lo que se pensaba sería suficiente para lograrlo y se confeccionó⁸⁹ dicha herramienta (Figura 129) que consta de dos anillos con filo en uno de sus lados (con las medidas de la caja de corte torsional de la máquina), una guía metálica para colocar los anillos de forma concéntrica y fijarlos con 4 tornillos y una placa para extraer la muestra de los anillos.

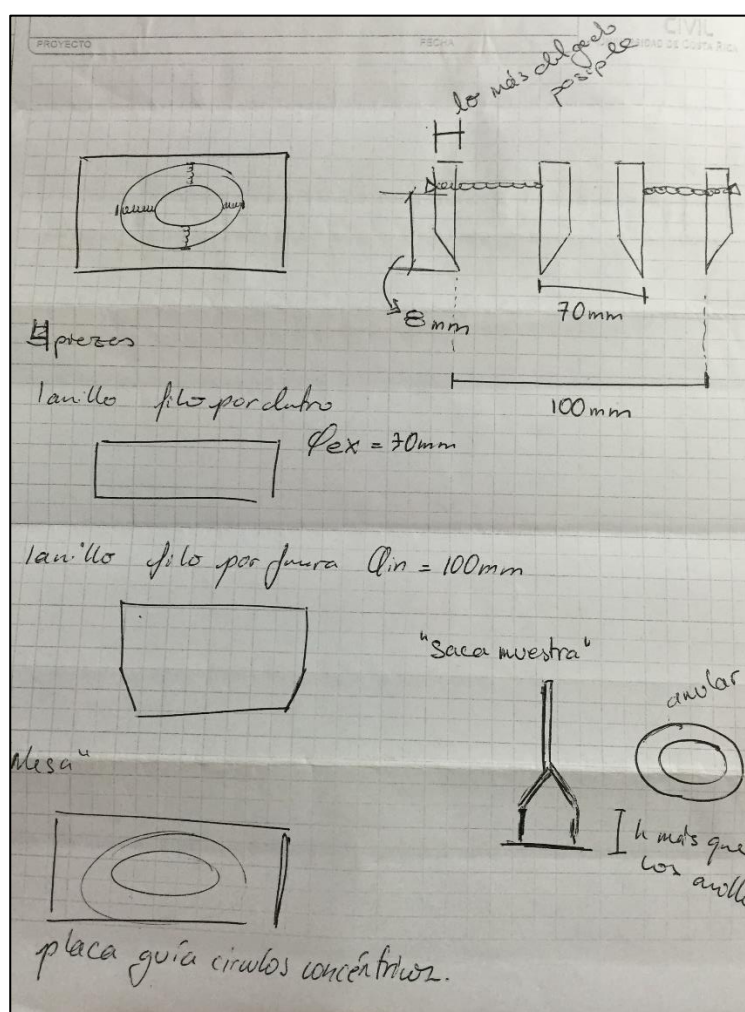


Figura 128. Diseño original de la herramienta

⁸⁹ Daniel del LanammeUCR del laboratorio de fuerza la confeccionó

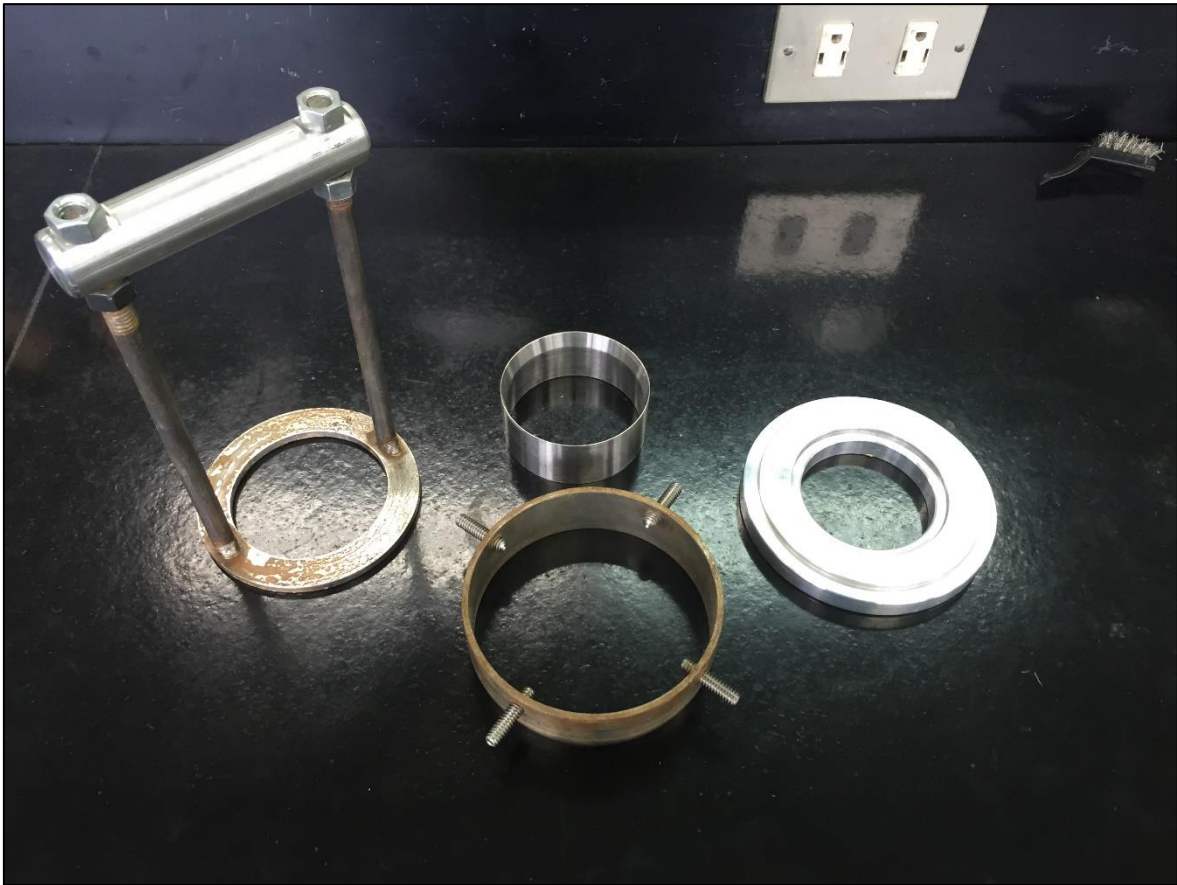


Figura 129. Partes de la herramienta confeccionada

Seguidamente se explica cómo funciona dicha herramienta:

6. Se acomodan de forma concéntrica los anillos utilizando la guía provista.

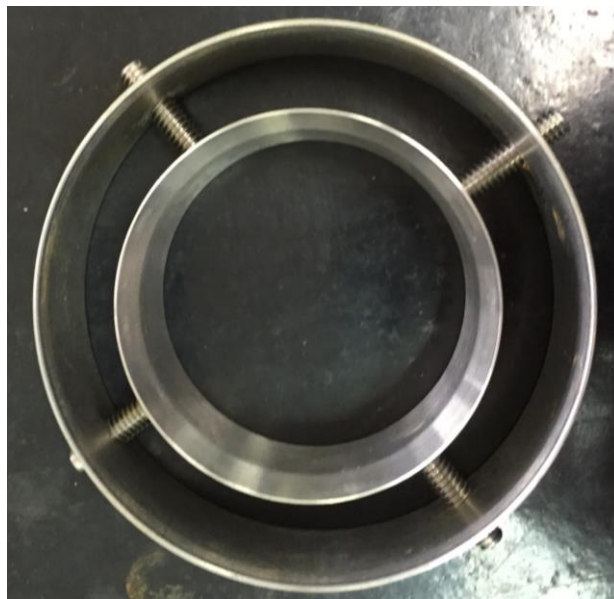


Figura 130. Uso de la herramienta confeccionada 1

7. Se introducen los anillos en un bloque de suelo con la ayuda de un cuchillo para moldear la muestra y una cuchara para extraer la muestra de adentro del anillo más pequeño. Esto se debe hacer hasta que los anillos quedan llenos de muestra hasta los tornillos (Figura 131, derecha) y luego se elimina o allana la muestra sobrante del otro lado (Figura 131, izquierda).



Figura 131. Uso de la herramienta confeccionada 2

8. Se utiliza la placa para extraer la muestra de los anillos, una vez que se han quitado los tornillos, y de una vez introducirla en el dispositivo anular que alberga la muestra en la máquina a la hora de la falla.



Figura 132 Uso de la herramienta confeccionada 3

9. Finalmente se allana este otro lado de la muestra y está listo el espécimen anular para el procedimiento de falla.

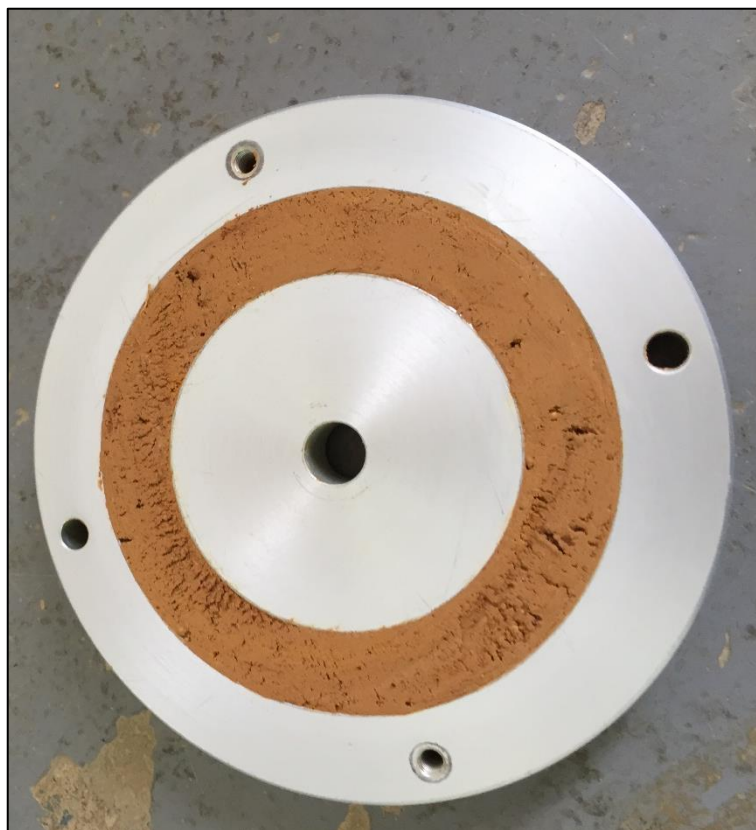


Figura 133. Uso de la herramienta confeccionada 4

Lastimosamente, como se explica en 4.1.5, no es conveniente utilizar esta herramienta para el uso previsto, pero se puede utilizar en el futuro para otras formas de ensayo u otros tipos de suelo con ciertas condiciones