



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN MEDIANTE EL ENSAYO TRIAXIAL CU DE LA RELACIÓN DE
COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE
ARCILLA Y ARENA DE MUESTRAS REMOLDEADAS DE LA ZONA DEL
DESCANSO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTORES: STALIN DANIEL CABRERA ARMIJOS

LUIS DAVID MALDONADO JIMÉNEZ

TUTOR: ING. ALFREDO VLADIMIR VÁZQUEZ ROURA, MSc.

Cuenca - Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Stalin Daniel Cabrera Armijos con documento de identificación N° 1105866477 y Luis David Maldonado Jiménez con documento de identificación N° 0107959298; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 24 de febrero del 2026

Atentamente,



Stalin Daniel Cabrera Armijos

1105866477



Luis David Maldonado Jiménez

0107959298

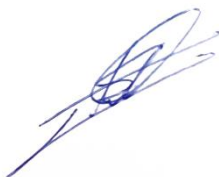
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

Nosotros, Stalin Daniel Cabrera Armijos con documento de identificación N° 1105866477 y Luis David Maldonado Jiménez con documento de identificación N° 0107959298, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto de investigación: “Evaluación mediante el ensayo triaxial CU de la relación de cohesión y ángulo de fricción en función del porcentaje de arcilla y arena de muestras remoldeadas de la zona del Descanso”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 24 de febrero del 2026

Atentamente,



Stalin Daniel Cabrera Armijos

1105866477



Luis David Maldonado Jiménez

0107959298

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Alfredo Vladimir Vázquez Roura con documento de identificación N° 010346410, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN MEDIANTE EL ENSAYO TRIAXIAL CU DE LA RELACIÓN DE COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE ARCILLA Y ARENA DE MUESTRAS REMOLDEADAS DE LA ZONA DEL DESCANSO, realizado por Stalin Daniel Cabrera Armijos con documento de identificación N° 1105866477 y por Luis David Maldonado Jiménez con documento de identificación N° 0107959298, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto de investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 24 de febrero del 2026

Atentamente,



Ing. Alfredo Vladimir Vázquez Roura, MSc.
0103464103

Dedicatoria

Dedico este trabajo a Dios, por guiarme, bendecirme completamente y darme a mi madre Rita, que ha sido el pilar fundamental en toda mi vida al igual que mi padre, quien me ha enseñado muchas cosas. A mis abuelitos Luisa y Segundo por ser mis otros papás y estar siempre para mí en cada obstáculo que se me ha presentado. A mis tíos Patricia y Oliver, Felipe, Glenda y Camila, que de no ser por su ayuda no hubiera podido lograr esta meta. A mis hermanos Peter y Ángel, a quienes siempre tengo y tendré en mi corazón. Para Isys, que es una persona muy importante en mi vida.

Luis David Maldonado Jiménez

Agradecimientos

Le agradezco a Dios la bendición de vivir y conocer a personas muy importantes en mi vida, uno de ellos mi tutor, el ingeniero Alfredo Vásquez, por darme la oportunidad de aprender cosas muy importantes, quiero agradecerle por la paciencia y por enseñarnos parte de su enorme y admirable conocimiento. Agradezco a la ingeniera Elinor Flores por la paciencia y carisma que tuvo al enseñarme una y otra vez cada proceso, estar siempre pendiente de nuestras dudas y ayudarnos cuando no comprendíamos algún tema. Le agradezco a mi compañero Daniel Cabrera por su capacidad y entendimiento, a David Bustamante y Camila Castillo por apoyarme en la universidad.

Luis David Maldonado Jiménez.

Dedicatoria

Con profundo respeto y gratitud, les dedico esto a mis padres Carlos Cabrera y Silvia Armijos por el esfuerzo compartido que ha hecho posible este logro. Gracias por su apoyo constante, por la confianza que depositaron en mí y por las enseñanzas que, con el ejemplo, han guiado mi formación personal y académica. Su sacrificio, paciencia y acompañamiento en cada etapa han sido el fundamento de mi perseverancia.

Este trabajo representa no solo un objetivo cumplido, sino también una forma de honrar todo lo que han hecho por mí. Gracias por estar siempre, incluso en los momentos más difíciles. Esta meta también es suya.

Stalin Daniel Cabrera Armijos.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por concederme salud, fortaleza y sabiduría para mantenerme firme en este proceso, y por guiar cada etapa de mi formación hasta alcanzar este objetivo.

A mi familia, por su apoyo incondicional, paciencia y confianza. Gracias por acompañarme en los momentos de mayor exigencia, por motivarme a no rendirme y por ser el pilar que sostuvo mi esfuerzo durante todo el camino.

Un agradecimiento muy especial a mi tutor el Ing. Alfredo Vladimir Vázquez Roura, por su orientación académica, dedicación y acompañamiento profesional. Agradezco sus recomendaciones y su compromiso que fueron esenciales para fortalecer este trabajo y conducirlo con rigor.

Stalin Daniel Cabrera Armijos

Índice de contenido

Dedicatoria.....	I
Agradecimientos.....	II
Dedicatoria.....	III
Agradecimientos.....	IV
Índice de figuras.....	XI
Índice de tablas.....	XIV
1. Título del trabajo de titulación	1
2. Resumen.....	2
3. Abstract.....	4
4. Antecedentes	5
5. Planteamiento del problema	9
6. Justificación y relevancia	10
7. Objetivos	12
7.1. Objetivo general.....	12
7.2. Objetivos específicos	12
8. Marco Teórico.....	13
8.1. Características de los suelos.....	13
8.1.1. Fases del suelo	14
8.2. Clasificación de suelos	14

8.2.1. Suelos arenosos	15
8.2.2. Suelos expansivos	15
8.2.2.1. Limos	15
8.2.2.2. Arcillas	16
8.2.3. Sistema Unificado de Clasificación de suelos SUCS	16
8.2.3.1. Separación de suelos finos y gruesos	16
8.2.4. Sistema American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)	17
8.3. Límites de Atterberg	19
8.3.1. Límite líquido	19
8.3.2. Límite plástico	20
8.3.3. Índice Plástico	20
8.4. Muestras alteradas	21
8.5. Muestras inalteradas	21
8.6. Muestras remoldeadas	22
8.7. Ensayo triaxial no consolidado no drenado UU	22
8.8. Ensayo triaxial consolidado no drenado CU	23
8.9. Ensayo triaxial consolidado drenado CD	23
8.10. Teoría de Mohr-Coulomb	24
8.11. Parámetros del suelo	25

8.11.1. Ángulo de fricción	25
8.11.2. Cohesión	26
9. Hipótesis y supuestos	26
9.1 Hipótesis	26
9.2 Supuestos	28
10. Marco metodológico.....	28
10.1 Tipo y enfoque investigativo.....	28
10.2. Materiales	29
10.2.1. Arena	29
10.2.2. Arcilla bentonita sódica	30
10.2.3. Papel filtro	30
10.2.4. Discos Porosos	31
10.2.5. Membrana de látex	32
10.2.6. Compactador manual	33
10.2.7. Tamices No. 40 y No. 200	34
10.2.8. Tamizador	35
10.2.9. Molde para muestras sujetas a ensayo triaxial	36
10.2.10. Balanza de precisión	37
10.2.11. Strain Controlled Triaxial Tester MCGS (máquina para el ensayo triaxial) ...	38
10.2.12. Agua desaireada	39

11. Procedimiento	40
11.1. Proporciones de mezcla	40
11.2. Preparación de muestras	42
11.2.1. Proceso de conformación	43
<i>11.2.1.1. Conformación del espécimen</i>	43
<i>11.2.1.2. Retiro del molde y verificación geométrica</i>	43
<i>11.2.1.3. Acondicionamiento para la celda triaxial</i>	43
<i>11.2.1.4. Condición inicial previa al ensayo</i>	44
11.2.2. Ejecución del ensayo triaxial consolidado no drenado (CU)	44
11.3. Procesamiento de información	45
11.3.1. Fuerza axial (F)	45
11.3.2. Deformación unitaria axial (ϵ)	45
11.3.3. Área corregida (A_c)	46
11.3.4. Estado de esfuerzos	46
12. Análisis de resultados	47
12.1. Primera dosificación: muestras remoldeadas con 100% arcilla y 0% arena	48
12.1.1. Primera muestra remoldeada de 100% arcilla y 0% arena sometida a la presión 1 48	
12.1.2. Segunda muestra remoldeada de 100% arcilla y 0% arena sometida a la presión 2 49	
12.1.3. Tercera muestra remoldeada de 100% arcilla y 0% arena sometida a la presión 3. 50	
12.2. Segunda dosificación: muestras resmoldeadas con 80% arcilla y 20% arena	53

12.2.1. Primera muestra remoldeada de 80% arcilla y 20% arena sometida a la presión 1	53
12.2.2. Segunda muestra remoldeada de 80% arcilla y 20% arena sometida a la presión 2	54
12.2.3. Tercera muestra remoldeada de 80% arcilla y 20% arena sometida a la presión 3.	55
12.3. Tercera dosificación: muestras remoldeadas con 50% arcilla y 50% arena	58
12.3.1. Primera muestra remoldeada de 50% arcilla y 50% arena sometida a la presión 1	58
12.3.2. Segunda muestra remoldeada de 50% arcilla y 50% arena sometida a la presión 2	59
12.3.3. Tercera muestra remoldeada de 50% arcilla y 50% arena sometida a la presión 3.	60
12.4. Cuarta dosificación: muestras remoldeadas con 20% arcilla y 80% arena	64
12.4.1. Primera muestra remoldeada de 20% arcilla y 80% arena sometida a la presión 1	64
12.4.2. Segunda muestra remoldeada de 20% arcilla y 80% arena sometida a la presión 2	64
12.4.3. Tercera muestra remoldeada de 20% arcilla y 80% arena sometida a la presión 3.	65
12.5. Quinta dosificación: muestras remoldeadas con 0% arcilla y 100% arena	68
12.5.1. Primera muestra remoldeada de 0% arcilla y 100% arena sometida a la presión 1	68
12.5.2. Segunda muestra remoldeada de 0% arcilla y 100% arena sometida a la presión 2	69
12.5.3. Tercera muestra remoldeada de 0% arcilla y 100% arena sometida a la presión 3.	70
13. Discusión de resultados.....	79
13.1. Comparación ensayo triaxial CU Y UU	80
14. Conclusiones	84
15. Recomendaciones	87
16. Referencias bibliográficas	88

17. Anexos 90

Índice de figuras

Figura 1 <i>Papel filtro</i>	30
Figura 2 <i>Discos porosos</i>	31
Figura 3 <i>Membrana de látex</i>	33
Figura 4 <i>Objeto para compactación manual</i>	34
Figura 5 <i>Tamices No. 40, No. 200 y el respectivo fondo</i>	35
Figura 6 <i>Tamizador</i>	35
Figura 7 <i>Molde para la elaboración de muestras</i>	36
Figura 8 <i>Balanza de precisión</i>	37
Figura 9 <i>Máquina para ensayo triaxial</i>	38
Figura 10 <i>Agua desaireada</i>	39
Figura 11 <i>Muestra con 100% de arcilla dentro de la celda sometida a la presión 1 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95</i>	48
Figura 12 <i>Muestra con 100% de arcilla dentro de la celda sometida a la presión 2 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95</i>	49
Figura 13 <i>Muestra con 100% de arcilla dentro de la celda sometida a la presión 3 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95</i>	50
Figura 14 <i>Mezcla 1 - Envolvente Falla Mohr-Coulomb - 100% Arcilla</i>	51
Figura 15 <i>Mezcla 1 - Curva Esfuerzo-Deformación - 100% Arcilla</i>	52
Figura 16 <i>Muestra con 80% de arcilla y 20% de arena dentro de la celda sometida a la presión 1 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95</i>	53
Figura 17 <i>Muestra con 80% de arcilla y 20% de arena dentro de la celda sometida a la presión 2 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95</i>	54

Figura 18 <i>Muestra con 80% de arcilla y 20% de arena dentro de la celda sometida a la presión 3 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.</i>	55
Figura 19 <i>Mezcla 2 - Envolvente Falla Mohr-Coulomb - 80% Arcilla - 20% Arena.</i>	56
Figura 20 <i>Mezcla 2 - Curva Esfuerzo-Deformación - 80% Arcilla - 20% Arena.</i>	57
Figura 21 <i>Muestra con 50% de arcilla y 50% de arena dentro de la celda sometida a la presión 1 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.</i>	58
Figura 22 <i>Muestra con 50% de arcilla y 50% de arena dentro de la celda sometida a la presión 2 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.</i>	59
Figura 23 <i>Muestra con 50% de arcilla y 50% de arena dentro de la celda sometida a la presión 3 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.</i>	60
Figura 24 <i>Mezcla 3 – Envolvente Falla Mohr-Coulomb – 50% Arcilla – 50% Arena.</i>	61
Figura 25 <i>Mezcla 3 - Curva Esfuerzo-Deformación - 50% Arcilla - 50% Arena.</i>	62
Figura 26 <i>Muestra con 20% de arcilla y 80% de arena dentro de la celda sometida a la presión 1 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.</i>	64
Figura 27 <i>Muestra con 20% de arcilla y 80% de arena dentro de la celda sometida a la presión 2 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.</i>	64
Figura 28 <i>Muestra con 20% de arcilla y 80% de arena dentro de la celda sometida a la presión 3 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.</i>	65
Figura 29 <i>Mezcla 4 - Envolvente Falla Mohr-Coulomb - 20% Arcilla - 80% Arena.</i>	66
Figura 30 <i>Mezcla 4 - Curva Esfuerzo-Deformación - 20% Arcilla - 80% Arena.</i>	67
Figura 31 <i>Muestra con 100% de arena dentro de la celda sometida a la presión 1 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.</i>	68

Figura 32 <i>Muestra con 100% de arena dentro de la celda sometida a la presión 2 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.....</i>	69
Figura 33 <i>Muestra con 100% de arena dentro de la celda sometida a la presión 3 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.....</i>	70
Figura 34 <i>Mezcla 5 - Envolvente Falla Mohr-Coulomb - 100% Arena.....</i>	71
Figura 35 <i>Mezcla 5 - Mezcla 5-Curva Esfuerzo-Deformación - 100% Arena.....</i>	72
Figura 36 <i>Relación entre los diferentes porcentajes de material y la cohesión (C).</i>	76
Figura 37 <i>Relación entre los diferentes porcentajes de material y el ángulo de fricción (\emptyset). ...</i>	77
Figura 38 <i>Tabla de parámetros obtenidos a partir del ensayo triaxial UU no consolidado no drenado.</i>	80
Figura 39 <i>Gráfica de relación entre el porcentaje de arena y la cohesión (C).</i>	81
Figura 40 <i>Relación entre el porcentaje de arena y el ángulo de fricción del ensayo triaxial UU</i>	82
Figura 41 <i>Proceso de mezclado en seco de cada muestra.....</i>	90
Figura 42 <i>Armado de la muestra dentro de la celda.</i>	91
Figura 43 <i>Llenado de la mezcla en seco dentro del molde.</i>	92
Figura 44 <i>Compactado de las muestras.....</i>	93
Figura 45 <i>Papel filtro y dos anillos de sellado.</i>	94
Figura 46 <i>Plano de falla.</i>	95

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Clasificación de suelos finos sistema AASHTO.</i>	17
Tabla 2 <i>Clasificación de suelos granulares sistema AASHTO.</i>	19
Tabla 3 <i>Proporciones de mezcla variando los porcentajes de arena y arcilla.</i>	41
Tabla 4 <i>Valor de B obtenido para muestras remoldeadas.</i>	47
Tabla 5 <i>Tabla de resultados obtenidos.</i>	76
Tabla 6 <i>Cronograma de actividades.</i>	96

1. Título del trabajo de titulación

EVALUACIÓN MEDIANTE EL ENSAYO TRIAXIAL CU DE LA RELACIÓN DE COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE ARCILLA Y ARENA DE MUESTRAS REMOLDEADAS

2. Resumen

La presente investigación se desarrolla como parte del proceso de titulación, la cual propone evaluar a través de ensayos CU triaxiales cómo cambian la cohesión (C) y el ángulo de fricción (ϕ) cuando varía la proporción de arcilla y arena en muestras transformadas. El problema se contextualiza en la provincia del Azuay y especialmente en Cuenca, donde existen suelos con baja resistencia al corte y el crecimiento urbano ha impulsado la ocupación de taludes, incrementando las necesidades geotécnicas del país.

Como sustento local se citan estudios en Chaullabamba y Miraflores, que reportan alta ocurrencia de finos y arcillas, así como altos valores de plasticidad; esto refuerza la necesidad de caracterizar con precisión la resistencia teniendo en cuenta la humedad y la presión de los poros. La justificación establece que CU nos permite aproximarnos mejor a las condiciones de carga del mundo real, particularmente debido al papel de la humedad y la presión de los poros.

Las muestras se saturaron, consolidaron y luego se sometieron a corte no drenado, registrándose las tensiones principales y las respuestas tensión-deformación. Con estos resultados se construyeron los círculos de Mohr y la envolvente de falla, lo que permitió comparar el comportamiento mecánico entre mezclas e identificar tendencias en los parámetros C y ϕ dentro del rango investigado. De esta manera, el estudio genera una base experimental consistente para comprender el efecto combinado de la fracción granular y la fracción fina sobre la resistencia al corte.

Además, este trabajo tiene como objetivo proporcionar criterios técnicos para proyectos de infraestructura, particularmente en situaciones donde los suelos mixtos pueden afectar la estabilidad y el desempeño de cimentaciones superficiales y profundas. Al sistematizar el

procedimiento y el análisis realizado, la metodología es reproducible y puede ser utilizada como referencia para evaluaciones geotécnicas desarrolladas en condiciones similares.

Palabras clave: ensayo triaxial CU, arcilla, arena, suelos, saturación, consolidación, presión de poro, círculos de Mohr, ángulo de fricción.

3. Abstract

This research work is carried out as part of the degree completion process and aims to assess, through CU triaxial tests, how cohesion (C) and the friction angle (\emptyset) change as the percentage of clay and sand varies in remolded specimens. The problem is framed within the province of Azuay—particularly in Cuenca—where soils with low shear strength are present and urban growth has encouraged the occupation of hillsides, increasing the geotechnical demands on the ground.

As local support, previous studies in Chaullabamba and Miraflores are cited, reporting a high content of fines and clay together with elevated plasticity values. This reinforces the need to accurately characterize shear strength while considering moisture conditions and pore-water pressure. The justification highlights that the CU test better approximates real loading conditions, especially due to the influence of moisture and pore pressure.

The specimens were saturated, consolidated, and subsequently subjected to undrained shearing, while principal stresses and the stress–strain response were recorded. Based on these results, Mohr circles and the failure envelope were constructed, allowing the mechanical behavior of the different mixtures to be compared and trends in C and \emptyset to be identified within the studied range. In this way, the study provides a consistent experimental basis to understand the combined effect of the granular fraction and the fine fraction on shear strength.

In addition, this work seeks to provide technical criteria applicable to infrastructure projects, particularly in situations where mixed soils may affect the stability and performance of shallow and deep foundations. The systematic documentation of the procedure and the analysis

performed enables the methodology to be reproducible and useful as a reference for geotechnical evaluations in contexts with similar conditions.

Key words: CU triaxial test, clay, sand, soils, saturation, consolidation, pore-water pressure, Mohr circles, friction angle.

4. Antecedentes

En la provincia del Azuay predominan suelos de baja resistencia a la compresión y al corte, lo que los convierte en terrenos débiles con cargas verticales y aún más críticos en laderas o

pendientes pronunciadas. La ciudad de Cuenca, ubicada en un valle rodeado de zonas montañosas, ha experimentado un crecimiento urbano que, ante la escasez de espacio en la planicie, ha impulsado la urbanización progresiva de las laderas y de las zonas altas. En este contexto local, los suelos presentan una variabilidad significativa en su composición, resultado de procesos geológicos y climáticos característicos de la región.

Dentro de la ciudad de Cuenca, se han realizado investigaciones que han demostrado que la composición granulométrica, en especial la proporción de arena y arcilla, influye directamente en la capacidad portante de los suelos y en su resistencia al corte. Campoverde y Zeas (2024) señalan que el análisis de la fracción granulométrica reveló que el suelo de Chaullabamba presenta alrededor del 77,2% de partículas finas, mientras que en Miraflores este valor es de 85,2%. Este resultado es relevante porque un mayor contenido de finos, especialmente arcilla, suele estar asociado con un comportamiento más expansivo del material. Según la prueba del hidrómetro, Miraflores registró el mayor contenido de arcilla (53,12%) frente a Chaullabamba (37,6%), confirmando una mayor ocurrencia de minerales finos en esta zona. En cuanto a la clasificación, según el sistema AASHTO, ambos suelos fueron clasificados en un grupo correspondiente al material con contenido de arcilla, teniendo en cuenta la distribución granulométrica reportada. Sin embargo, mediante el sistema SUCS las muestras se identificaron como arcillas con alta plasticidad, lo que concuerda con los resultados de plasticidad y el predominio de finos en la fracción que pasó el tamiz No. 200.

Esto indica que un mayor contenido de arcilla tiende a incrementar la cohesión, mientras que una mayor proporción de arena favorece el ángulo de fricción interna, lo que incide en la respuesta mecánica global del suelo frente a cargas externas. Esta situación ha motivado a que diversas instituciones académicas y organismos técnicos realicen estudios sobre la resistencia de

los suelos, con el propósito de garantizar la seguridad de los proyectos de infraestructura y optimizar el aprovechamiento de los recursos geotécnicos disponibles.

Se comprobó que la cohesión del suelo disminuye progresivamente con la incorporación de arena, lo que refleja la pérdida del componente cohesivo dominante a medida que aumenta la fracción granular. De manera complementaria, el ángulo de fricción interna no mostró un incremento proporcional, sino que presentó valores más bajos en mezclas intermedias, lo que sugiere una estructura inestable y transitoria del material, especialmente en suelos remoldeados. Estas observaciones ponen de manifiesto que las mezclas arena–arcilla no se comportan como una simple combinación de sus componentes extremos, sino que atraviesan estados críticos de baja resistencia que pueden comprometer la estabilidad de las estructuras si no se identifican adecuadamente.

Adicionalmente, se ha establecido que el contenido de humedad desempeña un papel decisivo en el comportamiento mecánico de los suelos cohesivos. Un aumento en la humedad tiende a acentuar el carácter plástico y cohesivo del material, reduciendo la fricción interna y afectando los esfuerzos efectivos que se desarrollan bajo carga. Este efecto resulta particularmente relevante en suelos saturados, donde el exceso de presión de poros puede disminuir la resistencia efectiva y propiciar deformaciones o fallas (Marquina y Pulla, 2025).

Los suelos de la provincia del Azuay, y en particular de la ciudad de Cuenca, presentan características geotécnicas que condicionan su capacidad de soporte, siendo determinante la proporción de arena y arcilla en su comportamiento mecánico. Los estudios realizados, como en Chaullabamba y Miraflores, confirman la alta presencia de fracciones finas y arcilla, lo que incrementa la cohesión, pero también la susceptibilidad a variaciones volumétricas, evidenciando

la necesidad de evaluaciones precisas mediante ensayos triaxiales CU para garantizar la seguridad y sostenibilidad de las construcciones en la región.

Las arcillas son un material fino al que se le atribuiría según su composición adicional un potencial de suelo expansivo creciente. Espinoza y Vargas (2022) evidencian que en muestras ensayadas correspondientes a zonas de Miraflores y Chaullabamba en Azuay y Cojitambo en Cañar, los dos primeros con un porcentaje de finos de 98,3% y 89,9% poseen un porcentaje de expansión tanto de 4,23% para Miraflores como de 5,08% para Chaullabamba mientras que Cojitambo refleja un 0,67%, en cuanto al indicador de la presión de expansión obtuvieron 2,12 y 3,54 para los correspondientes al Azuay, mientras que para el último, se observa un porcentaje bajo de 0.08 kg/cm^2 . Esta información refleja la precaución que se debe tomar al momento de analizar una estructura civil en las zonas de Cuenca, por su composición heterogénea

Demir y Cabalar (2025) llevaron a cabo una serie de ensayos triaxiales CU en mezclas de arena y limo de baja plasticidad (ML), variando tanto el contenido de finos (0–50%) como el esfuerzo efectivo de consolidación (50, 100 y 150 kPa). Los resultados evidenciaron que, al incrementar el esfuerzo de confinamiento, aumentan la resistencia desviadora, la rigidez secante E_u y la tendencia contractiva del suelo. Sin embargo, al incrementar el contenido de finos, la resistencia disminuyó y se registró un aumento en la presión de poros excedente, destacando la transición entre un comportamiento dilatante y contractivo según la fracción de partículas finas. Este estudio reafirma la capacidad del ensayo CU para identificar los estados de transición estructural en mezclas granulares y su relación con la saturación y la consolidación isotrópica. Los hallazgos sirven como antecedente directo para comprender la respuesta mecánica de mezclas arena–arcilla bajo condiciones no drenadas, que serán analizadas en la presente investigación.

5. Planteamiento del problema

Determinar las posibles variaciones entre la cohesión y el ángulo de fricción en muestras remoldeadas, en función del porcentaje de arcilla y arena, bajo condiciones de saturación y confinamiento controlado, mediante el ensayo triaxial CU.

6. Justificación y relevancia

Al diseñarse una estructura civil en una superficie como un talud, resulta indispensable caracterizar parámetros que pueden influenciar su comportamiento. El ensayo triaxial consolidado no drenado, en comparación con otros ensayos triaxiales propuestos por la geotecnia, provee un análisis considerando la presión generada por el confinamiento, la consolidación dentro de la cámara en todas las direcciones a la muestra, así simulando un escenario más práctico y realista del comportamiento del suelo a corto plazo.

Los taludes pueden mostrar una estabilidad aparente; sin embargo, su comportamiento se asemeja al de sistemas variables en el tiempo. Un talud que se encuentra en equilibrio puede perder su estabilidad debido a la acción acumulada de diversos factores, con la posibilidad de desencadenar deslizamientos. Por ello, comprender en detalle los procesos internos que se desarrollan en un talud es fundamental para interpretar adecuadamente su comportamiento. En este sentido, un análisis diagnóstico riguroso resulta esencial en los estudios de estabilidad, ya que una evaluación inadecuada puede conducir a la implementación de medidas correctivas o técnicas de estabilización ineficaces e incluso susceptibles de fallar.

Dentro del marco investigativo, proponer esta metodología y resultados obtenidos empleando variaciones porcentuales de arena y arcilla ante el ensayo triaxial CU, permitirá ofrecer un enfoque académico para nuevos análisis e investigaciones, proporcionando más información que facilite la comprensión del método.

En 2023, en el centro poblado de Tugusa, perteneciente a la ciudad de Cajamarca, Perú, se produjo el hundimiento de un terreno, evento atribuido al colapso subterráneo de una cavidad generada por la disolución de rocas calcáreas. En la zona afectada se identificaron afloramientos de arcillas altamente plásticas y saturadas (Suárez, 2025, p. 66).

La presente investigación surge de la necesidad de comprender con mayor precisión el comportamiento mecánico de los suelos predominantes en la ciudad de Cuenca, provincia del Azuay, donde el crecimiento urbano ha llevado a ocupar laderas y zonas altas con suelos de baja resistencia. Estas características representan un desafío para el diseño y la construcción de infraestructuras seguras y duraderas, ya que la estabilidad de las edificaciones depende directamente de la capacidad portante y de la resistencia al corte del terreno.

Estudios previos han demostrado que la proporción de arena y arcilla en la composición granulométrica influye significativamente en la respuesta del suelo frente a cargas externas y problemas de estabilidad; el contenido arcilloso favorece la cohesión, mientras que la fracción arenosa mejora el ángulo de fricción interna. Sin embargo, la presencia de arcillas de alta plasticidad incrementa la susceptibilidad a variaciones volumétricas y a problemas de estabilidad.

El ensayo triaxial consolidado–no drenado (CU), al permitir el control de la humedad y de la presión de poros, constituye una herramienta fundamental para caracterizar el comportamiento real de los suelos bajo condiciones de carga similares a las que se presentarán en diversos proyectos de infraestructura. La aplicación de esta técnica contribuye a garantizar la seguridad estructural y optimizar el uso de los recursos geotécnicos disponibles.

7. Objetivos

7.1. Objetivo general

Evaluar mediante el ensayo triaxial CU la relación de cohesión y ángulo de fricción en función del porcentaje de arcilla y arena de muestras remoldeadas

7.2. Objetivos específicos

- Preparar adecuadamente las muestras obtenidas en base a la norma ASTM D 4767-95.

- Evaluar mediante el ensayo triaxial CU la cohesión y el ángulo de fricción de las diversas muestras.
- Interpretar y analizar la distribución de los esfuerzos efectivos normales y cortantes.
- Identificar el plano de falla de las muestras según su variación porcentual de arena y arcilla.
- Observar y deducir el comportamiento de la curva por esfuerzos correspondiente a cada muestra.

8. Marco Teórico

8.1. Características de los suelos

Un suelo se entiende como cualquier material terroso, que puede abarcar desde rellenos con presencia de desechos hasta areniscas parcialmente cementadas o lutitas de baja resistencia. En esta definición no se incluyen las rocas sanas, ya sean ígneas o metamórficas, ni los depósitos sedimentarios fuertemente cementados, debido a que no se ablandan ni se desintegran con rapidez frente a la acción de la intemperie. Además, el agua contenida en el suelo cumple un rol esencial

en su comportamiento mecánico, por lo que debe considerarse como un componente integrante del material.

8.1.1. Fases del suelo

Juárez y Rico (2008) plantean que el suelo puede entenderse como un sistema compuesto por tres fases: una fase sólida, formada por las partículas minerales; una fase líquida, representada principalmente por el agua que ocupa parte de los poros; y una fase gaseosa constituida por el aire y otros gases presentes en los vacíos. En términos volumétricos, lo que se denomina volumen de vacíos corresponde al espacio donde coexisten el agua y el aire, mientras que el volumen de sólidos se rige por el conjunto de las partículas. La saturación describe el grado en que los vacíos están llenos de agua. En suelos totalmente saturados, el agua ocupa el 100% del volumen de vacíos y la fase gaseosa prácticamente desaparece, por lo que el material se comporta, en la práctica, como un sistema de dos fases (sólida-líquida). Esta condición es frecuente por debajo del nivel freático y es decisiva en geotecnia, ya que controla la presión de poros y, por tanto, la respuesta del suelo frente a cargas, deformaciones y posibles fallas.

8.2. Clasificación de suelos

Los suelos han sido clasificados mediante requisitos los cuales se rigen bajo las siguientes características: color, tamaño de las partículas pertenecientes a porciones secundarias y primarias del suelo, su rigidez y firmeza, que sea blando, moderadamente rígido, firme o rígido y si éste se encuentra en condiciones compactadas o sueltas y su contenido de humedad, resultando así, los dos sistemas más empleados:

8.2.1. Suelos arenosos

Los suelos arenosos se clasifican según la conformación del tamaño de sus partículas, así, pudiéndose clasificar en angular, subangular o redondeado. Un suelo arenoso denso y bien gradado es considerado fiable para la construcción.

En sitios con presencia de arenas movedizas, es decir, arenas que tienen un flujo no controlado de agua, resulta complejo el planteamiento de una cimentación, mientras que en suelos secos resulta más factible, puesto que se considera un terreno donde la probabilidad de asentamientos diferenciales o fallas es menor.

8.2.2. Suelos expansivos

8.2.2.1. Limos

Generalmente inorgánico y localizado en zonas cercanas a lagos o ríos, arrastrado comúnmente por corrientes de agua o remolinos de polvo o arena, comúnmente compuesto por fragmentos rocosos diminutos. En su mayoría, el limo es un material sumamente fino, oscilando entre 0,05 y 0,002 mm de diámetro, por lo cual, al mezclarse con arena, se genera un suelo poco confiable debido a su capacidad de expansión en condiciones húmedas ante una carga aplicada. Al momento de diseñar cimentaciones y proyectar futuras construcciones, es indispensable verificar si el estrato limoso puede compactarse de forma adecuada y si es posible trabajarlo en condiciones suficientemente secas. En términos generales, los limos pueden agruparse en dos tipos: unos presentan partículas con formas más delgadas y planas, lo que les da un comportamiento parecido al de las arcillas; mientras que otros muestran partículas más angulosas, cuyo desempeño se aproxima al de una arena muy fina.

8.2.2.2. Arcillas

Las arcillas pertenecen al grupo con el tamaño más pequeño de partículas rocosas finas, con un diámetro menor a 0,002 mm. Presenta una forma variable, entre finas, redondas y angulares, siendo dentro de su clasificación las más conocidas las arcillas bentonitas, arcilla natural y la mezcla de suelo arcilloso-limoso-arenoso o una variación entre las tres. Comúnmente un estrato arcilloso compone una cantidad de agua de entre el 10 al 50% por peso, Un suelo compuesto por arcilla en estado seco es aparentemente estable para desarrollar cimentaciones puesto que la arcilla al carecer de agua tiende a un comportamiento sumamente rígido, al contrario del estado húmedo, que tiende a la expansividad y, por ende, provoca levantamientos, hundimientos y desplazamientos de obras civiles que yacen sobre este.

8.2.3. Sistema Unificado de Clasificación de suelos SUCS

La práctica ASTM D2487 establece el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), cuyo objetivo es agrupar los suelos según su granulometría y la plasticidad de la fracción fina. El sistema distingue tres grandes categorías: suelos de grano grueso, suelos de grano fino y suelos altamente orgánicos, a partir de las cuales se definen grupos básicos que permiten una descripción estandarizada del material para fines de ingeniería. Es necesario para asignar un grupo SUCS la determinación de la distribución granulométrica del material y la evaluación de los límites de Atterberg con el material pasante del tamiz No. 40.

8.2.3.1. Separación de suelos finos y gruesos

Según ASTM International (2017), para la clasificación de un suelo se debe iniciar distinguiendo entre materiales de grano fino y de grano grueso mediante el tamiz No. 200 (75 μm). Un suelo se considera de grano fino cuando el 50% o más de su masa seca atraviesa este tamiz;

por el contrario, se clasifica como de grano grueso cuando más del 50% queda retenido. En los suelos de grano grueso, la separación entre grava y arena se realiza con el tamiz No. 4 (4,75 mm). Se denomina grava cuando más de la mitad de la fracción gruesa queda retenida en este tamiz, mientras que se identifica como arena cuando el 50% o más de dicha fracción lo atraviesa.

En suelos finos, para la clasificación se considera el límite líquido (LL) y el índice de plasticidad (IP), ubicando el punto (LL, IP) en la carta de plasticidad. En términos de clasificación, se considera arcilla cuando el IP es al menos 4 y el punto cae sobre o por encima de la línea A; mientras que los limos se ubican por debajo de la línea A o presentan IP menor a 4, siempre que no predomine materia orgánica.

8.2.4. Sistema American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)

La clasificación AASHTO radica en 7 grupos en los cuales según la tabla 1, desde el grupo A-1 hasta el A-3 corresponde a un máximo de 35% de material pasante del tamiz No. 200 más conocido como suelos granulares. A partir de los grupos A-4 hasta A-7 se rigen a aquellos que superan en su tamizado por el No. 200, el 35% de material, más conocidos como los suelos arcillosos o limosos. Aquellos suelos con índice de plasticidad igual o debajo de 10 corresponden a suelos limosos, mientras que aquellos superiores o iguales a 11 corresponden a los grupos arcillosos.

Clasificación general	Materiales limo - arcilla (Pasa más del 35% el tamiz No.200)			
	A - 4	A - 5	A - 6	A - 7
				A-7-6 ^b

Grupo de clasificación Análisis del tamizado (porcentaje que pasa)				A-7-5 ^a
No. 10	-	-	-	-
No. 40	-	-	-	-
No. 200	36 mín	36 mín	36 mín	36 mín
Características de la fracción que pasa el tamiz No. 40				
Límite líquido	40 máx	41 mín	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad	10 máx	10 máx	11 mín	11 mín
Tipos usuales de los materiales constituyentes	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
^a Para A - 7 - 5, $IP \leq LL - 30$ ^b Para A - 7 - 6, $IP > LL - 30$				

Tabla 1

Clasificación de suelos finos sistema AASHTO.

Nota. Información recopilada procedente de American Association of State Highway and Transportation Officials AASHTO (2021).

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasan el tamiz No. 200)
------------------------------	---

Grupo de clasificación Análisis del tamizado (porcentaje que pasa)	A - 1		A - 3	A - 2			
	A - 1 - a	A - 1 - b		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7
No. 10	50 máx	-	-	-	-	-	-
No. 40	30 máx	50 máx	51 mín	-	-	-	-
No. 200	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx			
Características de la fracción que pasa el tamiz No. 40							
Límite líquido	-			40 máx	41 máx	40 máx	41 mín
Índice de plasticidad	6 máx		NP	10 máx	10 mín	11 mín	11 mín
Tipos usuales de los materiales constituyentes	Fragmento de roca, Grava y arena		Arena fina	Grava con limo o arcilla y arena			
Evaluación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Tabla 2

Clasificación de suelos granulares sistema AASHTO.

Nota. Información recopilada procedente de la AASHTO (2021).

8.3. Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg comprenden aquellas propiedades del suelo que se analizan mediante tres parámetros, los límites líquido y plástico, acorde a estos dos, el índice de plasticidad. Proveen información importante relacionada con la plasticidad, cohesión y comportamiento del suelo.

8.3.1. Límite líquido

ASTM International (2017) establece que la determinación de este parámetro consiste en el ensayo de Casagrande con el dispositivo de golpeo y el penetrómetro de cono, los cuales

determinan el punto de cambio de estado plástico al estado líquido, que posteriormente se empleará para la clasificación y caracterización de los suelos finos.

8.3.2. Límite plástico

Gutiérrez (2023) plantea que, para obtener el límite plástico, primero se toma una muestra de alrededor de 20 gramos del material que pasa el tamiz No. 40. Luego, se le agrega agua poco a poco (normalmente entre 1 y 3 ml, aunque puede ser más según qué tan plástico sea el suelo) y se mezcla hasta que quede uniforme y manejable. Después, esa masa se divide en dos partes. Una de esas partes se vuelve a dividir en tres porciones y cada una se trabaja sobre un vidrio esmerilado, rodándola con la mano hasta formar “hilitos” o cilindros de alrededor de 3 mm de diámetro. Se sigue rodando hasta que el material empieza a agrietarse o a deshacerse. Esas tres porciones se juntan en una cápsula y se toman como la primera muestra. Luego se repite el mismo procedimiento con la otra mitad de la muestra para obtener una segunda muestra.

8.3.3. Índice Plástico

Los suelos finos, especialmente los limosos y arcillosos, se analizan con frecuencia para determinar su consistencia, que depende del contenido de humedad. Dentro de un intervalo específico de humedad, estos suelos se comportan de manera plástica, pudiendo moldearse sin fracturarse. Si el contenido de agua es inferior al límite plástico, el material se vuelve semisólido; en cambio, con mayor humedad pasa a comportarse como semilíquido. El índice plástico (IP) representa la diferencia entre el límite líquido (LL) y el límite plástico (LP), y cuantifica el rango de humedad en el que el suelo mantiene sus características plásticas. Por ejemplo, un suelo con IP bajo (alrededor de 2) presenta escasa plasticidad, mientras que un IP alto (superior a 30) indica una plasticidad considerable.

8.4. Muestras alteradas

Las muestras alteradas corresponden a material de suelo recolectado en condición removida, es decir, con partículas sueltas o fragmentadas, sin aplicar procedimientos encaminados a mantener intacta la estructura o la humedad del suelo. Sin embargo, en algunos trabajos es útil conservar el contenido de agua en su estado original; en estos casos, la muestra debe empaquetarse y transportarse de manera que se minimicen las ganancias o pérdidas de humedad.

Este tipo de muestras puede obtenerse de excavaciones o frentes de trabajo, por ejemplo, zanjas o bancos, así como de perforaciones de mayor profundidad realizadas con herramientas de muestreo. Para que sean técnicamente válidos, deben considerarse representativos de cada capa atravesada y cubrir la profundidad de interés del estudio, la cual puede definirse por el límite de excavación o uso, por la presencia del nivel freático o por la extensión necesaria para caracterizar adecuadamente el subsuelo. Prácticas estándar para el almacenamiento y transporte de muestras de suelo.

8.5. Muestras inalteradas

López y Mestanza (2023) resaltan que las muestras inalteradas son especímenes recuperados procurando conservar, en la medida de lo posible, la estructura interna y el contenido de agua del suelo en condiciones cercanas al estado natural, porque estas variables controlan resultados de resistencia y deformabilidad en laboratorio. En estudios académicos se describe su obtención mediante tubos Shelby, y se recalca que, tras la extracción, el almacenamiento debe evitar cambios de humedad (por ejemplo, mediante envoltura protectora) para reducir alteraciones de las propiedades del material. Esta precaución es crítica, ya que la perturbación durante el muestreo o el secado parcial puede sesgar parámetros medidos en ensayos posteriores.

8.6. Muestras remodeladas

ASTM International (1996) establece que las muestras reformadas son elaboradas a base de suelo previamente desestructurado, eliminando así su estructura natural y controlando intencionalmente el contenido de agua y la densidad antes de realizar las pruebas. Para la preparación, se puede trabajar en estado "más seco" o "más húmedo", dependiendo del nivel de agua incorporado en el material. En la remodelación en seco, se acondiciona el suelo con un contenido de agua relativamente bajo, buscando una masa que permita la compactación en capas sin exceso de flujo, lo que suele generar una estructura más abierta y mayor succión inicial; por otro lado, en el remodelado húmedo se aumenta el contenido de agua hasta obtener una consistencia más plástica y maleable, favoreciendo una reordenación más uniforme de las partículas, pero con mayor tendencia a deformarse durante el montaje si no se controla el confinamiento inicial. En ambos casos, el conformado de la muestra se realiza compactando en un molde dividido en varias capas, ajustando el procedimiento de compactación (capas y golpes/energía) hasta alcanzar el volumen y la densidad objetivo, posteriormente, para su aplicación en ensayos triaxiales CU, se realiza la saturación y consolidación para llevar la muestra a un estado representativo antes del corte sin drenaje.

8.7. Ensayo triaxial no consolidado no drenado UU

El ensayo UU triaxial (no consolidado-no drenado) es un ensayo "rápido" en el que no se permite el drenaje en ningún momento: con las válvulas cerradas se aplica la presión límite y, sin consolidación previa, se aumenta la carga axial hasta el fallo. Este proceso crea una presión de poro excesiva, pero esto no se mide en el UU típico, por lo que no se conocen las tensiones

efectivas y los resultados se interpretan como tensiones totales, determinando principalmente la resistencia no drenada para condiciones de carga rápida. Esta característica lo hace particularmente útil para análisis de estabilidad a corto plazo en suelos cohesivos saturados (por ejemplo, durante o inmediatamente después de la construcción), mientras que para el comportamiento a largo plazo a menudo se prefiere un enfoque consolidado o drenado.

8.8. Ensayo triaxial consolidado no drenado CU

ASTM International (1996) determina que el ensayo triaxial CU consolidado no drenado se realiza en tres fases principales: en primer lugar, para una muestra cilíndrica con un diámetro mínimo de 33 mm y una relación H/D entre 2 y 2,5, comprobando si el tamaño de partícula es compatible con el diámetro; Cuando se realiza la saturación, generalmente con contraste, se puede comparar el parámetro mediano $B = \Delta u / \Delta \sigma_3$; $B \geq 0,95$ se considera saturación suficiente; Después de aplicar la consolidación bajo presión de confinamiento, se registran las tensiones y/o los cambios de volumen hasta que se complete la consolidación primaria. Finalmente, la sección no drenada se realiza manteniendo constante la presión de la celda y los drenajes cerrados para medir la presión de poro durante la carga axial (control de deformación), con velocidad acoplada a t_{50} y registros suficientes de deformación y presión de poro. La resistencia se define según criterios reglamentarios por esfuerzo desviador máximo o por tensión al 15% de deformación axial, de modo que los resultados puedan informarse en tensiones totales y efectivas.

8.9. Ensayo triaxial consolidado drenado CD

Huayta, Mamani y Toledo (2021) indican que el ensayo de drenaje consolidado triaxial (ensayo CD), el requisito es que se analice el comportamiento del suelo en términos de tensiones efectivas, ya que el drenaje es posible durante todo el proceso y por tanto no se busca acumulación

de presiones de poros Para lograr esto, los aumentos de carga se aplican lentamente y de manera controlada, permitiendo que el agua intersticial emerja continuamente de la muestra. Esto significa que la presión neutra permanece prácticamente nula durante la fase de corte. El procedimiento consiste en aplicar primero una presión limitante en la cámara y solidificar la muestra manteniendo abiertos los drenajes; luego se aumenta gradualmente la tensión desviadora hasta que se produce la falla, obteniendo así las tensiones de falla principales. Los círculos de Mohr se construyen a partir de los resultados de varias pruebas en diferentes confinamientos y su tangente define la envolvente de falla a partir de la cual se estiman los parámetros de resistencia efectiva del material. Esta prueba se utiliza más comúnmente en suelos granulares como arena porque liberan presión rápidamente, aunque también se puede utilizar en suelos finos; sin embargo, en este último caso, el tiempo necesario puede ser importante debido a la baja permeabilidad y a la necesidad de un drenaje completo.

8.10. Teoría de Mohr-Coulomb

La teoría (criterio) de Mohr-Coulomb modela la falla por corte suponiendo que la resistencia al corte en el plano de falla aumenta linealmente con la tensión normal efectiva. En la forma más comúnmente utilizada en ingeniería geotécnica se expresa como:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan(\phi')$$

Donde:

τ_f representa el esfuerzo de falla cortante del espécimen.

c' es la cohesión efectiva obtenida.

σ'_n es el esfuerzo normal efectivo.

ϕ' es el ángulo de fricción de la muestra.

8.11. Parámetros del suelo

8.11.1. Ángulo de fricción

El ángulo de fricción interna es un parámetro geotécnico que representa la resistencia del suelo al deslizamiento entre sus partículas bajo la acción de esfuerzos normales, es decir, integra el aporte de la fricción interna del material. Como parte del criterio de Mohr-Coulomb, este ángulo determina la inclinación de la envolvente de falla con respecto a las tensiones efectivas, de modo que un ángulo de fricción alto implica un aumento más significativo en la resistencia al corte al aumentar el confinamiento. Su valor está determinado por la naturaleza del suelo y su estructura.

En el caso de los suelos granulares, además del estado de compactación, depende principalmente de la forma, rugosidad y disposición de los granos; mientras que en suelos finos está influenciado por la plasticidad y el grado de consolidación. Para las pruebas de CU triaxiales, es posible realizar una estimación del ángulo de fricción cuando se registra la presión de poro, obteniendo datos más representativos para evaluaciones de estabilidad y diseños geotécnicos bajo diversas condiciones de operación.

8.11.2. Cohesión

La cohesión es un indicador que mide la fuerza con la que las partículas internas de un estrato están unidas; este varía dependiendo de la caracterización del suelo y condiciones de humedad. Barrera y Garnica (2002) definen que en la práctica la saturación completa generalmente va acompañada de una resistencia mínima del material (para el mismo suelo y estructura), de esta forma, un aumento de la humedad puede provocar una pérdida de "cohesión aparente" y una menor estabilidad, especialmente en suelos delgados que son sensibles a los cambios en el agua de los poros.

9. Hipótesis y supuestos

9.1 Hipótesis

En esta investigación se plantea que, al ejecutar ensayos triaxiales consolidados no drenados (CU) sobre muestras remoldeadas en seco de mezclas arcilla–arena con porcentajes

variables, la respuesta mecánica del suelo estará controlada por tres procesos encadenados: saturación, consolidación y corte no drenado.

En primer lugar, se espera que el remoldeo “en seco” incremente la presencia inicial de aire en los vacíos, por lo que la saturación mediante contrapresión requerirá un control más riguroso para alcanzar un estado comparable entre probetas; bajo esta condición, cuando la saturación sea alta y verificable, por ejemplo, mediante el parámetro de saturación B que supere o sea igual a 0,95, los resultados tenderán a ser más consistentes y representativos, reduciendo la dispersión en parámetros obtenidos.

En segundo lugar, durante la consolidación isotrópica se espera que el estado de esfuerzos efectivos inicial quede bien definido y que el incremento del confinamiento efectivo determinará la rigidez y la resistencia movilizada, siendo este efecto más notorio en mezclas con mayor fracción arenosa, debido al predominio de la fricción y del reacomodo granular. En la etapa de corte no drenado, se estima que el porcentaje de arcilla condicionará tanto la magnitud de la presión de poros excedente generada como la forma de la trayectoria de esfuerzos efectivos. A mayor contenido de arcilla, se anticipa una mayor tendencia a generar una variación de presión poros, de esta manera, una reducción relativa del esfuerzo efectivo a falla, lo que se reflejaría en un menor ángulo de fricción.

Al aumentar la fracción de arena, se espera un comportamiento más dominado por fricción, con menor contribución cohesiva y un aumento del ángulo de fricción. Además, se considera probable que existan rangos intermedios de composición en los que la resistencia no evolucione de manera lineal, debido a una transición estructural entre una matriz arcillosa continua y un esqueleto granular dominante, lo que podría producir estados “críticos” de menor eficiencia resistente.

9.2 Supuestos

Se supone que las mezclas arcilla-arena se producen con suficiente homogeneidad, sin segregación granulométrica ni fluctuaciones significativas en la distribución de finos entre las probetas, por lo que el conformado en seco y el conformado en capas pueden lograr una densidad objetivo comparable para todas las muestras y que las diferencias en la respuesta mecánica se deben principalmente al contenido de arcilla y arena y no a variaciones de compactación. El sistema de prueba es hermético (sin fugas) y se mantienen válvulas cerradas y una medición estable de la presión de poro durante el corte. Las muestras alcanzarán un nivel de saturación confiable para desarrollarse el ensayo

10. Marco metodológico

10.1 Tipo y enfoque investigativo

Este estudio se ejecutó mediante una metodología experimental de carácter cuantitativo, basada en la preparación de muestras remoldeadas con distintos porcentajes de arena y arcilla bentonita, variando la composición de forma sistemática para identificar su efecto en la resistencia

al corte. La evaluación se realizó exclusivamente con el ensayo triaxial CU consolidado–no drenado, el cual incluye una etapa previa de saturación y una fase de consolidación bajo confinamiento antes de aplicar el corte en condición no drenada. Este esquema permitió analizar el desempeño mecánico de las mezclas a partir de la respuesta esfuerzo–deformación y de los parámetros C y ϕ , incorporando el papel de la presión de poros y de las tensiones efectivas durante la falla.

10.2. Materiales

Para el desarrollo experimental de esta investigación se eligieron dos materiales de naturaleza contrastante, con el propósito de evaluar, en condiciones controladas, la respuesta mecánica de las mezclas. La selección se fundamentó en que cada componente aporta mecanismos resistentes distintos: por un lado, un material fino de comportamiento predominantemente cohesivo y, por otro, un material granular con respuesta principalmente friccional. Estos materiales fueron:

10.2.1. Arena

El tamaño de las partículas de arena varía entre 2 mm y 0,05 mm de diámetro. Debido a esta granulometría, las arenas que retienen agua suelen acumular materiales más finos en sus poros, lo que provoca una estratificación dentro del suelo. Así, puede presentarse un primer estrato arenoso aparentemente seco, mientras que en su interior se desarrolla una capa más fina con mayor retención de humedad. La arena para evaluar fue adquirida en una mina ubicada en la ciudad de Cuenca.

10.2.2. Arcilla bentonita sódica

La arcilla bentonita utilizada en el estudio, de procedencia comercial, se seleccionó por su marcada actividad y por la predominancia de minerales que tiene de tipo montmorillonita, lo que le confiere alta plasticidad y una notable capacidad de retención de agua. Estas características se asocian con un comportamiento esencialmente cohesivo, así como con cambios volumétricos significativos ante variaciones de humedad. Por ello, resulta un material ideal para representar suelos finos plásticos y analizar su efecto en la resistencia al corte cuando se incorpora en mezclas remodeladas con fracción granular.

10.2.3. Papel filtro

Las tiras de papel de filtro son usadas por muchos laboratorios para disminuir el tiempo requerido para las pruebas. Los discos de Papel de Filtro de un diámetro igual al diámetro del espécimen pueden ser colocados entre los discos porosos. Si se usan tiras del filtro o discos, ellos serán de un tipo que no se disuelva en el agua (ASTM International, 1996).

Figura 1

Papel filtro.



Nota. Se optó por desarrollar cuadrados para facilitar el montaje de la muestra en la celda.

Fuente: Geo \$ Geo Cía. Ltda. (2026).

10.2.4. Discos Porosos

Se utilizarán dos discos porosos rígidos para garantizar el drenaje en ambos extremos del espécimen. La norma indica que estos discos deben presentar un coeficiente de permeabilidad del orden de una arena fina, aproximadamente 1×10^{-4} cm/s (4×10^{-5} in./s). Además, se establece que los discos deben someterse a mantenimiento periódico, mediante limpieza por ultrasonido o por hervido y cepillado, y que posteriormente se deben verificar para confirmar que no estén obstruidos (ASTM International, 1996).

Figura 2

Discos porosos.



Nota. Empleados para la distribución uniforme de la carga a aplicar. Fuente: Geo \$ Geo Cía. Ltda. (2026).

10.2.5. Membrana de látex

La membrana de látex que se emplea para encasillar el espécimen proporcionará protección contra las fugas. Las membranas serán cuidadosamente inspeccionadas antes de ser usadas y si cualquier falla o defecto es evidente, la membrana será desechada. Para ofrecer una restricción mínima al espécimen, el diámetro de la membrana estará entre 90 y 95% del espécimen. El grosor de la membrana no excederá al 1% del diámetro del espécimen. La membrana será sellada a la base y el casquete del espécimen con los anillos “O” de caucho para que el diámetro interior no sujeto a esfuerzo esté entre 75 y 85% del diámetro del casquete y base, o por otros medios que proporcione un sellado adecuado (ASTM International, 1996).

Figura 3

Membrana de látex.



Nota. Usados para evitar el ingreso de agua a la muestra. Fuente: Geo \$ Geo Cía. Ltda. (2026).

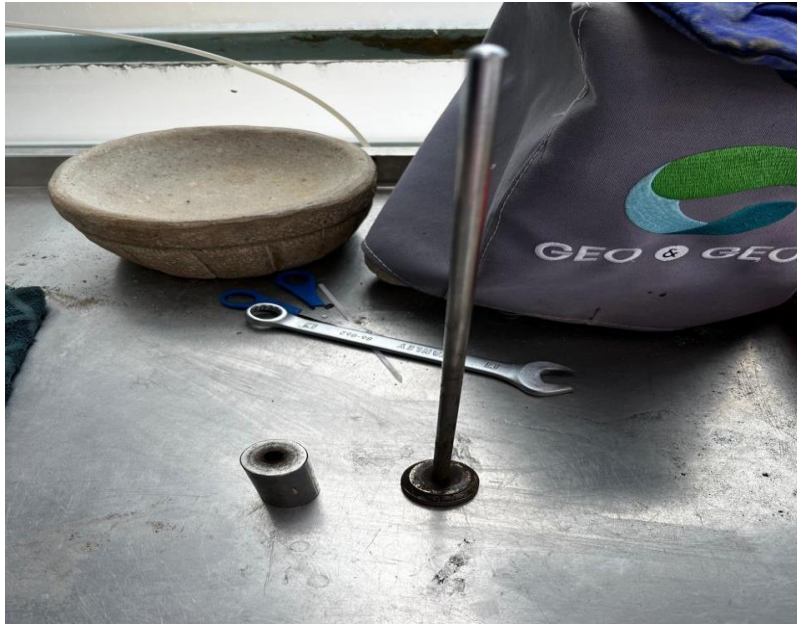
10.2.6. Compactador manual

Objeto conformado por una varilla de guía longitudinal, diseñada para permitir el deslizamiento controlado de una masa. De este modo, la masa recorre la varilla y cae de forma vertical sobre el punto de impacto, garantizando la aplicación de golpes conforme a la altura y el

número de impactos establecidos, en este caso 6 capas con 25 golpes cada una, pueda compactar la muestra remoldeada.

Figura 4

Objeto para compactación manual.



Nota. Se optó por hacer el golpeo al revés debido al diámetro del disco que golpea, así, se trabajó directamente con el cilindro que se aprecia a la izquierda, garantizando una compactación en las mismas condiciones para todas las muestras. Fuente: Geo \$ Geo Cía. Ltda. (2026).

10.2.7. Tamices No. 40 y No. 200

Los tamices fueron ocupados para separar adecuadamente las partículas más grandes de las más pequeñas, trabajando así con aquellas partículas pasantes al tamiz No. 40. Se realiza primero un lavado de la arena escogida, posterior a esto se realiza el tamizado.

Figura 5

Tamices No. 40, No. 200 y el respectivo fondo.



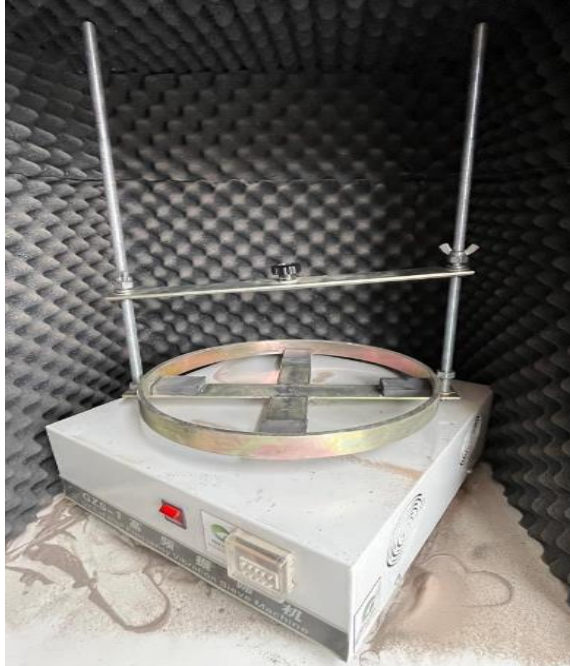
Nota. Tamices utilizados para la separación granulométrica de la muestra: el material queda retenido según su tamaño en cada tamiz y el pasante final que se lo va a utilizar se recolecta en el fondo. Fuente: Geo \$ Geo Cía. Ltda. (2026).

10.2.8. Tamizador

El tamizador nos permitió llevar a cabo una separación correcta de las partículas más gruesas de las más finas, en este caso se ocuparon dos tamices como se explicó anteriormente.

Figura 6

Tamizador.



Nota. El tamizador mecánico se empleó para poder realizar un tamizado controlado de las muestras. Fuente: Geo \$ Geo Cía. Ltda. (2026).

10.2.9. Molde para muestras sujetas a ensayo triaxial

El molde permitió la elaboración adecuada de las muestras, reteniendo sus partículas y uniéndolas de tal manera que al momento de ensayarlas previo a su saturación facilitaba su montaje.

Figura 7

Molde para la elaboración de muestras.



Nota. Antes de optar por este molde, se realizaron pruebas de densidad para conocer la masa que ingresaría. Fuente: Geo \$ Geo Cía. Ltda. (2026).

10.2.10. Balanza de precisión

La balanza de precisión permite obtener y medir de manera precisa la medida de masa que se estaba analizando, previo a la medición de las mezclas de arcilla y arena, se tara el recipiente a emplearse en el proceso.

Figura 8

Balanza de precisión.



Nota. Balanza ocupada para los ensayos. Fuente: Geo \$ Geo Cía. Ltda. (2026).

10.2.11. Strain Controlled Triaxial Tester MCGS (máquina para el ensayo triaxial)

La máquina permite controlar y monitorear la presión de poros, aplicar la presión de confinamiento y saturar la muestra conforme a la normativa vigente. La carga se transfiere mediante el pistón de carga, mientras que la deformación se registra a lo largo del ensayo. Adicionalmente, las válvulas de drenaje permiten ejecutar y comparar el comportamiento del suelo en condiciones drenadas y no drenadas.

En este caso, el ensayo realizado fue el consolidado no drenado (CU), durante la etapa de consolidación se mantuvo las válvulas abiertas para permitir el drenaje, y en etapa de corte de la muestra se cierran, garantizando condiciones no drenadas durante el esfuerzo cortante.

Figura 9

Máquina para ensayo triaxial.



Nota. Las fases de saturación y consolidación se requirieron hasta tres días para completarse, debido a la presencia predominante de la fracción arcillosa y a su mezcla con la fracción arenosa, condición que incremento el tiempo necesario para alcanzar la estabilización del ensayo. Fuente: Geo \$ Geo Cía. Ltda. (2026).

10.2.12. Agua desaireada

ASTM International (1996) especifica que, para evitar la presencia de sales e impurezas durante el ensayo, es indispensable el uso del agua desaireada, además, no altera la medición de la presión de poros.

El agua desaireada es aquella que ha pasado por un proceso térmico que provoca la pérdida de microorganismos y minerales que evitan que el agua normal sea considerada pura.

Figura 10

Agua desaireada.



Nota. Se ocupó agua destilada para las líneas de drenaje del espécimen y para el dispositivo medidor de presión de poros. Fuente: Geo \$ Geo Cía. Ltda. (2026).

11. Procedimiento

11.1. Proporciones de mezcla

Para el ensayo triaxial CU, se elaboraron las probetas siguiendo un criterio homogéneo en la masa. En cada mezcla, se determinó una masa seca total de 170 g, calculada en función del volumen del molde de remoldeo. Esta fue repartida conforme a los porcentajes establecidos para la arcilla bentonita y la arena, con el fin de garantizar la uniformidad entre las muestras y que los resultados fueran comparables. El material fue mezclado y moldeado en capas, con el objetivo de asegurar una compactación homogénea y prevenir la segregación interna.

Las mezclas fueron elaboradas en 5 proporciones diferentes, detalladas en la siguiente tabla:

Tabla 3

Proporciones de mezcla variando los porcentajes de arena y arcilla.

Materiaal total que entra en el molde		170	Gramos	
Porcentaje de arcilla (%)	Porcentaje de arena (%)	Cantidad de arcilla (g)	Cantidad de arena (g)	Sauracion (%)
100%	0%	170	0	100%
80%	20%	136	34	100%
50%	50%	85	85	100%
20%	80%	34	136	100%
0%	100%	0	170	100%

Nota. En la tabla 3 se observan los diferentes porcentajes y cantidades (arena, arcilla y saturación) necesarios para cada probeta. Elaborado por: Los Autores.

La mezcla se llevó a cabo pesando cada componente de manera independiente con una balanza digital de precisión, y los valores obtenidos fueron registrados para su control y trazabilidad. Luego, se hizo una mezcla seca en un envase limpio, con movimientos repetidos hasta que el material mostró una distribución uniforme. En mezclas con mucha arcilla, se extendió el proceso de mezcla para disminuir la presencia de conglomerados y obtener una matriz más homogénea; en mezclas dominadas por arena, se evitó la segregación debida a variaciones de tamaño, tratando de que los finos no se acumularan en áreas específicas.

El hecho de que la muestra estuviera compuesta por un 100% de arena, cuya naturaleza es exclusivamente granular y no cohesiva, exigió un control operativo más riguroso en comparación

con las mezclas que contienen finos. El material tiende a separarse con facilidad por diferencias de densidad y tamaño, así como por cualquier otra variación, debido a la ausencia de enlaces cohesivos. Por esta razón, se volvió esencial extremar la atención en el pesaje, la homogeneización, la colocación por capas y la compactación uniforme para garantizar una probeta que fuera representativa y que pudiera compararse con los demás especímenes del estudio, la muestra compuesta por 100% de arena se ensayó dos veces por los mismos motivos.

Previo a realizar el moldeo, se realizó un control de calidad para asegurar que la mezcla tuviera una textura homogénea, para que no se generaran bolas de arcilla y que las capas dentro del recipiente fueran uniformes.

11.2. Preparación de muestras

Se realizó la creación de probetas cilíndricas para el ensayo triaxial CU utilizando mezclas remoldeadas que se habían elaborado y homogeneizado con anterioridad. Para garantizar que el programa experimental pueda repetirse, se confeccionaron todas las muestras con un diámetro de 40 mm y una altura de 80 mm, conservando así unas condiciones comparables entre los especímenes y una relación geométrica apropiada. Esta normalización hizo posible manejar el impacto de la forma y el tamaño del espécimen, de tal manera que las fluctuaciones detectadas en la respuesta mecánica se atribuyan fundamentalmente a la composición de la mezcla y al procedimiento de saturación-consolidación establecidos por la norma ASTM D 4767 antes del corte no drenado (ASTM International, 1996).

11.2.1. Proceso de conformación

11.2.1.1. Conformación del espécimen

Se colocó la mezcla remoldeada en el molde cilíndrico de manera sucesiva, buscando una distribución uniforme del material a través de toda su altura. Se llevó a cabo la densificación con una energía lo más uniforme posible entre las capas, evitando zonas sueltas, segregación de partículas y discontinuidades internas. Así, cada muestra representa la misma condición inicial dentro de su mezcla.

11.2.1.2. Retiro del molde y verificación geométrica

Retiro del molde y verificación geométrica: Después de que se llegó a la altura deseada, con precaución se retiró el molde para no modificar la forma del cilindro. Después, se utilizó un calibrador para medir la altura y el diámetro en diversos lugares, lo que permitió corroborar que no había cambios significativos que pudieran alterar la distribución de esfuerzos durante el confinamiento y el corte, así como también que permaneciera la relación geométrica necesaria para el ensayo triaxial CU.

11.2.1.3. Acondicionamiento para la celda triaxial

Acondicionamiento para la celda triaxial: Al espécimen se lo preparó para el montaje al ponerlo entre las piedras porosas y cubrirlo con una membrana impermeable, posterior a esto se ensambló la misma con los anillos de sellado y bridas plásticas, garantizando un sellado hermético en los extremos. Esta etapa es crucial en CU para que la presión de cámara tenga un efecto apropiado sobre la muestra.

11.2.1.4. Condición inicial previa al ensayo

El ensayo triaxial CU, a diferencia de otros esquemas, no ensaya la probeta inmediatamente después del moldeo. En su lugar, en el periodo de consolidación y bajo el confinamiento establecido, primero se satura por completo. Solo una vez que se comprueba que no haya cambios en el volumen de las muestras, se sigue con el corte no drenado. Esto significa que la respuesta obtenida muestra cómo se comporta el material en condiciones controladas como la saturación.

11.2.2. Ejecución del ensayo triaxial consolidado no drenado (CU)

Para caracterizar la resistencia al corte de muestras remoldeadas bajo un estado tensional consolidado y luego expuestas al corte sin drenaje, se utilizó el ensayo triaxial CU. Esta condición es representativa de circunstancias en las que el suelo ha estado confinado y luego experimenta aumentos de carga en periodos breves. El procedimiento se llevó a cabo de acuerdo con el orden operativo establecido por la norma ASTM D4767, garantizando el control de presiones, la repetibilidad entre las muestras y un registro continuo.

Primero, se colocó cada probeta en el sistema triaxial, con piedras porosas en los extremos y una membrana de látex impermeable. Así, la respuesta hidráulica de la muestra pudo ser controlada y el confinamiento funcionó de manera uniforme. Después, comenzó la fase de consolidación, en la que se llevó a cabo el procedimiento de saturación total y se aplicó el esfuerzo confinante establecido. Se corroboró la condición de saturación basándose en el parámetro B de Skempton.

Una vez que se estabilizó y dejó de variar el cambio de volumen correspondiente al caudal drenado y la presión de poros, la muestra ya estaba consolidada. Se procedió con el ensayo CU: se bloquearon las líneas de drenaje y se utilizó una deformación axial a un ritmo controlado hasta

llegar a la condición de fallo. El esfuerzo desviador, la presión de poros y la deformación axial se registraron simultáneamente en esta etapa; estos datos son imprescindibles para elaborar las curvas de esfuerzo-deformación y calcular los parámetros de resistencia, tanto en términos totales como efectivos cuando sea pertinente.

Este procedimiento se repitió con todas las mezclas que se realizaron, bajo condiciones uniformes del ensayo. Lo cual nos permite obtener resultados comparables entre todas las probetas.

11.3. Procesamiento de información

Se llevó a cabo el procesamiento de la información una vez completados los ensayos triaxiales CU. conseguidos de acuerdo con las directrices técnicas definidas en los procedimientos estándar del laboratorio. Con el propósito de examinar tanto la deformación axial como la carga aplicada en cada muestra, se realizó un análisis. Determinar la deformación unitaria y la fuerza axial en cada fase de la prueba.

11.3.1. Fuerza axial (F)

$$F(N) = 0.1 * \Delta\sigma(kPa) * A(cm^2)$$

Donde

$\Delta\sigma$ = esfuerzo desviador

A= Área transversal

11.3.2. Deformación unitaria axial (ϵ)

$$\epsilon = \frac{\Delta h}{h_0}$$

Donde

Δh = Cambio de altura durante el ensayo

h_0 = Altura inicial de la probeta

11.3.3. Área corregida (A_c)

$$A_c = \frac{A_0}{1 - \epsilon}$$

Donde

A_0 = Área inicial

ϵ = Deformación axial unitaria

11.3.4. Estado de esfuerzos

El estado de esfuerzos se calcula con el esfuerzo desviador ($\Delta\sigma$):

$$\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_3$$

Donde

σ_1 : esfuerzo principal mayor

σ_3 : esfuerzo principal menor

Para la saturación calculamos el valor (B) el cual se lo obtiene con:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta\sigma_3}$$

B= Saturación

Δu = Incremento en la presión de poros

$\Delta\sigma_3$ = Presión de poros

12. Análisis de resultados

Composición de las mezclas remoldeadas

Tabla 4

Valor de B obtenido para muestras remoldeadas.

Muestra	Carga	Saturación B
100% Arcilla	150	0,899
100% Arcilla	250	0,955
100% Arcilla	350	0,961
80% arcilla- 20% arena	150	0,982
80% arcilla- 20% arena	250	0,928
80% arcilla- 20% arena	350	0,889
50% arcilla- 50% arena	150	1,036
50% arcilla- 50% arena	250	0,894
50% arcilla- 50% arena	350	0,984
20% arcilla- 80% arena	150	0,934
20% arcilla- 80% arena	250	0,935
20% arcilla- 80% arena	350	0,986
100% arena	150	0,997
100% arena	250	1,068
100% arena	350	0,995

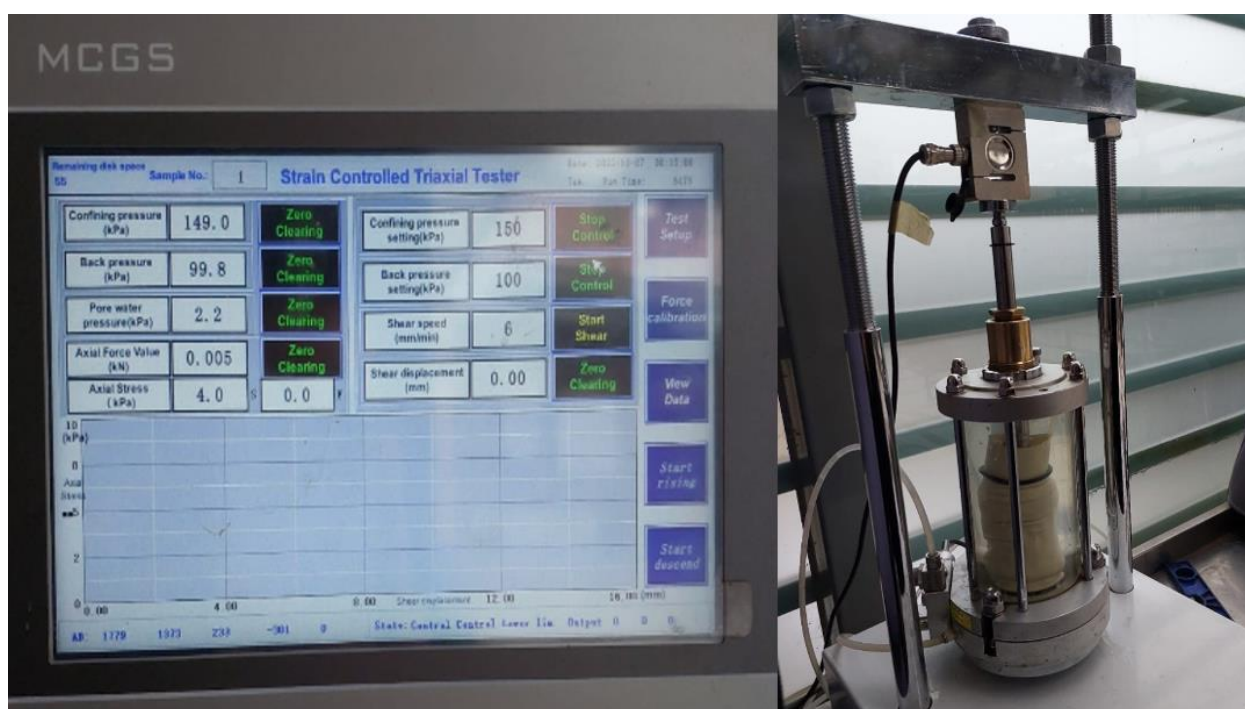
Nota. Elaborado por: los autores (2026).

12.1. Primera dosificación: muestras remodeladas con 100% arcilla y 0% arena

12.1.1. Primera muestra remodelada de 100% arcilla y 0% arena sometida a la presión 1

Figura 11

Muestra con 100% de arcilla dentro de la celda sometida a la presión 1 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.

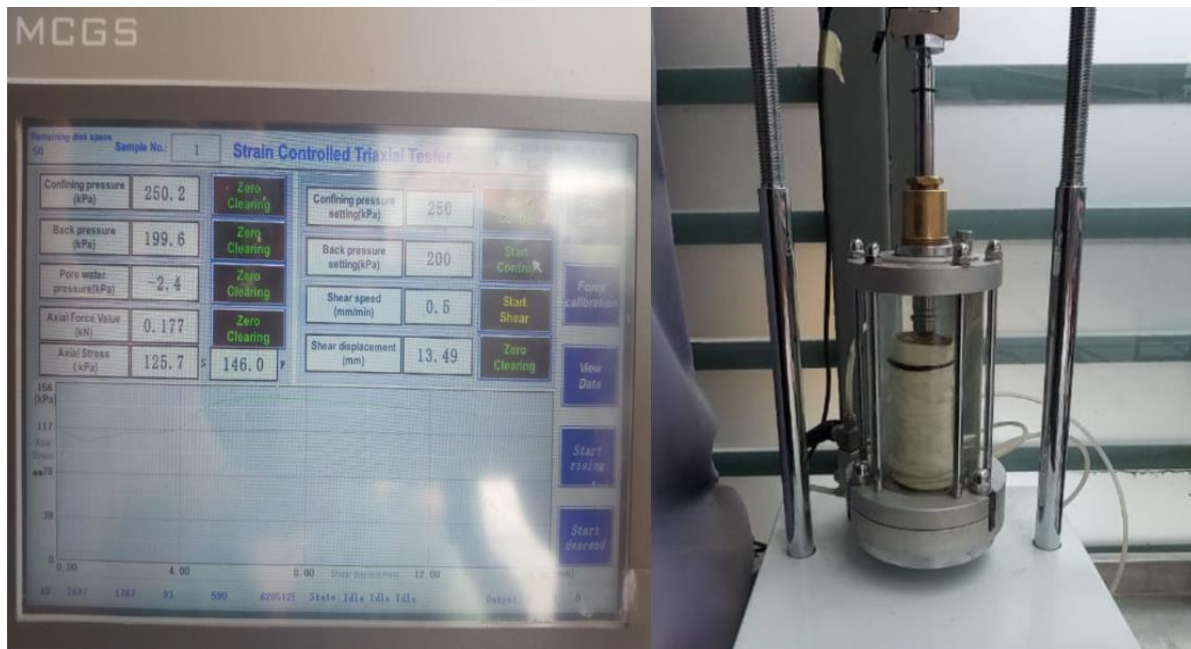


Nota. Se aprecia la primera muestra con un porcentaje de 100% de arcilla en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

12.1.2. Segunda muestra remoldeada de 100% arcilla y 0% arena sometida a la presión 2

Figura 12

Muestra con 100% de arcilla dentro de la celda sometida a la presión 2 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.

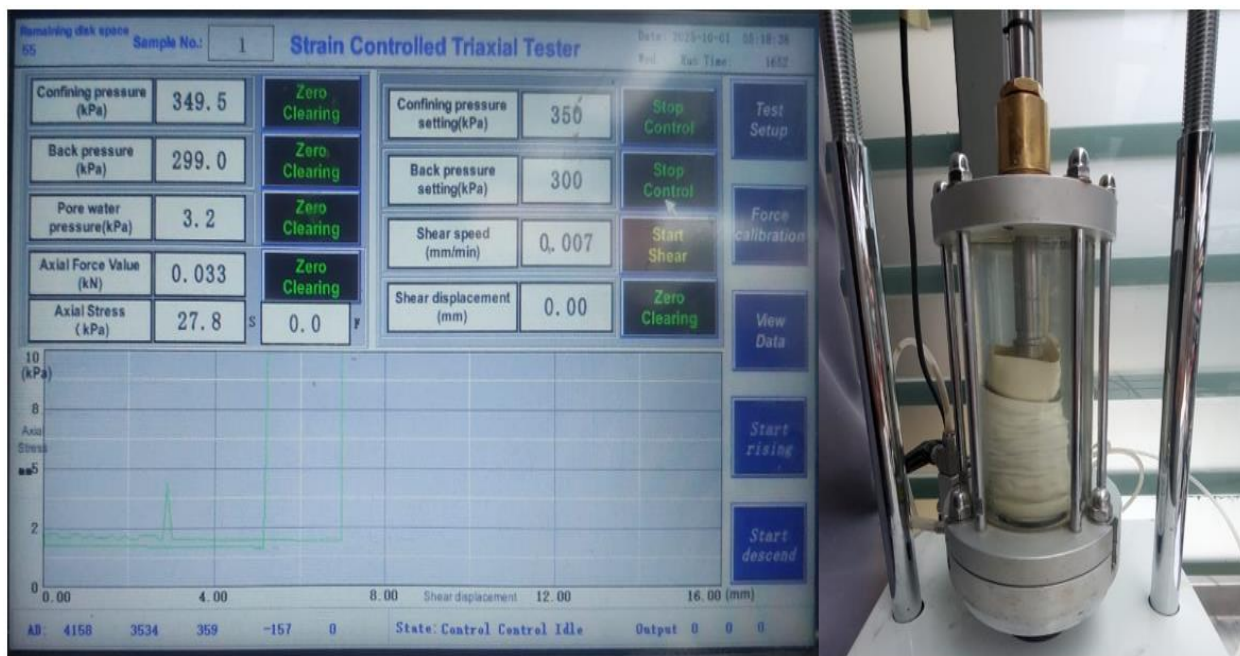


Nota. Se aprecia la muestra con un porcentaje de 100% de arcilla en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

12.1.3. Tercera muestra remoldeada de 100% arcilla y 0% arena sometida a la presión 3

Figura 13

Muestra con 100% de arcilla dentro de la celda sometida a la presión 3 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.



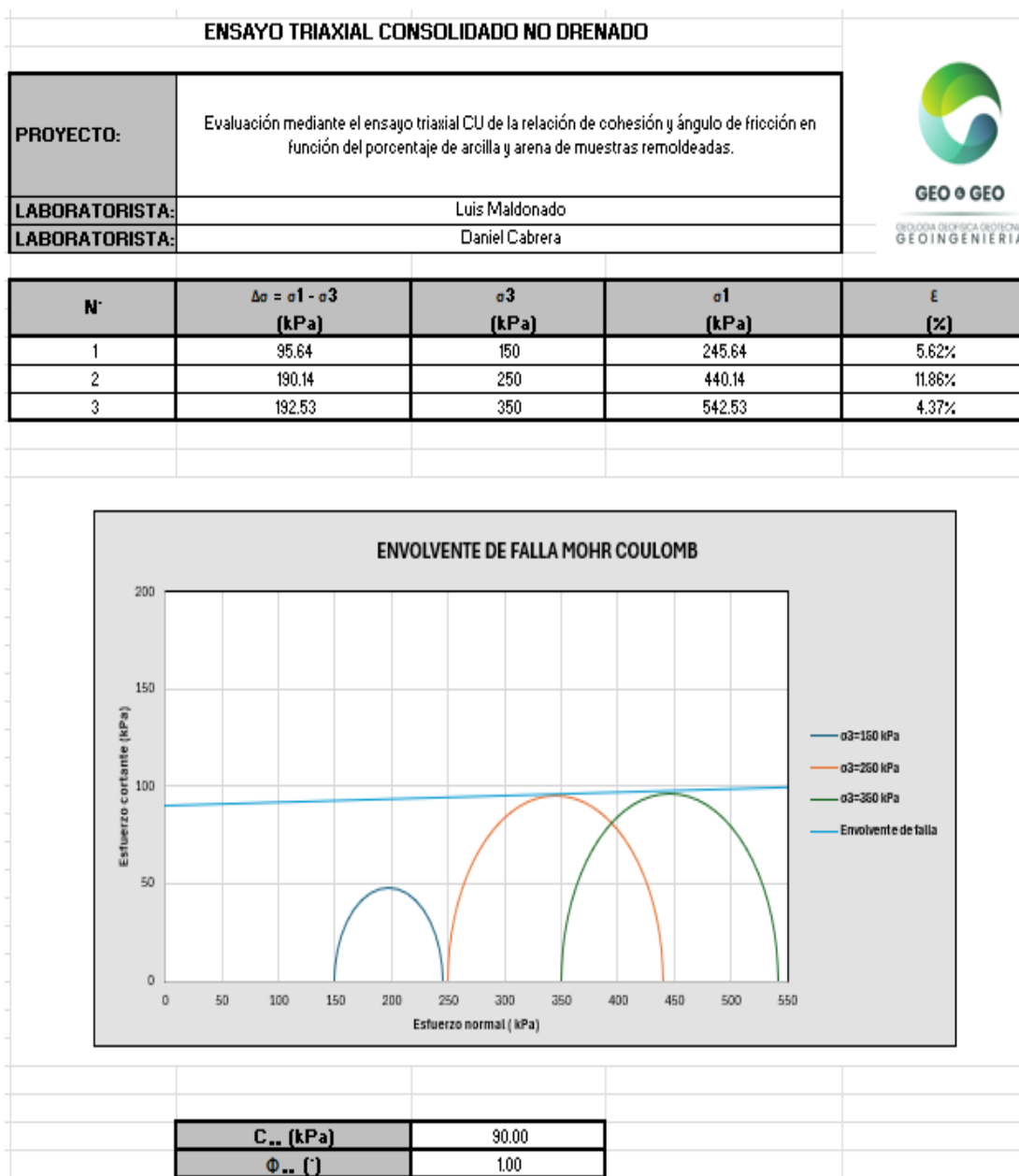
Nota. Se aprecia la muestra con un porcentaje de 100% de arcilla en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

La muestra se elaboró exclusivamente con arcilla bentonita, sin incorporación de arena. Posteriormente, el espécimen se sometió a un proceso de saturación orientado a reducir la presencia de aire atrapado y alcanzar una condición remoldeada; durante esta fase, de manera simultánea, se aplicó la consolidación bajo el esfuerzo confinante establecido, con el propósito de estabilizar su cambio volumétrico. Una vez verificada la saturación, se continuó con la consolidación hasta completar el estado requerido y, finalmente, se procedió a ejecutar el ensayo.

Los resultados del ensayo triaxial CU fueron:

Figura 14

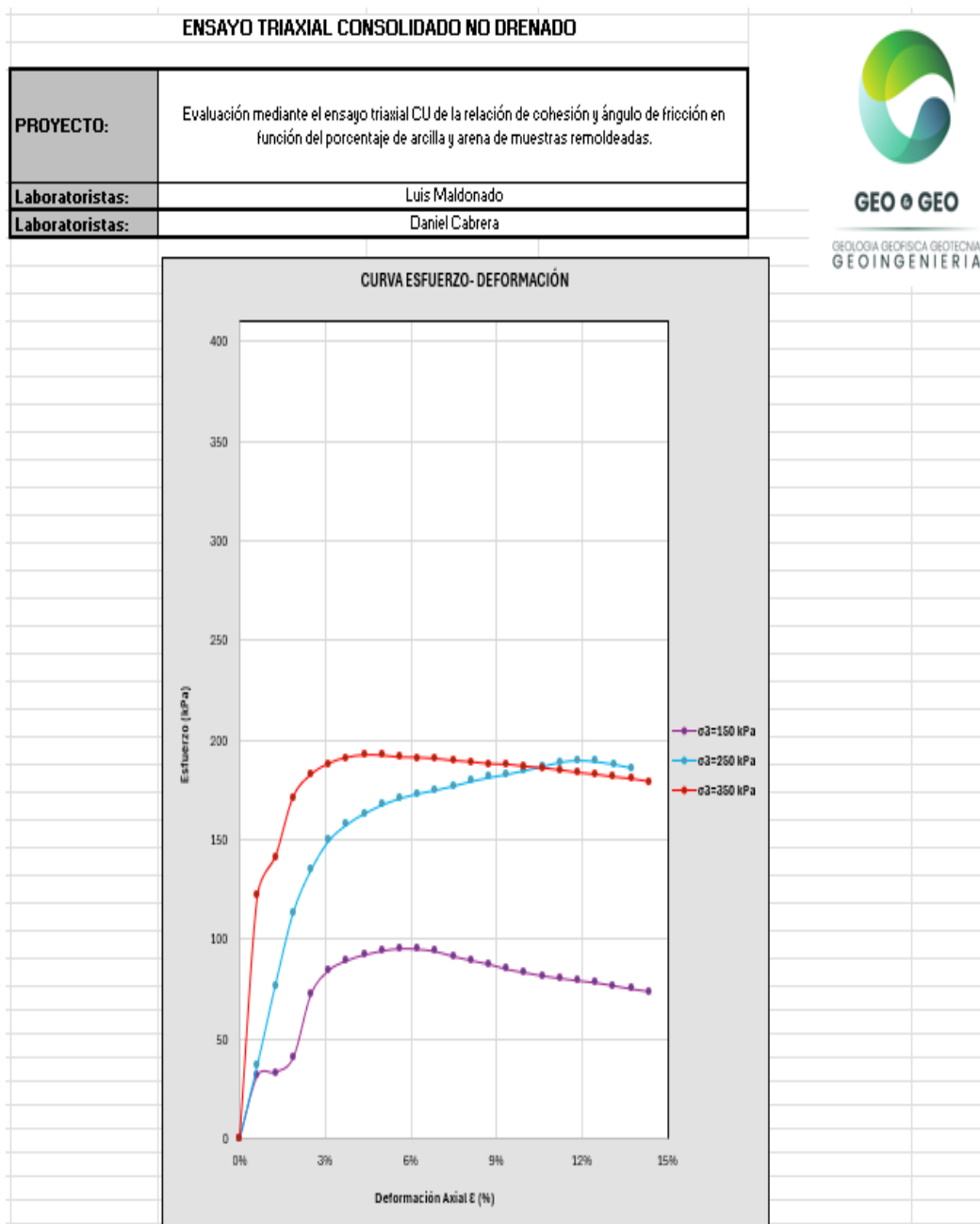
Mezcla 1 - Envolvente Falla Mohr-Coulomb - 100% Arcilla.



Nota. La ilustración muestra el envolvente de falla que se obtuvo en el ensayo triaxial CU para la muestra elaborada de 100% arcilla saturada. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

Figura 15

Mezcla 1 - Curva Esfuerzo-Deformación - 100% Arcilla.



Nota. La ilustración muestra las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas de una muestra de 100% arcilla sometida a las presiones 150, 250 y 350 kPa en el ensayo CU. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

Estos valores reflejan el comportamiento característico de este suelo arcilloso, en el cual la resistencia al corte se debe principalmente a la cohesión que adquieren las partículas. La fricción interna es baja y está controlada principalmente por la cohesión de esta muestra arcillosa bajo la condición no drenada.

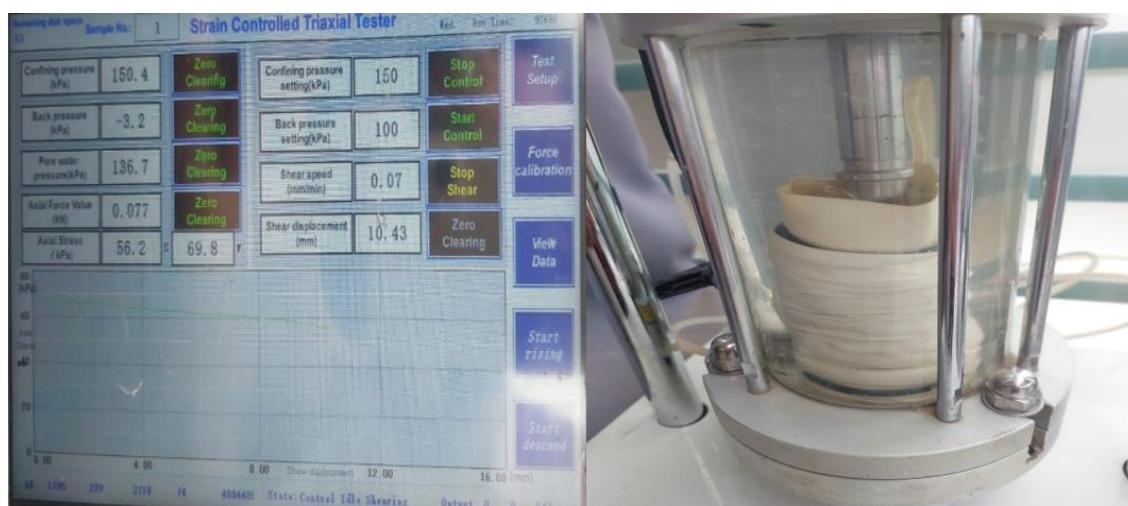
Durante el ensayo se evidenció que hubo una deformación progresiva de la muestra de prueba, sin la formación de un plano de falla claramente definido. Estos resultados son característicos de arcillas saturadas.

12.2. Segunda dosificación: muestras resmoldeadas con 80% arcilla y 20% arena

12.2.1. Primera muestra remoldeada de 80% arcilla y 20% arena sometida a la presión 1

Figura 16

Muestra con 80% de arcilla y 20% de arena dentro de la celda sometida a la presión 1 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.



Nota. Se aprecia la muestra con un porcentaje de 80% de arcilla y 20% de arena en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

12.2.2. Segunda muestra remoldeada de 80% arcilla y 20% arena sometida a la presión 2

Figura 17

Muestra con 80% de arcilla y 20% de arena dentro de la celda sometida a la presión 2 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.

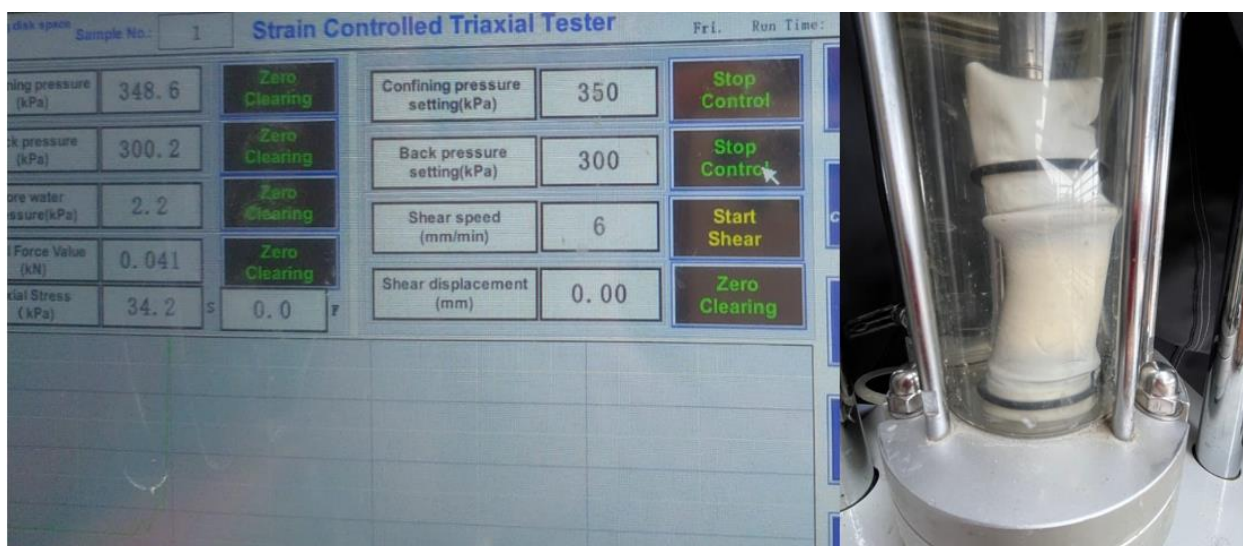


Nota. Se aprecia la muestra con un porcentaje de 80% de arcilla y 20% de arena en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

12.2.3. Tercera muestra remodelada de 80% arcilla y 20% arena sometida a la presión 3

Figura 18

Muestra con 80% de arcilla y 20% de arena dentro de la celda sometida a la presión 3 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.



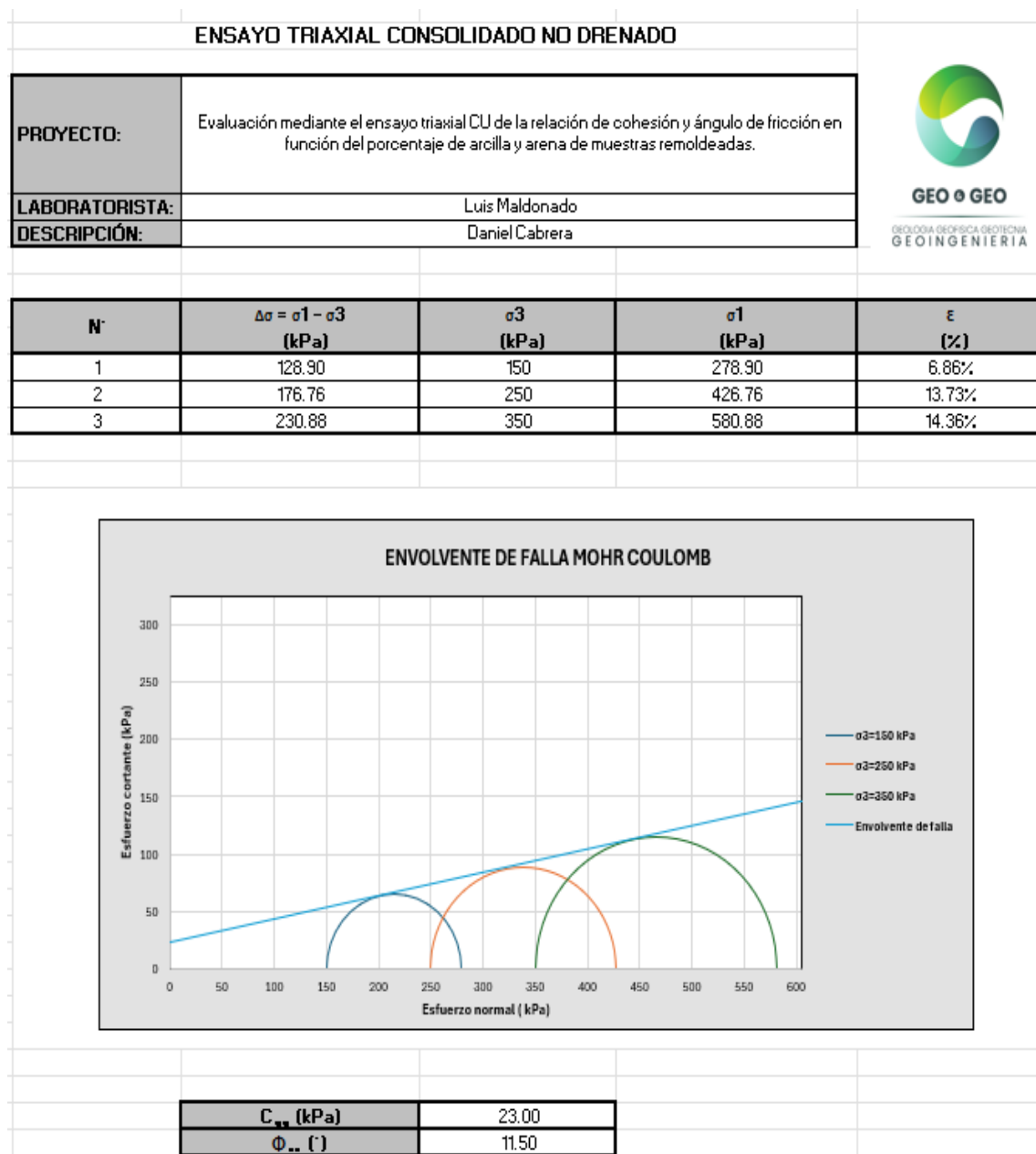
Nota. Se aprecia la muestra con un porcentaje de 80% de arcilla y 20% de arena en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

La muestra se preparó con una mezcla de 80% de arcilla y 20% de arena pasante el tamiz No. 40. El proceso de saturación se efectuó de forma simultánea a la etapa de consolidación, con el fin de minimizar la presencia de aire atrapado y estabilizar el cambio volumétrico del espécimen bajo el esfuerzo confinante definido. Esta combinación se adoptó para evaluar el comportamiento mecánico de un suelo altamente cohesivo ante la incorporación controlada de una fracción granular.

Los resultados obtenidos del ensayo triaxial CU fueron:

Figura 19

Mezcla 2 - Envolvente Falla Mohr-Coulomb - 80% Arcilla - 20% Arena.

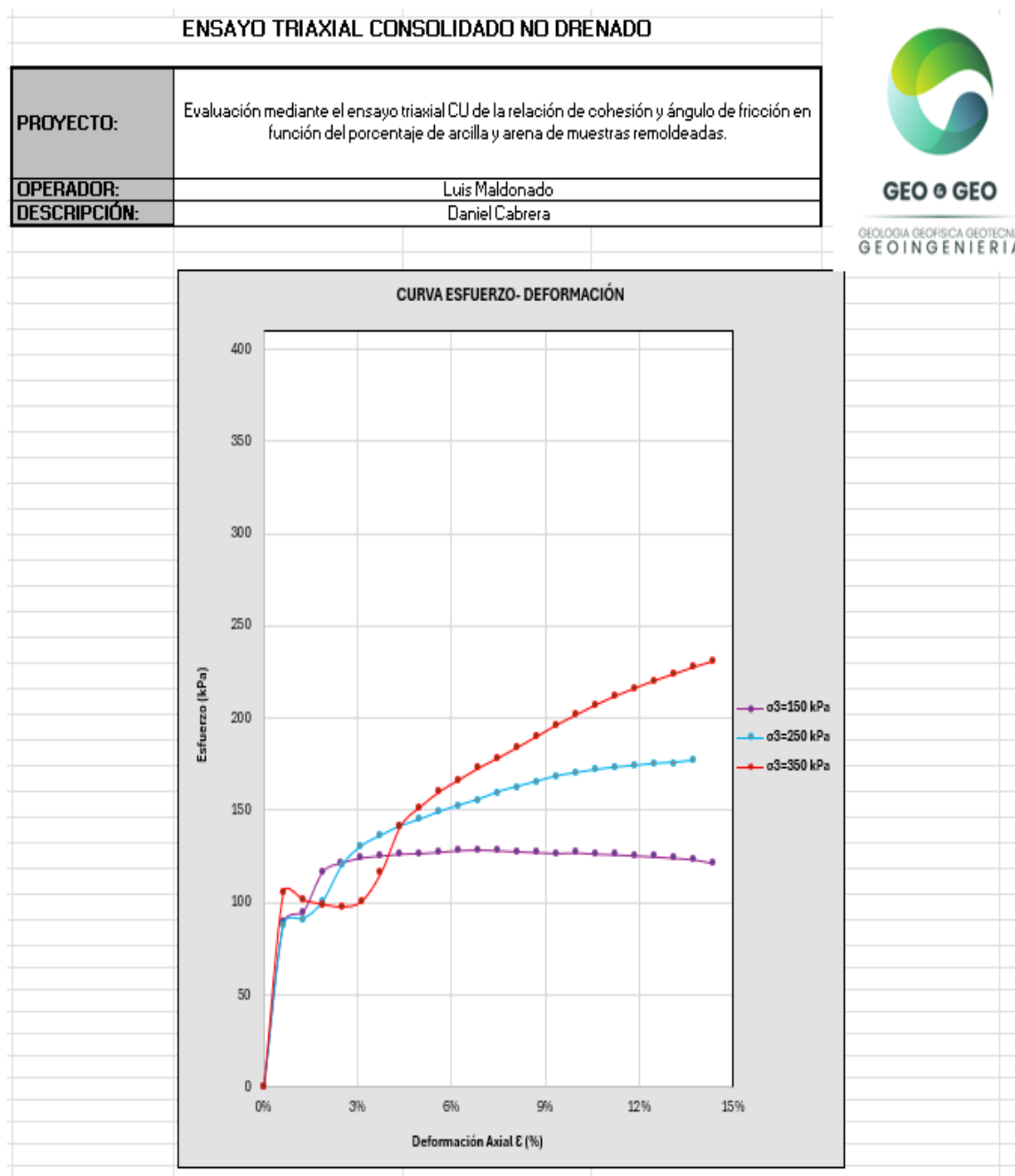


Nota. La ilustración muestra el envolvente de falla que se obtuvo en el ensayo triaxial

CU para la muestra elaborada de 80% arcilla y 20% arena en estado saturado. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

Figura 20

Mezcla 2 - Curva Esfuerzo-Deformación - 80% Arcilla - 20% Arena.



Nota. La ilustración muestra las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas de una muestra de 80% arcilla y 20% arena, sometida a las presiones: 150, 250, 350 kPa, en el ensayo CU. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

Estos parámetros muestran una resistencia moderada, donde la respuesta de los que no es drenada no depende solo de la cohesión, sino que también presenta una pendiente apreciable, el incremento del confinamiento refleja un aumento más claro de lo que es la resistencia.

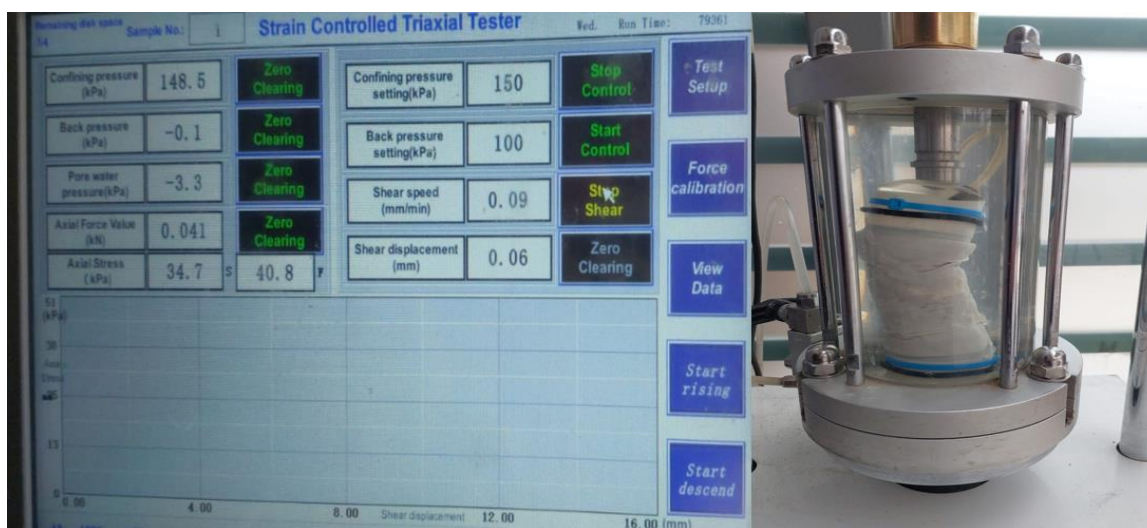
Al comparar con la muestra de 100% arcilla, se puede observar una disminución considerable en la cohesión y un aumento en el ángulo de fricción, lo cual indica que la incorporación baja de arena puede llegar a alterar la estructura de la arcilla, lo cual nos da estos cambios de resultados.

12.3. Tercera dosificación: muestras remodeladas con 50% arcilla y 50% arena

12.3.1. Primera muestra remodelada de 50% arcilla y 50% arena sometida a la presión 1

Figura 21

Muestra con 50% de arcilla y 50% de arena dentro de la celda sometida a la presión 1 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.

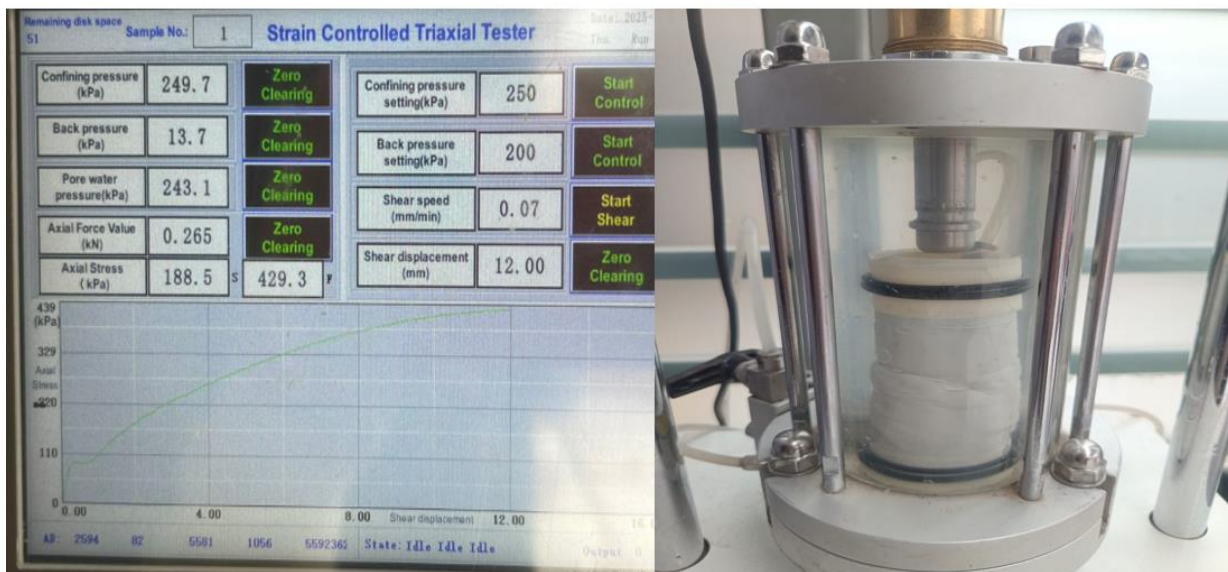


Nota. Se aprecia la muestra con un porcentaje de 50% de arcilla y 50% de arena en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

12.3.2. Segunda muestra remoldeada de 50% arcilla y 50% arena sometida a la presión 2

Figura 22

Muestra con 50% de arcilla y 50% de arena dentro de la celda sometida a la presión 2 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.



Nota. Se aprecia la muestra con un porcentaje de 50% de arcilla y 50% de arena en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

12.3.3. Tercera muestra remoldeada de 50% arcilla y 50% arena sometida a la presión 3

Figura 23

Muestra con 50% de arcilla y 50% de arena dentro de la celda sometida a la presión 3 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.



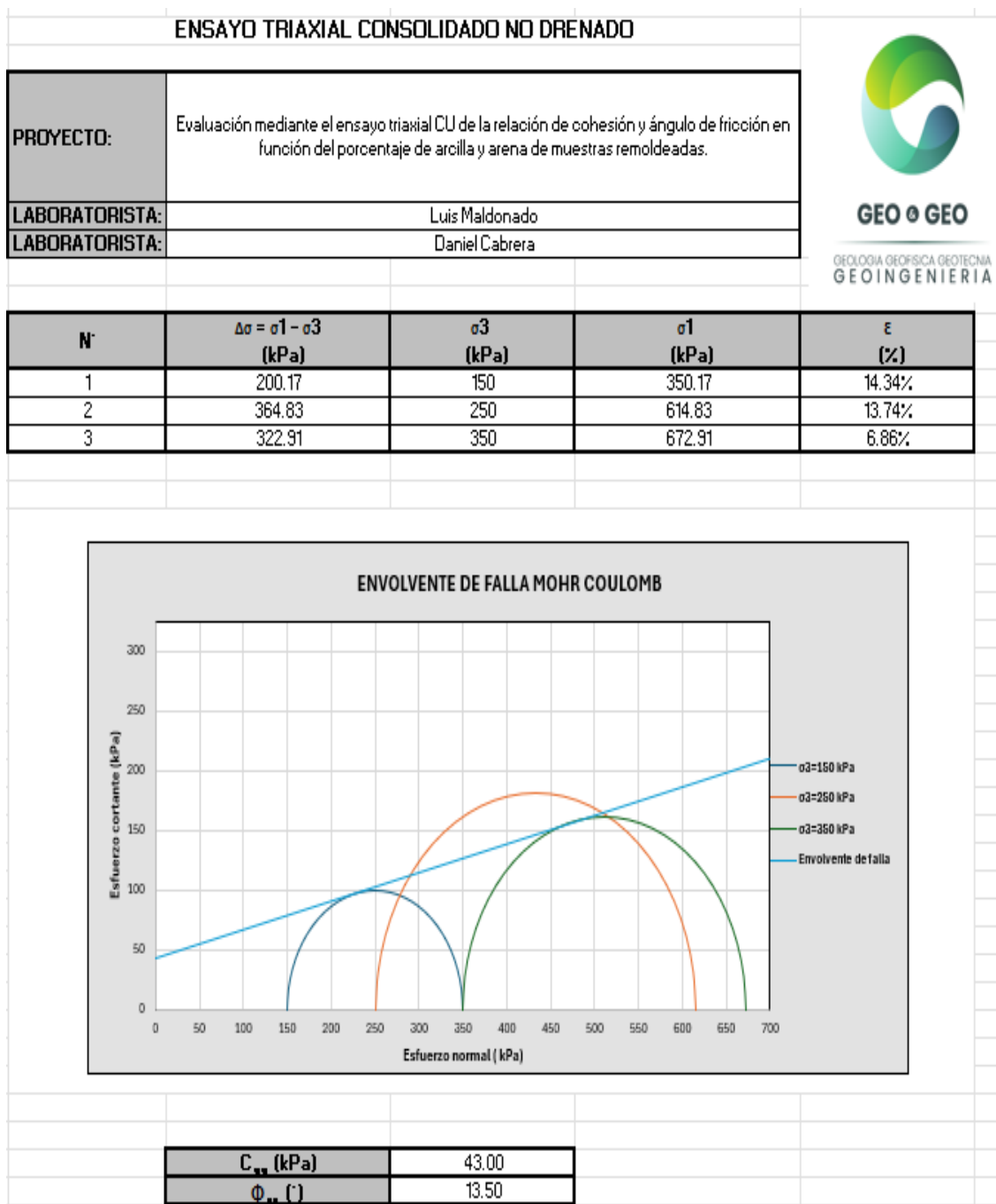
Nota. Se aprecia la muestra con un porcentaje de 50% de arcilla y 50% de arena en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

La muestra se preparó con una proporción equivalente de materiales, compuesta por 50 % de arcilla y 50 % de arena pasante en el tamiz No. 40. El espécimen fue llevado a una condición de saturación completa al 100 % para asegurar la mínima presencia de aire atrapado. Esta proporción se seleccionó por representar un punto de cambio relevante en la respuesta del suelo remoldeado, donde la resistencia deja de estar controlada únicamente por la cohesión y comienza a evidenciarse con mayor claridad la contribución por fricción asociada a la fracción granular.

Los resultados obtenidos del ensayo triaxial CU fueron:

Figura 24

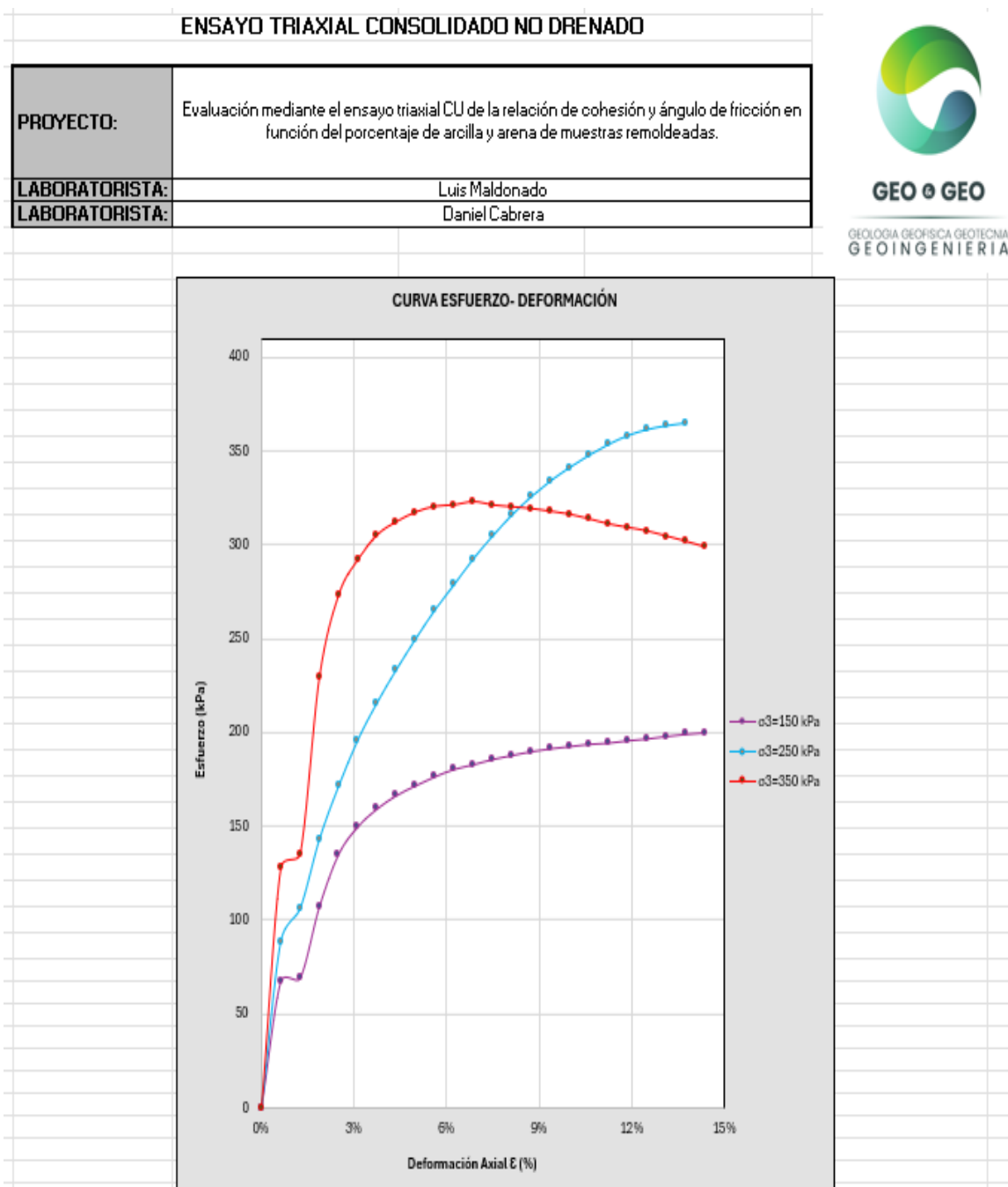
Mezcla 3 – Envolvente Falla Mohr-Coulomb – 50% Arcilla – 50% Arena.



Nota. La ilustración muestra el envolvente de falla que se obtuvo en el ensayo triaxial CU para la muestra elaborada de 50% arcilla y 50% arena en estado saturado. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

Figura 25

Mezcla 3 - Curva Esfuerzo-Deformación - 50% Arcilla - 50% Arena.



Nota. La ilustración muestra las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas de una muestra de 50% arcilla y 50% arena, sometida a las presiones: 150, 250, 350 kPa, en el ensayo CU. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

En este análisis es lo contrario a lo que se esperaba, se registró un aumento en la cohesión con respecto al mezcál anterior de 80% arcilla y 20% arena, y asimismo un ligero aumento en el ángulo de fricción. Este comportamiento que se llegó a dar, en esta proporción que se realizó, la estructura de esta muestra se ve altamente perturbada. La presencia igualitaria de arena y arcilla impide que algunos de estos dos materiales sean de una red dominante en la resistencia, lo que llega a generar una inestabilidad.

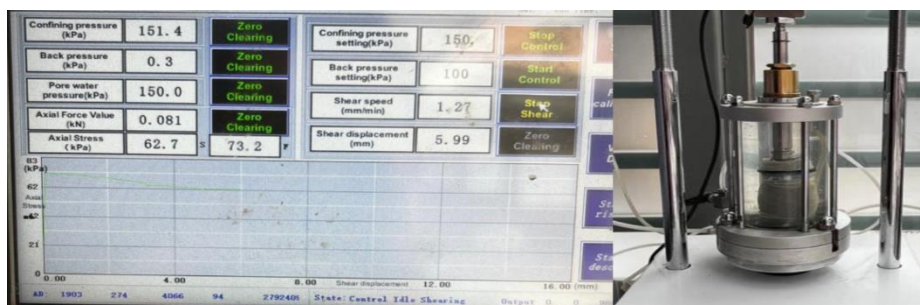
En esta mezcla mostró una resistencia al corte de tipo mixto, con una cohesión importante y una fricción que sí llega a aportar al soporte. Esto se refleja en la envolvente que se obtuvo, que llega a confirmar que la resistencia llega a aumentar con el confinamiento. En las curvas de esfuerzo-deformación, aparece un pico y una ligera caída posterior, lo que indica un reacomodo de la estructura del material y una disminución de lo que es la capacidad resistente una vez que se superó el valor máximo.

12.4. Cuarta dosificación: muestras remoldeadas con 20% arcilla y 80% arena

12.4.1. Primera muestra remoldeada de 20% arcilla y 80% arena sometida a la presión 1

Figura 26

Muestra con 20% de arcilla y 80% de arena dentro de la celda sometida a la presión 1 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.

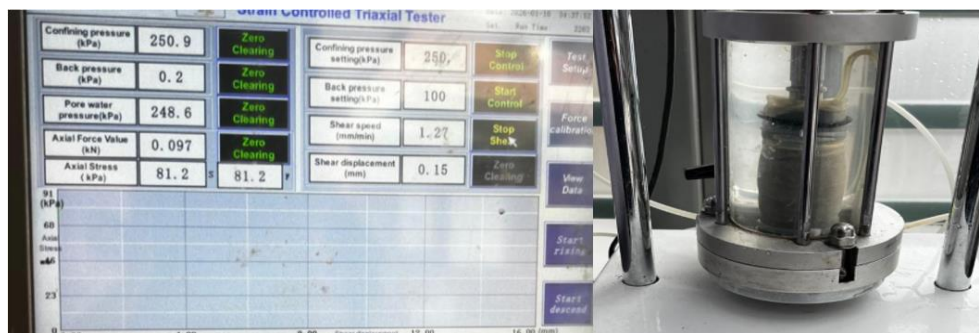


Nota. Se aprecia la muestra con un porcentaje de 20% de arcilla y 80% de arena en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

12.4.2. Segunda muestra remoldeada de 20% arcilla y 80% arena sometida a la presión 2

Figura 27

Muestra con 20% de arcilla y 80% de arena dentro de la celda sometida a la presión 2 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.

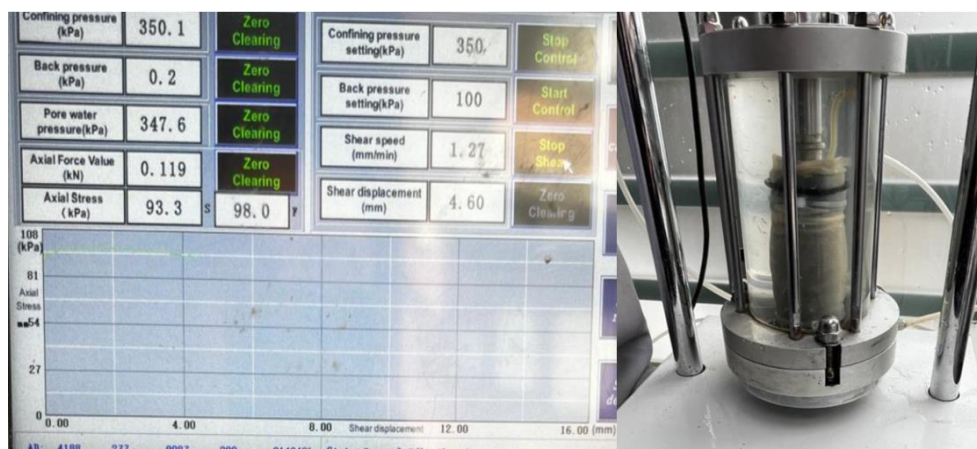


Nota. Se aprecia la muestra con un porcentaje de 20% de arcilla y 80% de arena en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

12.4.3. Tercera muestra remoldeada de 20% arcilla y 80% arena sometida a la presión 3

Figura 28

Muestra con 20% de arcilla y 80% de arena dentro de la celda sometida a la presión 3 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.



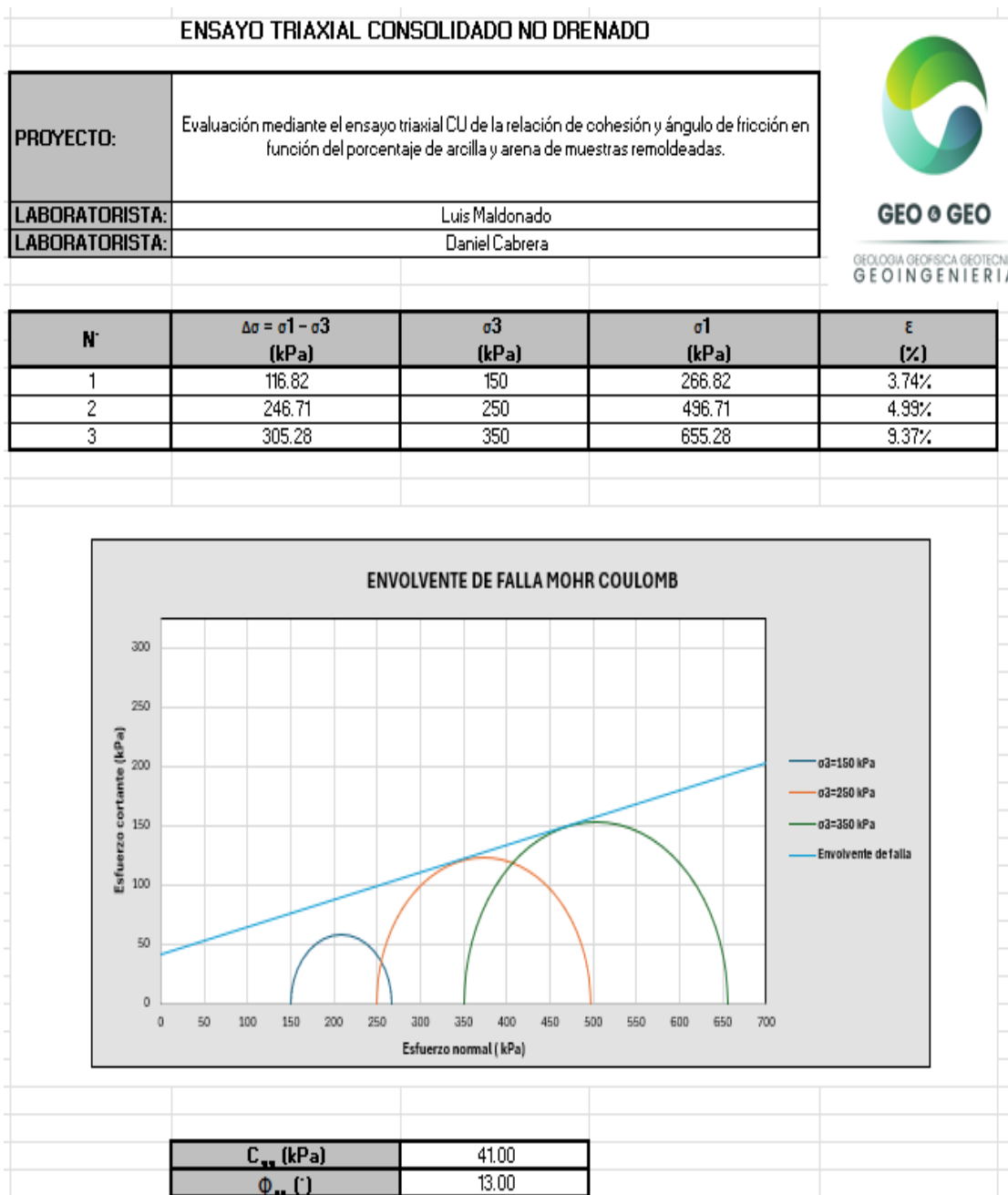
Nota. Se aprecia la muestra con un porcentaje de 20% de arcilla y 80% de arena en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

La muestra se elaboró con 20 % de arcilla y 80 % de arena pasante el tamiz N.º 40. Previo al ensayo, el espécimen se llevó a una condición de saturación completa, asegurando la mínima presencia de aire atrapado. Con esta proporción, se previó que la respuesta mecánica estuviera dominada principalmente por el componente granular, con una contribución secundaria de la matriz arcillosa en la resistencia al corte.

Los resultados obtenidos del ensayo triaxial CU fueron:

Figura 29

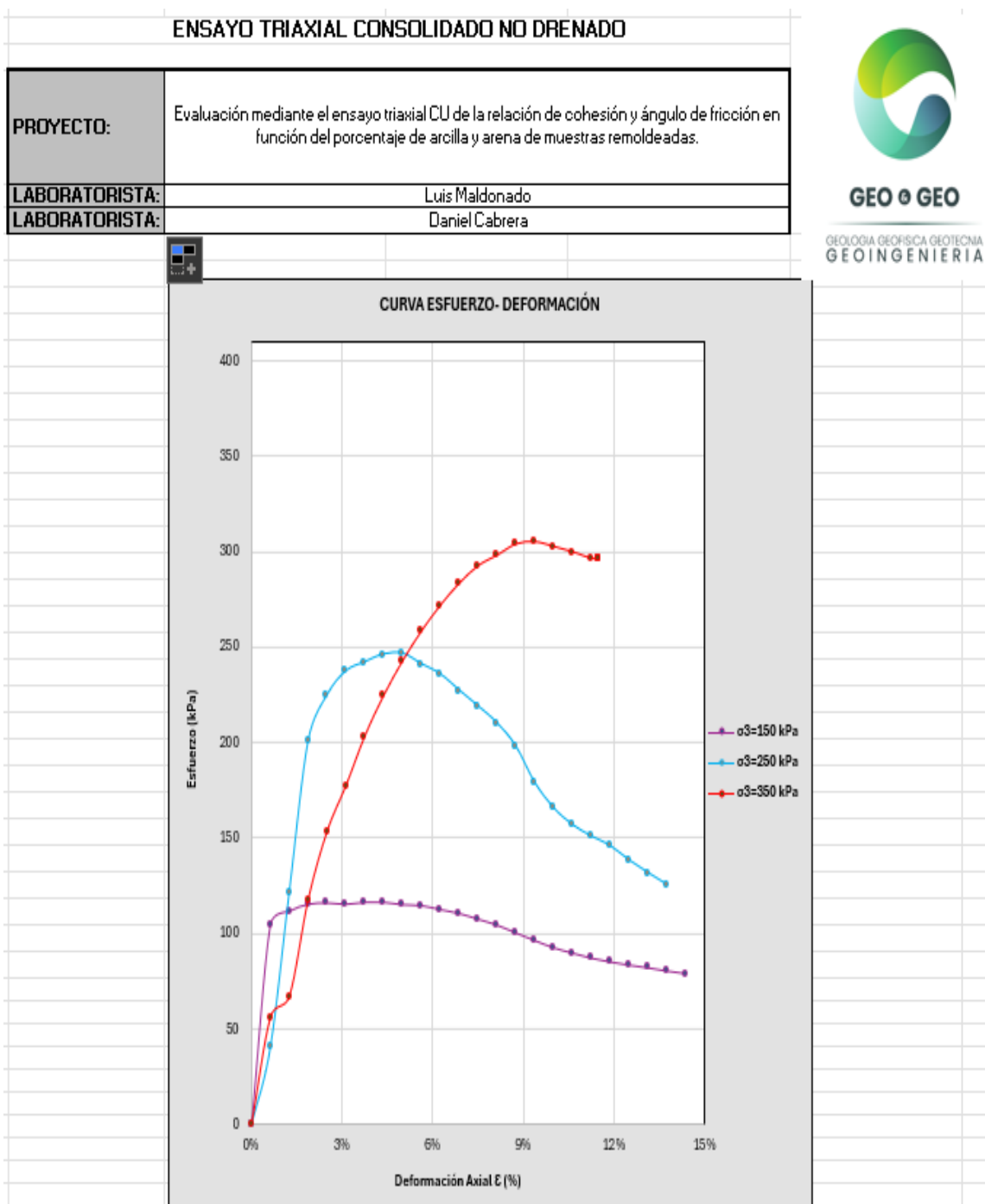
Mezcla 4 - Envoltente Falla Mohr-Coulomb - 20% Arcilla - 80% Arena.



Nota. La figura muestra el envoltente de falla que se obtuvo en el ensayo triaxial CU para la muestra elaborada de 20% de arcilla y 80% de arena en estado saturado. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

Figura 30

Mezcla 4 - Curva Esfuerzo-Deformación - 20% Arcilla - 80% Arena.



Nota. La ilustración muestra las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas de una muestra de 20% arcilla y 80% arena, sometida a las presiones: 150, 250 y 350 kPa, en el ensayo CU. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

Pese a la alta proporción de arena, la cohesión permaneció relativamente alta y el ángulo de fricción se mantuvo en el mismo rango que en la anterior muestra con respecto a la alta presencia de arena. Esto nos quiere decir que incluso un 20% de arcilla que es altamente plástica puede ser suficiente para poder modificar el comportamiento del suelo, y esto genera una matriz que depende en gran medida de la cohesión.

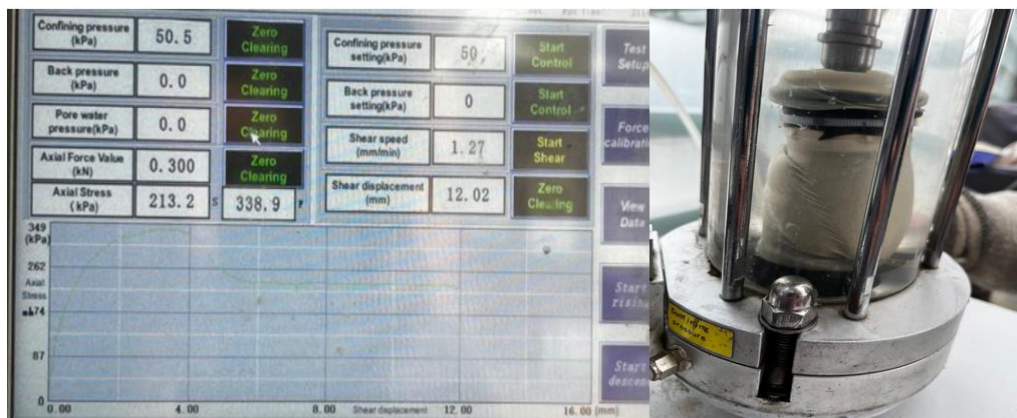
En este ensayo lo que indica es que la fricción no se moviliza plenamente pese a que hay un alto contenido de arena. Esto se puede asociar a que la arcilla saturada puede llegar a recubrir parte de los granos de arena y esto reduce la efectividad del contacto entre arenas, lo que llega a limitar su rozamiento.

12.5. Quinta dosificación: muestras remoldeadas con 0% arcilla y 100% arena

12.5.1. Primera muestra remoldeada de 0% arcilla y 100% arena sometida a la presión 1

Figura 31

Muestra con 100% de arena dentro de la celda sometida a la presión 1 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.



Nota. Se aprecia la muestra con un porcentaje de 0% de arcilla y 100% de arena en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

12.5.2. Segunda muestra remoldeada de 0% arcilla y 100% arena sometida a la presión 2

Figura 32

Muestra con 100% de arena dentro de la celda sometida a la presión 2 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.

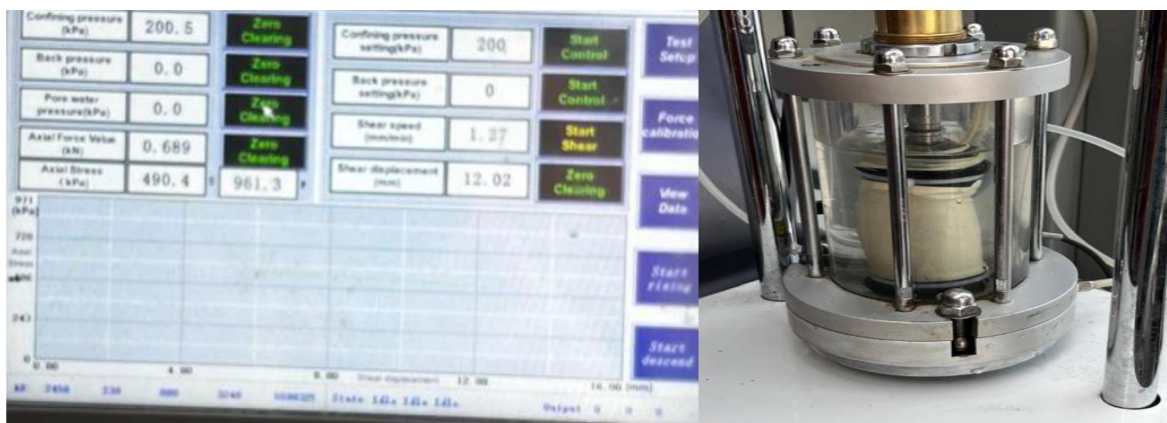


Nota. Se aprecia la muestra con un porcentaje de 0% de arcilla y 100% de arena en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

12.5.3. Tercera muestra remoldeada de 0% arcilla y 100% arena sometida a la presión 3

Figura 33

Muestra con 100% de arena dentro de la celda sometida a la presión 3 en condiciones saturadas requeridas por la Norma ASTM D 4767-95.



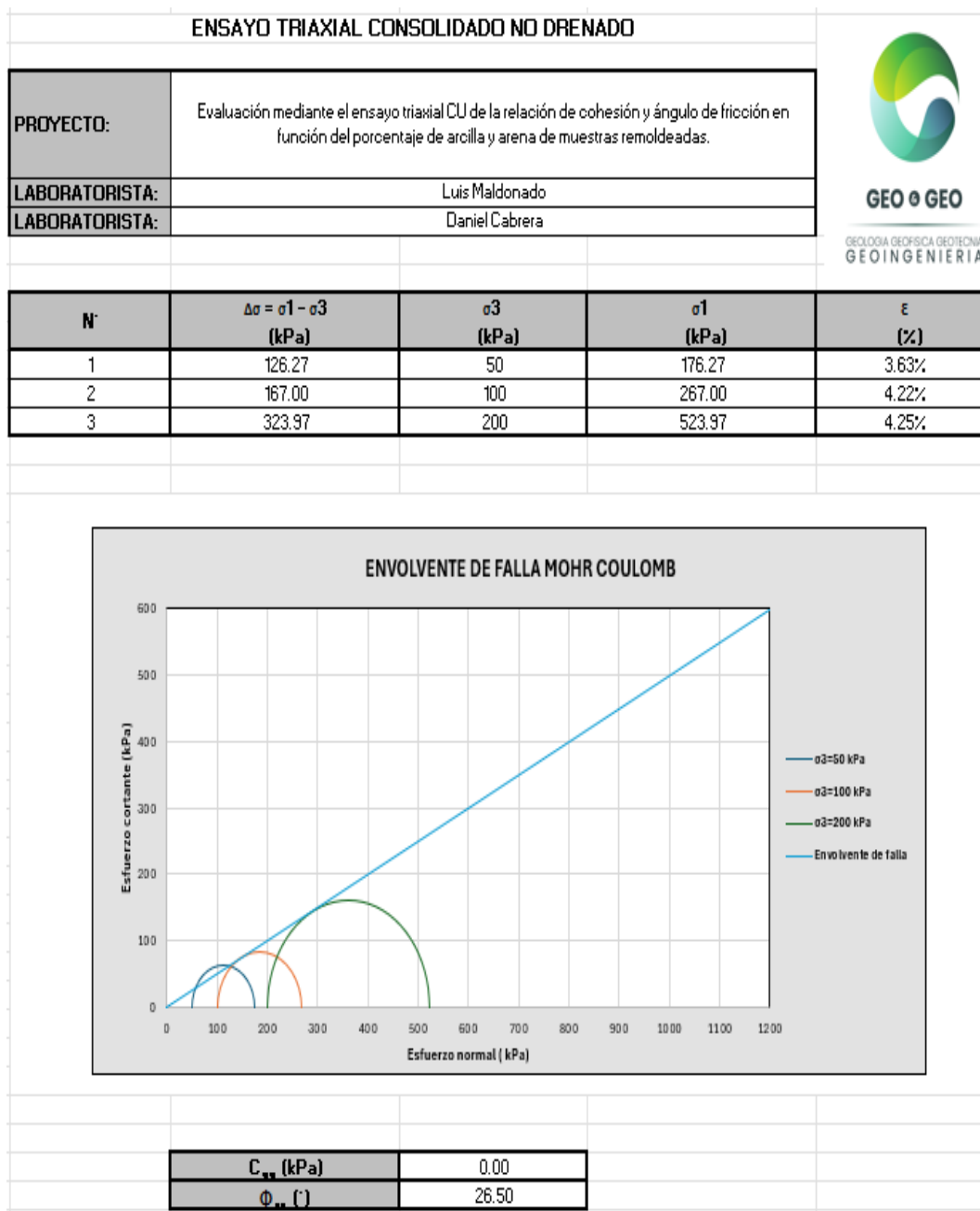
Nota. Se aprecia la muestra con un porcentaje de 0% de arcilla y 100% de arena en condiciones saturadas dentro de la celda. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

La última muestra se preparó exclusivamente con arena pasante en el tamiz No. 40, sin incorporación de arcilla, con el propósito de caracterizar el comportamiento de un material puramente granular mediante el ensayo triaxial consolidado no drenado. Igual a las mezclas anteriores, el espécimen se llevó a una condición de saturación completa, con el fin de eliminar la presencia de aire atrapado y asegurar una respuesta representativa bajo condiciones no drenadas durante el corte. Esta elección permite analizar la resistencia y la deformabilidad de la arena cuando la presión de poros influye directamente en la resistencia al corte, garantizando que los resultados obtenidos sean consistentes y comparables dentro del mismo protocolo experimental.

Los resultados obtenidos del ensayo triaxial CU fueron:

Figura 34

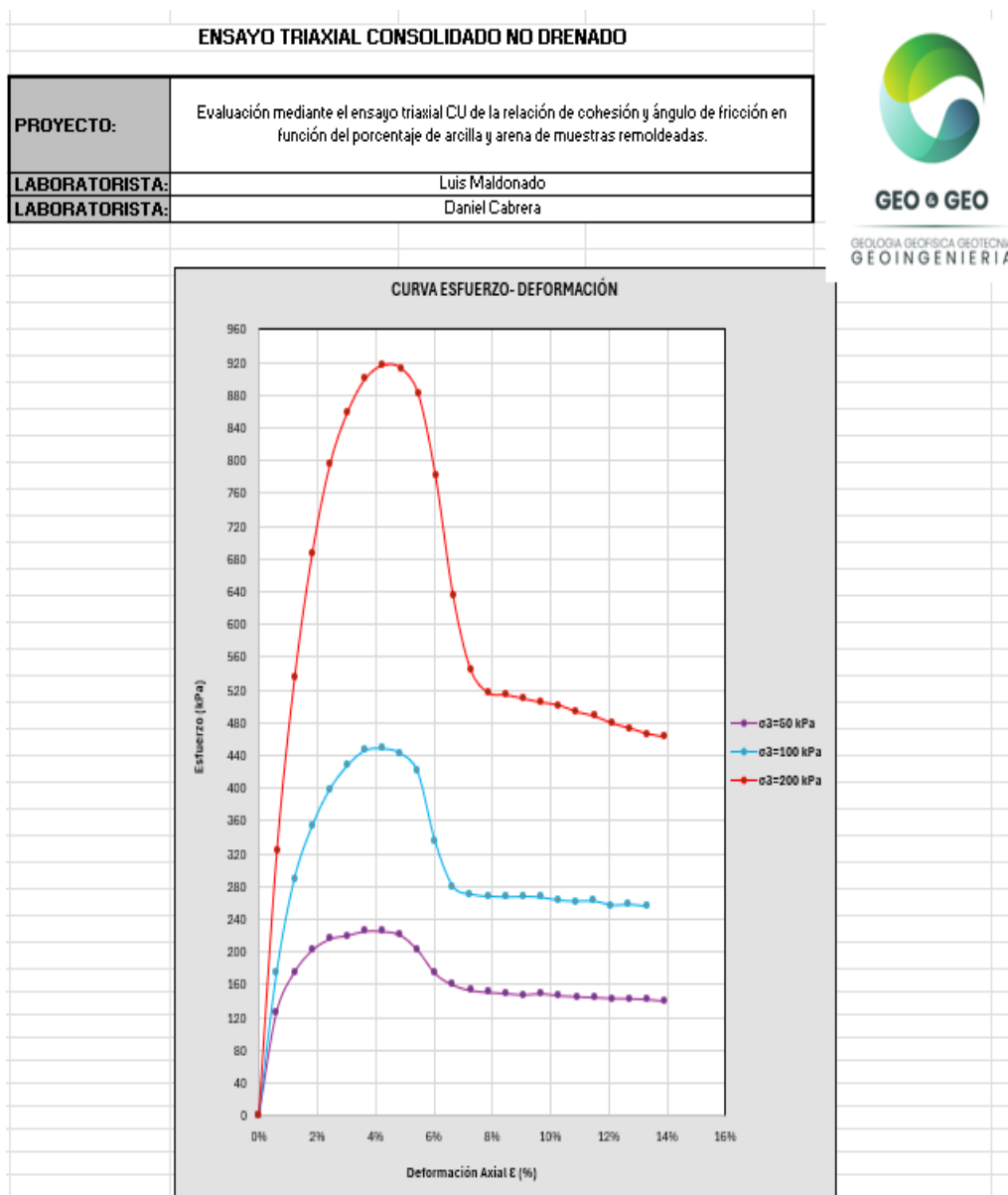
Mezcla 5 - Envolvente Falla Mohr-Coulomb - 100% Arena.



Nota. Se muestra el envolvente de falla que se obtuvo en el ensayo triaxial CU para la muestra elaborada de 100% de arena en estado saturado. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026)

Figura 35

Mezcla 5 - Mezcla 5-Curva Esfuerzo-Deformación - 100% Arena.



Nota. La ilustración 8 nos muestra las curvas de esfuerzo-deformación obtenidas de una muestra de 100% Arena, sometida a las diferentes presiones: 50, 100 y 200 kPa, en el ensayo CU.

Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

En este resultado, la cohesión fue nula, como se esperaba. Lo que confirma que el material no presentó adherencia entre las partículas; se comportó como un suelo sin cohesión, dominado por la fricción. El ángulo de fricción que obtuvimos fue bastante alto (26.5°), lo cual refleja una buena resistencia interna al corte, lo cual es propio de materiales granulares compactos y limpios.

Durante la realización del ensayo se observó que una arena saturada tiene una movilización rápida de la máxima resistencia, y luego se observó una disminución de la resistencia conforme continúa el esfuerzo. Aunque la resistencia de la arena llega a depender principalmente del rozamiento entre los granos, al llegar a estar saturada, el material genera presión de poros durante el corte; esto reduce temporalmente las tensiones efectivas y explica la pérdida de resistencia después de los picos.

Este resultado constituye una referencia comparativa frente a la muestra de lo que es 100% arcilla, ya que permite establecer el límite superior e inferior del comportamiento mecánico del material. Lo cual, se define con mayor claridad el rango total de la variación de los parámetros de resistencia dentro del conjunto de las mezclas evaluadas.

Los ensayos triaxiales CU en muestras remoldeadas con diferentes contenidos de arcilla y arena permitieron un análisis gradual de la influencia de las fracciones finas y granulares en el comportamiento mecánico del suelo en condiciones saturadas y no drenadas.

En mezclas de 100% arcilla, el comportamiento es parcialmente cohesivo, y la resistencia al corte no drenado está dominada por la cohesión y un bajo ángulo de fricción. La deformación es progresiva y la superficie de fractura es indefinida, un rasgo característico de las arcillas que, en ocasiones, están sometidas a esfuerzos confinantes crecientes. Se observa una cohesión de 90 kPa predominante en las muestras; el aporte de la fricción es 0, lo que evidencia la influencia de

la saturación en un suelo expansivo, típico de suelos que presentan estructura fina con alta influencia de enlaces electroquímicos.

Se notó que en la mezcla de 80 % de arcilla y 20 % de arena, la cohesión disminuyó y el ángulo de fricción aumentó. Esta modificación muestra que la adición de una fracción granular, incluso en proporciones pequeñas, altera la estructura interna del material y produce una reacción mecánica mixta en la que la resistencia no se basa solo en la cohesión. Al obtenerse una cohesión de 23 kPa y un ángulo de fricción de $11,5^\circ$. Es la primera etapa porcentual de arcilla y arena donde se nota el contacto granular, sin perderse la porción cohesiva por finos.

En la mezcla de 50 % de arena y 50 % de arcilla, los resultados revelaron un comportamiento no lineal, con un pequeño incremento en el ángulo de fricción y en la cohesión en comparación con la mezcla anterior. Esta respuesta se relaciona con una estructura que está muy alterada, en la que ninguna de las dos fracciones tiene el control total de la resistencia. Las curvas de esfuerzo-deformación mostraron un pico, seguido de una baja en la resistencia; esto muestra que el material experimentó reajustes internos después de llegar a su máxima resistencia.

En la mezcla de 20 % de arcilla y 80 % de arena, a pesar del contenido elevado de arena, la cohesión se mantuvo importante y no aumentó proporcionalmente el ángulo de fricción. Este comportamiento indica que una pequeña cantidad de arcilla muy plástica es suficiente para alterar la reacción del suelo, debido a que la arcilla saturada envuelve en parte los granos de arena, lo que impide el desplazamiento total de la fricción.

Por último, la muestra de 100 % arena mostró una conducta exclusivamente friccional, con un ángulo de fricción alto y una cohesión casi inexistente. La resistencia se movió con rapidez y

luego sufrió una disminución, vinculada al desarrollo de presiones de poros durante el corte, lo que es típico en arenas saturadas bajo condiciones no drenadas.

Los resultados en su totalidad posibilitan la identificación de una transición evidente de un comportamiento cohesivo a uno friccional, a medida que se reduce el contenido de arcilla. Se enfatiza que incluso pequeñas alteraciones en la proporción de finos producen modificaciones notables tanto en las curvas esfuerzo-deformación como en los parámetros de resistencia al corte. Este estudio ofrece un fundamento sólido para analizar el impacto que tiene la composición granulométrica en suelos remoldeados en condiciones CU.

La tabla a continuación muestra una síntesis de los parámetros de resistencia al corte obtenidos de ensayos triaxiales en cinco mezclas de arcilla y arena con diferentes proporciones. Da la cohesión (C) y el ángulo de fricción interna (ϕ) como indicadores del mecanismo de resistencia predominante de cada material. En general, los resultados muestran una transición desde un comportamiento predominantemente cohesivo en la muestra 100% arcilla (alto C y cero ϕ) a un comportamiento predominantemente friccional en la muestra 100% arena (cero C y alto ϕ). Las mezclas intermedias muestran una respuesta mixta en la que coexisten aportes de cohesión y fricción, reflejando la influencia conjunta de la matriz arcillosa y el contacto granular, sin descartar el aporte expansivo que demuestra las muestras, al ser saturadas acorde a la norma.

Tabla 5

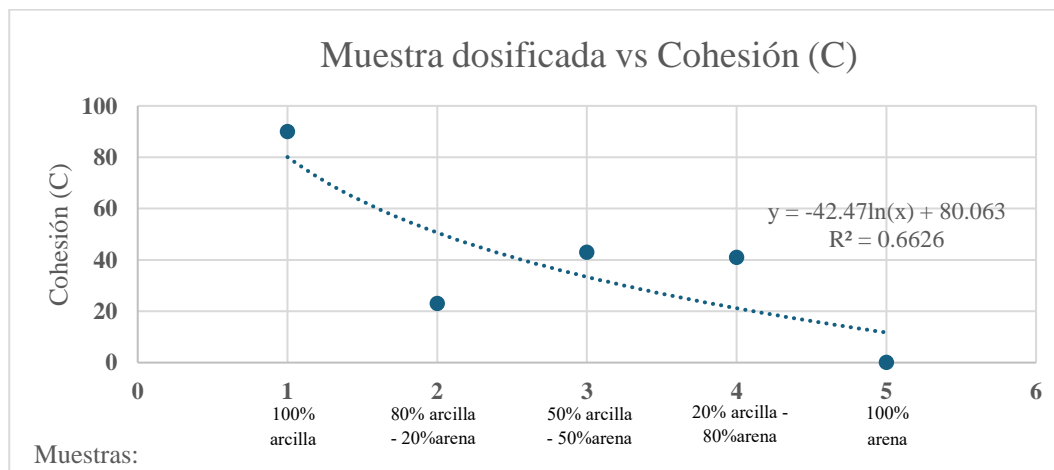
Tabla de resultados obtenidos.

N.º de mezcla (por cada mezcla 3 muestras)	Porcentaje de las muestras	Cohesión (C) en kPa	Angulo de fricción (Ø) en °
1	100% Arcilla	90	0
2	80% Arcilla - 20% Arena	23	11.5
3	50% Arcilla - 50% Arena	43	13.5
4	20% Arcilla - 80% Arena	41	13
5	100% Arena	0	26.5

Nota. En la tabla 5 se pueden observar los resultados obtenidos de todos los ensayos triaxiales consolidados no drenados. Elaborado por: Los Autores.

Figura 36

Relación entre los diferentes porcentajes de material y la cohesión (C).

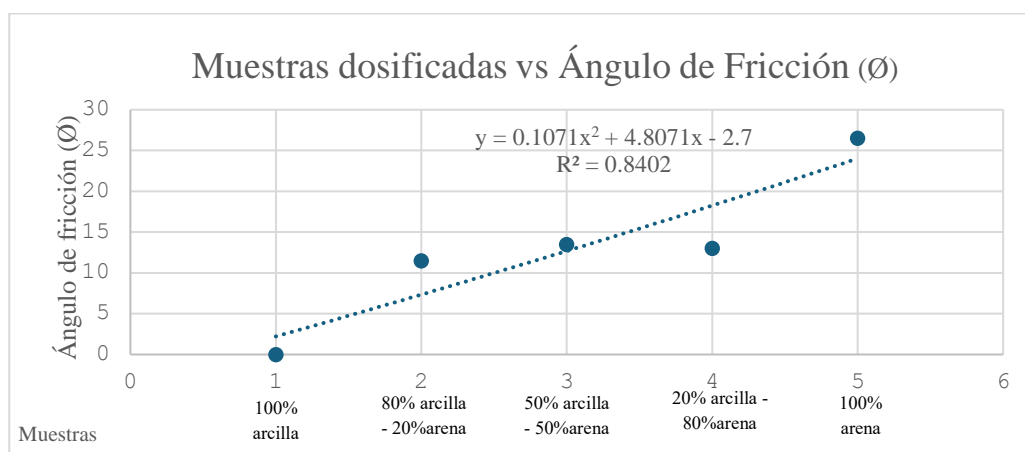


Nota. De la gráfica se logra apreciar una tendencia global decreciente de lo que es la cohesión a medida que va avanzando la serie de mezclas. Se llega a evidenciar una pérdida progresiva de la cohesión al reducirse la fracción de los finos plásticos. Aunque los valores

intermedios muestren fluctuaciones, la línea de tendencia confirma un descenso no lineal y consistente, compatible con el cambio de un comportamiento dominado por lo que es la matriz arcillosa hacia uno que es controlado principalmente por la base granular. Elaborado por: Los Autores

Figura 37

Relación entre los diferentes porcentajes de material y el ángulo de fricción (ϕ).



Nota: Se observa una tendencia general creciente del ángulo de fricción conforme avanza la serie de muestras. Lo que sugiere que, al incrementarse la proporción de fracción granular en las mezclas, se llega a fortalecer el mecanismo friccional asociado al contacto e interbloqueo de partículas.

En la ilustración se llega a apreciar que la cohesión (C) pierde magnitud conforme avanza la secuencia de las muestras, pasando de un valor alto en la muestra 1 (90) a un valor prácticamente nulo en la muestra 5. No obstante, las muestras intermedias evidencian variabilidad en los resultados; por ejemplo, en las muestras 3 y 4 la cohesión se mantiene en un rango moderado en comparación con la muestra 2, lo que refleja una dispersión propia del comportamiento del material evaluado.

En la ilustración 12, el ángulo de fricción (\emptyset) llega a presentar un incremento global desde valores muy bajos como lo es en la muestra 1 (0°) hasta la muestra 5 en (26.5°), coherente con una mayor participación de material granular y un mecanismo resistente conocido por el contacto entre las partículas. Aunque existe una leve variación en las muestras intermedias, como la muestra 4 cae ligeramente con respecto a la muestra 3, este fenómeno nos indica que esta mezcla no llega a alcanzar una estructura granular estable, sino que hay una transición con baja eficiencia en lo que es la transmisión de esfuerzos por fricción.

En conjunto, ambas figuras evidencian una transición desde un comportamiento cohesivo hacia uno más friccional, pero con respuestas intermedias no uniformes. Por ello, la interpretación de estas mezclas se sustenta en los resultados experimentales obtenidos en los ensayos realizados, los cuales permiten caracterizar su desempeño bajo carga más allá de la proporción de arcilla y arena.

13. Discusión de resultados

En los ensayos triaxiales CU con saturación del 100%, los parámetros de resistencia muestran que hay una transición clara del comportamiento cohesivo al friccional. En la figura de la cohesión (C), los valores descienden desde el valor más alto de la primera muestra hasta valores cercanos a cero en la última, lo que nos llega a indicar que al aumentar la fracción granular se pierde cohesión en las partículas finas. En la figura del ángulo de fricción, se aprecia un incremento desde valores que son muy bajos como es desde la muestra de 100% arcilla, hasta valores superiores como la muestra de 100% arena, aunque con variaciones de las mezclas intermedias.

Las oscilaciones en las mezclas intermedias son coherentes con un régimen transicional; la arcilla bentonita puede recubrir granos y ocupar vacíos sin formar todavía una matriz continua, lo cual reduce la eficiencia del contacto granular; además, al estar saturadas y ensayadas en condición no drenada, la resistencia movilizada queda muy condicionada por la generación de presión de poros durante el corte, puede dispersar los parámetros obtenidos a partir del ajuste Mohr–Coulomb.

Al aumentar el contenido de la arcilla bentonita suele observarse incremento de cohesión y reducción del ángulo de fricción, mientras que al aumentar arena ocurre el efecto inverso. Esto ha sido reportado en ensayos triaxiales CU, donde se documenta la obtención de parámetros de resistencia (totales y efectivos) y la sensibilidad del material a la proporción de bentonita, especialmente por cambios microestructurales y de plasticidad.

13.1. Comparación ensayo triaxial CU y UU

Figura 38

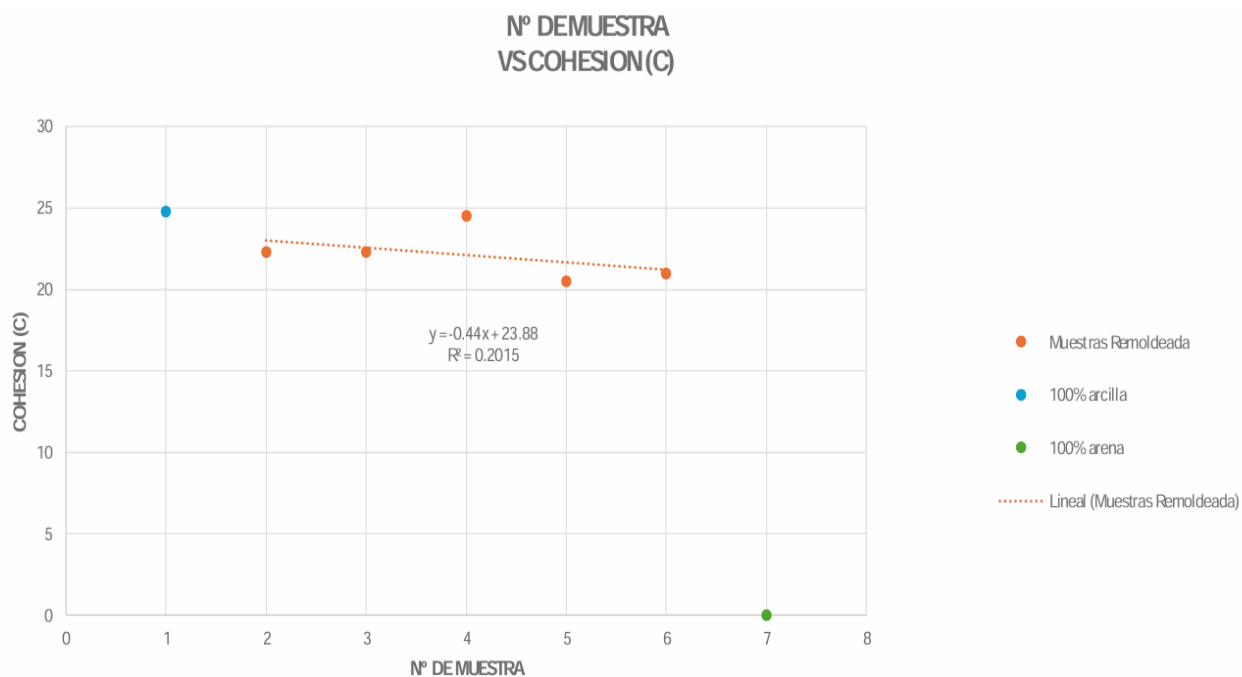
Tabla de parámetros obtenidos a partir del ensayo triaxial UU no consolidado no drenado.

N.º de Muestra	Porcentajes de las muestras	Cohesión (C)	Ángulo de fricción (\emptyset)	% de Humedad
1	100% arcilla.	24.8	12.5	45%
2	80% arcilla - 20% arena.	22.3	4.35	45%
3	60% arcilla - 40% arena.	22.3	4.25	45%
4	50% arcilla - 50% arena	24.5	2.8	45%
5	40% arcilla - 60% arena.	20.5	4.3	45%
6	20% arcilla - 80% arena.	21	3.7	45%
7	100% arena.	0	39	8%

Nota: Esta tabla pertenece al trabajo de titulación sobre “EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE ARENA Y ARCILLA EN UNA MUESTRA REMOLDEADA UTILIZANDO UN ENSAYO TRIAXIAL UU” de Marquina y Pulla (2025):

Figura 39

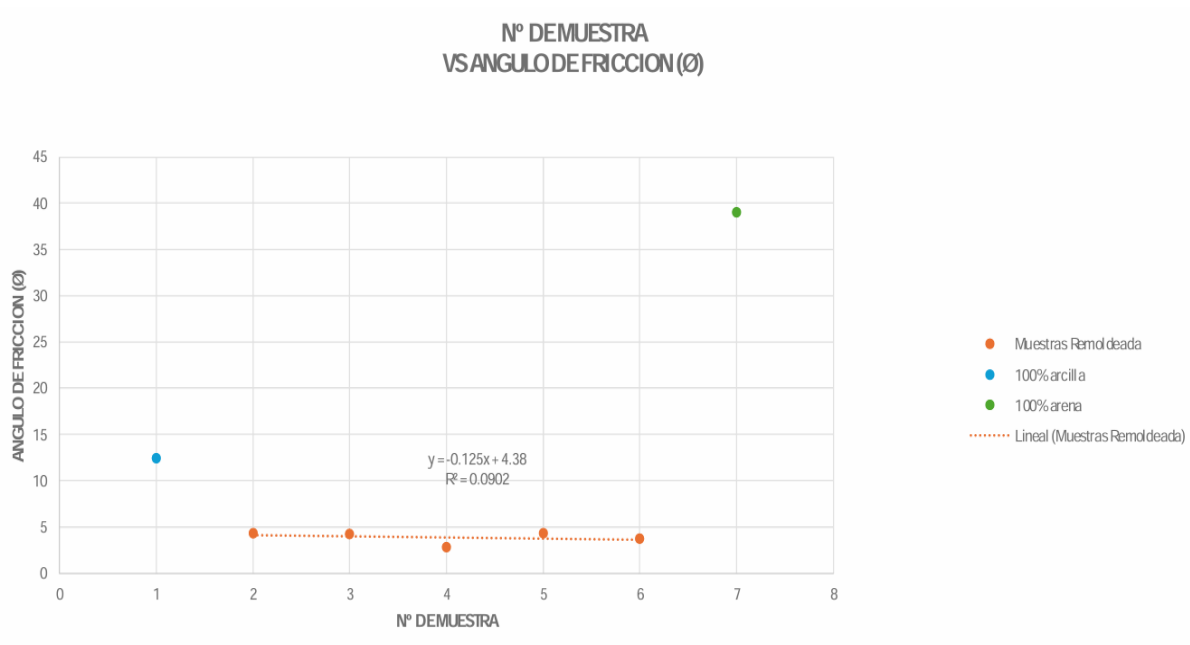
Gráfica de relación entre el porcentaje de arena y la cohesión (C).



Nota: Se muestra el comportamiento de muestras remoldeadas con un 45% de saturación sometidas al ensayo triaxial no consolidado no drenado. Fuente: Marquina y Pulla (2025).

Figura 40

Relación entre el porcentaje de arena y el ángulo de fricción del ensayo triaxial UU



Nota: Comportamiento de las muestras ante el ensayo triaxial UU. *Fuente: Marquina y Pulla (2025).*

La comparación entre los resultados del ensayo triaxial CU, correspondiente a la presente investigación, y los del ensayo triaxial UU del proyecto de titulación “*EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN ENTRE COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN EN FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE ARENA Y ARCILLA EN UNA MUESTRA REMOLDEADA UTILIZANDO UN ENSAYO TRIAXIAL UU*” evidencia cómo el proceso de consolidación y saturación de muestras remoldeadas afecta significativamente la resistencia del suelo, enfatizando el comportamiento saturado de las muestras con contenido completo de arena, reduciendo en gran medida el ángulo de fricción.

En el ensayo CU, se percibe un cambio evidente de la conducta cohesiva a la friccional a medida que se reduce el contenido de arcilla y se incrementa la cantidad de arena. Esto facilita distinguir con mayor exactitud la contribución del ángulo de fricción y la cohesión. Por el contrario, el ensayo UU muestra una respuesta que se encuentra principalmente dominada por la cohesión no drenada, y tiene menor sensibilidad a las variaciones granulométricas debido a que no tuvo consolidación previa.

En suelos con alto contenido de arcilla, los dos ensayos muestran un comportamiento de cohesión; sin embargo, en el ensayo UU la resistencia se enfoca más en la cohesión aparente. En mezclas de arena y arcilla, el ensayo CU muestra con más nitidez la intervención de la fracción granular; en cambio, este efecto es menos evidente en el ensayo UU. El ensayo CU presenta una conducta friccional aceptable en estratos con predominancia de arena, mientras que el ensayo UU está afectado por la generación de presiones de poros durante la carga.

En términos generales, la comparación efectuada muestra que el ensayo CU ofrece una interpretación más realista y completa de la conducta mecánica del suelo, en particular cuando se estudian las variaciones en la composición granulométrica. En cambio, el ensayo UU es apropiado para examinar estados iniciales o condiciones de carga rápida. Sin embargo, tiene restricciones a la hora de estudiar cómo el suelo afecta estructuralmente y cómo interactúan las partículas gruesas con las finas.

Por lo tanto, los hallazgos de esta investigación corroboran que tener en cuenta el proceso de consolidación es crucial para interpretar adecuadamente los parámetros de resistencia al corte. Esto refuerza la relevancia del ensayo CU como herramienta principal para el análisis geotécnico en investigaciones que buscan describir condiciones más parecidas a cómo se comporta el suelo realmente.

14. Conclusiones

Los resultados confirman una transición global desde un comportamiento principalmente cohesivo hacia un fraccional, coherente con el cambio progresivo de la fracción granular.

La cohesión se reduce considerablemente con el incremento de la arena: pasa de 90 kPa con 100% de arcilla a 0 kPa con 100% de arena, lo que demuestra que la contribución cohesiva se pierde cuando la matriz ya no está determinada por los finos plásticos.

El ángulo de fricción suele aumentar a medida que se incrementa la presencia de arena, comenzando desde cifras muy bajas en la arcilla (0°) hasta alcanzar $26,5^\circ$ en la arena, lo que muestra cómo se refuerza el mecanismo de resistencia a través del contacto y el entrelazado de las partículas de arena.

Las combinaciones intermedias no presentan un desarrollo lineal: en proporciones de 50–50 y 20–80 se lograron cohesiones bastante elevadas (43 y 41 kPa), lo que indica que, a pesar de tener una cantidad considerable de arena, la arcilla bentonita puede sostener una estructura activa que influye en la resistencia general.

En combinaciones donde la arena es predominante, la fricción no se activa totalmente: el documento señala que la arcilla húmeda puede recubrir las partículas y disminuir la eficacia del contacto entre granos de arena, lo que restringe el funcionamiento del mecanismo de fricción que se anticipaba.

La relación entre esfuerzo y deformación varía según el tipo de material: la arcilla saturada experimenta una deformación continua sin un claro plano de fallo, mientras que la arena saturada desplaza rápidamente el pico y luego muestra una disminución en la resistencia, lo cual es

coherente con los efectos de presión de poros en las tensiones efectivas durante un corte no drenado.

En resumen, las gráficas y el análisis apoyan la idea de que las mezclas intermedias indican un estado de transición con una mayor variabilidad en los parámetros, por lo que su entendimiento debe fundamentarse en la información obtenida de los experimentos y no únicamente en la proporción de los componentes.

A partir de los resultados presentados para los ensayos triaxiales UU y CU en mezclas arcilla–arena, se concluye que el material evoluciona desde un comportamiento predominantemente cohesivo hacia uno friccional conforme aumenta la fracción granular, evidenciándose una reducción progresiva de la cohesión hasta valores nulos en la mezcla de 100% arena, mientras que el ángulo de fricción interna tiende a incrementarse hacia valores representativos de suelos granulares; en el caso del CU, esta transición se aprecia con mayor claridad, con una cohesión elevada en 100% arcilla y un ángulo de fricción prácticamente inexistente, frente a la condición opuesta en 100% arena, lo que refleja el cambio del mecanismo resistente desde la matriz fina (controlada por los finos) hacia el contacto e interbloqueo entre partículas.

No obstante, en las mezclas intermedias no se observa una variación estrictamente lineal de los parámetros, pues aparecen combinaciones de cohesión y fricción que sugieren un estado transicional donde la estructura interna, el grado de homogeneidad y el estado inicial de compactación pueden influir de manera relevante, llegando incluso a generar respuestas con dispersión en los valores estimados; esta condición es especialmente importante para el diseño, porque demuestra que los materiales compuestos no se comportan como un simple promedio entre “solo arcilla” y “solo arena”.

En el ensayo UU, además, se destaca que el comportamiento puede verse fuertemente condicionado por el contenido de humedad y por la falta de consolidación previa, lo que puede reducir el aporte friccional y alterar la tendencia esperada del ángulo de fricción en mezclas con presencia significativa de arcilla, motivo por el cual los parámetros obtenidos deben interpretarse considerando el estado de preparación de la muestra y sus condiciones iniciales.

Finalmente, en el CU la interpretación debe incorporar el efecto de la presión de poros bajo condición no drenada y el estado de saturación, debido a que estos factores influyen directamente en los esfuerzos efectivos movilizados y, por tanto, en la estimación de la envolvente de falla; en conjunto, los resultados confirman la sensibilidad de C y ϕ no solo a la proporción arcilla-arena, sino también al procedimiento de preparación y a las condiciones hidráulico-mecánicas bajo las cuales se ejecuta cada modalidad de ensayo.

15. Recomendaciones

En tareas futuras, se deben considerar repeticiones adicionales en las combinaciones intermedias, ya que el intervalo tiende a variar más. Como resultado, puede ser más fácil determinar de manera definitiva si las diferencias se correlacionan con el material o el método de preparación.

A costa de preservar la energía de compactación (en términos de número de capas, grosor por capa y golpes aplicados), la precisión comparativa de los datos es mejor al obtener registros de peso, tamaño y densidad obtenida para cada muestra de datos.

Este seguimiento minimiza las variaciones por compactación desigual. Se sugiere considerar las combinaciones bajo condiciones de confinamiento similares o al menos en un rango comparable, de modo que las tendencias de C y \emptyset entre diferentes composiciones puedan hacerse más fácilmente distinguibles e independientes de las diferencias en los métodos de prueba.

Se recomienda que, con proporciones medias, tales combinaciones tendrán un comportamiento variable en el campo, que es menos predecible que los materiales puros, por lo que en áreas donde las demandas geotécnicas son muy altas, estas pueden estudiarse in situ, pero no solo con datos referenciales para ese sitio.

16. Referencias bibliográficas

(Repositorio Institucional UTPL: Comparación de Los Parámetros de Resistencia al Corte Con Muestras Inalteradas y Remoldeadas En El Ensayo Triaxial UU En Diferentes Tipos de Suelos, n.d.)

(Análisis de La Dinámica Del Agua En La Zona No Saturada En Un Suelo Sujeto a Prácticas de Conservación: Implicaciones En La Gestión de Acuíferos y Adaptación al Cambio Climático, n.d.)

(UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL CORRELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES GEOMECÁNICAS COHESIÓN (C) Y ÁNGULO DE FRICCIÓN (ϕ) OBTENIDOS CON ENSAYOS TRIAXIALES UU Y LOS PARÁMETROS DE RESISTENCIA DEL CPT (FS y QC), n.d.)

(UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL CORRELACIÓN ENTRE EL ENSAYO PRESIOMÉTRICO Y LOS PARÁMETROS COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN UTILIZANDO LA TEORÍA DE TERZAGHI Y EL MÉTODO PROPUESTO POR EL EUROCÓDIGO 7 PARA EL CÁLCULO DE DETERMINACIÓN DE CARGA ÚLTIMA DEL SUELO, n.d.)

(Determinación de Parámetros Para Los Modelos Elastoplásticos Mohr-Coulomb y Hardening Soil En Suelos Arcillosos, n.d.)

(UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL VALORACIÓN ECONÓMICA DE BIENES ECOSISTÉMICOS DEL BOSQUE PROTECTOR AGUARONGO, PROVINCIA DEL AZUAY, n.d.)

(ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS HOJA 1 DE 83 DETERMINACION DEL VAE DEL RUBRO CANTIDAD A TARIFA B COSTO HORA $C=AxB$ RENDIMIENTO R COSTO $D=CxR$ Peso Relativo Elemento (%) CPC Elemento NP / EP / ND VAE (%), n.d.)

(UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE CUENCA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL CORRELACIÓN ENTRE EL ENSAYO PRESIOMÉTRICO Y LOS PARÁMETROS COHESIÓN Y ÁNGULO DE FRICCIÓN UTILIZANDO LA TEORÍA DE TERZAGHI Y EL MÉTODO PROPUESTO POR EL EUROCÓDIGO 7 PARA EL CÁLCULO ..., n.d.)

(MECANICA DE SUELOS - Eulalio Juárez Badillo - Google Libros, n.d.)

(CLASIFICACIÓN DEL SUELO CLASIFICACIÓN DEL SUELO, n.d.)

(Smith, S. V., & Brown, S. (2019). PhD by Published Work Is It Time to Clarify and Tighten-Up the Ground Rules Association of National Teaching Fellows. - References - Scientific Research Publishing, n.d.)

(Vista de Análisis Comparativo de Las Técnicas de Laboratorio Para Determinar Los Límites de Atterberg En Suelos de La Ciudad de Oruro – Bolivia, n.d.)

(Caracterización Dinámica De Suelos & Estudio De La Respuesta De Sitio, n.d.)

(Informe Ensayo Triaxial - Ingeniería Geotécnica (Ciclo VII 2021) - Studocu, n.d.)

17. Anexos

A continuación, se presentan imágenes que muestran el proceso que se llevó a cabo para realizar cada una de las muestras.

Figura 41

Proceso de mezclado en seco de cada muestra.



Nota. Se pesó cada proporción correspondiente a su dosificación y se mezcló en seco como se aprecia en la imagen. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

Figura 42

Armado de la muestra dentro de la celda.



Nota. Se armó dentro de la celda para facilitar el proceso de saturación, como se aprecia, se ocupó el molde para posterior a la compactación en el armado, sacarlo. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

Figura 43

Llenado de la mezcla en seco dentro del molde.



Nota. El proceso de llenado se llevó a cabo procurando que ingresaran los 170 gramos previstos, cautelando que no caiga ningún gramo. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

Figura 44

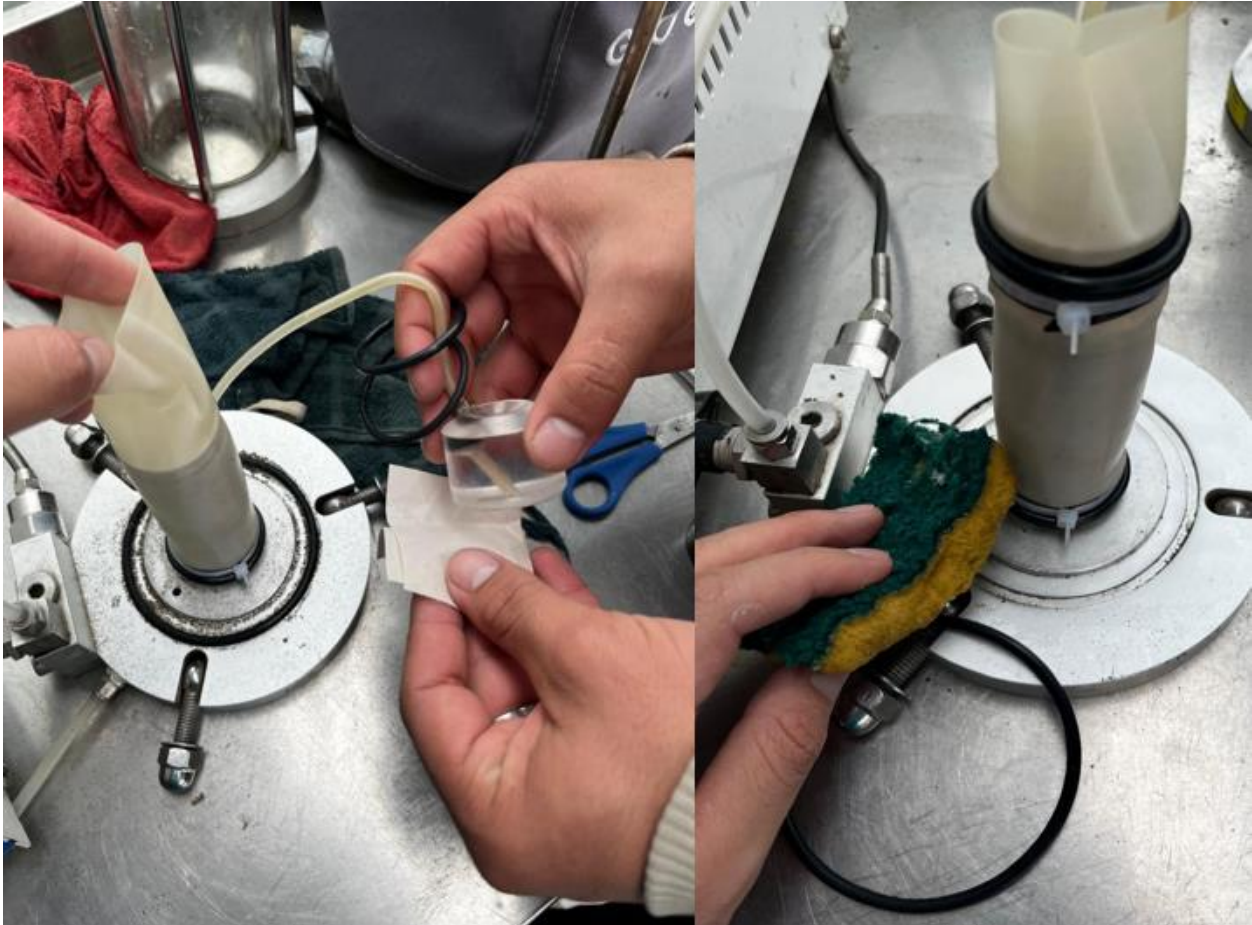
Compactado de las muestras.



Nota. La compactación del material fue crucial, se realizó con 6 capas de 25 golpes. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

Figura 45

Papel filtro y dos anillos de sellado.



Nota. Además de los anillos, se optó por ensamblar la muestra mediante bridas o amarres plásticos. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

Figura 46

Plano de falla.



Nota. Se observa el plano de falla que presentaron en común todas las muestras. Fuente: Geo & Geo Cía. Ltda. (2026).

Tabla 6*Cronograma de actividades.*

<i>Tiempo</i> <i>Actividad</i>	<i>Mes 1</i>				<i>Mes 2</i>				<i>Mes 3</i>				<i>Mes 4</i>			
	<i>S</i> <i>1</i>	<i>S</i> <i>2</i>	<i>S</i> <i>3</i>	<i>S</i> <i>4</i>	<i>S</i> <i>1</i>	<i>S</i> <i>2</i>	<i>S</i> <i>3</i>	<i>S</i> <i>4</i>	<i>S</i> <i>1</i>	<i>S</i> <i>2</i>	<i>S</i> <i>3</i>	<i>S</i> <i>4</i>	<i>S</i> <i>1</i>	<i>S</i> <i>2</i>	<i>S</i> <i>3</i>	<i>S</i> <i>4</i>
Tomar muestras del material de la zona de Cuenca	X															
Preparar las muestras acordes a la norma		X														
Evaluar con el ensayo triaxial las variables de cohesión y ángulo de fricción			X	X	X											
Analizar los resultados correspondientes al ángulo de fricción y cohesión						X	X									
Revisión y correcciones informe de investigación								X	X							
Adaptación formato artículo científico /										X	X					
Informe final												X	X			

Nota. Cronograma de actividades correspondientes a la investigación elaborada. Fuente:

Elaborado por los autores