



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**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**

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

AUTORES: MARCO ANDRÉS MARQUINA MENDOZA
JUSTIN FERNANDO PULLA MOROCHO

TUTOR: ING. ALFREDO VLADIMIR VÁZQUEZ ROURA, MSc.

Cuenca - Ecuador

2025

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Marco Andrés Marquina Mendoza con documento de identificación N° 0107618142 y Justin Fernando Pulla Morocho con documento de identificación N° 0302518568; 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, 25 de julio del 2025

Atentamente,



Marco Andrés Marquina Mendoza

0107618142



Justin Fernando Pulla Morocho

0302518568

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

Nosotros, Marco Andrés Marquina Mendoza con documento de identificación N° 0107618142 y Justin Fernando Pulla Morocho con documento de identificación N° 0302518568, 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 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”, 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, 25 de julio del 2025

Atentamente,

Marco Andrés Marquina Mendoza

0107618142

Justin Fernando Pulla Morocho

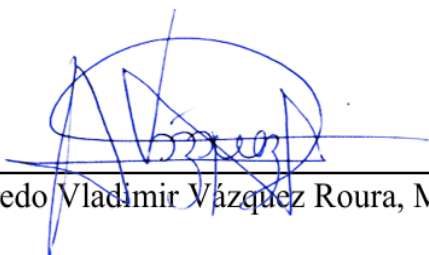
0302518568

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 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, realizado por Marco Andrés Marquina Mendoza con documento de identificación N° 0107618142 y por Justin Fernando Pulla Morocho con documento de identificación N° 0302518568, 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, 25 de julio del 2025

Atentamente,



Ing. Alfredo Vladimir Vázquez Roura, MSc.

0103464103

DEDICATORIA

A mis padres Guillermo y Mercedes, por ser el pilar incondicional que ha sostenido cada uno de mis pasos. Su esfuerzo, paciencia y amor han sido el motor que me impulsó a culminar este camino.

A mis hermanos: José, Carlos y Dayanna, por su cariño, sus palabras de aliento, y por recordarme siempre de dónde vengo y hacia dónde voy. Cada uno de ustedes forma parte de este logro.

Y principalmente a Dios por regalarme la fe cuando flaqueaba, la calma cuando todo apretaba, y el camino cuando parecía no haberlo.

Con gratitud profunda, este trabajo también les pertenece.

Marco Andrés Marquina Mendoza

DEDICATORIA

A mis padres, Alexandra Morocho y Marcelo Pulla, por ser el pilar fundamental en cada paso de mi vida.

Gracias por su amor incondicional, por enseñarme con el ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia, y por brindarme siempre su apoyo, incluso en los momentos más difíciles. Esta meta alcanzada también es suya.

Justin Fernando Pulla Morocho

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por ser el faro que ha iluminado cada paso de mi vida, dándome fuerza en los momentos difíciles y permitiéndome compartir este camino con quienes más amo. A mi familia, por su amor incondicional, su apoyo silencioso y por ser mi motivación constante.

Un agradecimiento muy especial al Ing. Alfredo Vladimir Vázquez Roura, quien no solo me brindó la oportunidad de aprender y desarrollarme en el campo de la geotecnia dentro de su empresa, sino que también me acompañó como tutor académico a lo largo de este proceso. Su guía, compromiso y generosidad al compartir sus conocimientos dejaron una huella significativa en mi formación profesional y en la culminación exitosa de esta tesis.

Marco Andrés Marquina Mendoza

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi docente tutor el Ing. Alfredo Vladimir Vázquez Roura por su valiosa guía, dedicación y acompañamiento a lo largo del desarrollo de esta tesis.

Su compromiso, orientación académica y disposición constante han sido fundamentales para llevar a buen término este trabajo.

Gracias por compartir su conocimiento y por impulsar mi crecimiento profesional y personal durante este proceso.

Justin Fernando Pulla Morocho

Índice

<u>DEDICATORIA</u>	IV
<u>DEDICATORIA</u>	V
<u>AGRADECIMIENTOS</u>	VI
<u>AGRADECIMIENTOS</u>	VI

Índice	VII
Índice Figuras.....	XI
Índice Tablas.....	XVI
Índice Anexo A	XVI
Índice Anexo B	XVI
Índice Tablas Anexo B	XVII
1. Título del trabajo de titulación	1
2. Resumen.....	2
3. Abstract.....	3
4. Antecedentes	4
5. Problema de estudio.....	7
6. Justificación	8
7. Objetivos.....	9
7.1 Objetivo General.....	9
7.2 Objetivo Específicos	9
8. Hipótesis y Supuestos	10
8.1 Hipótesis.....	10
8.2 Supuestos.....	11
9. Marco Teórico	12
9.1 Fundamentos Teóricos sobre la Resistencia al Corte en Suelos	

9.2	El comportamiento no drenado de las arenas arcillosas en compresión y extensión triaxial.....	12
9.3	Efectos de la arcilla y el contenido de humedad en los ensayos de cizallamiento directo para mezclas de arcilla y arena.....	13
9.4	Influencia de la Arcilla en el Comportamiento Mecánico de Mezclas Arena–Arcilla	13
9.5	Compresión triaxial de mezclas de arena y finos a bajas presiones de confinamiento	14
9.6	Formación y Composición de los suelos.....	14
9.7	Comportamiento Cíclico de Suelos Mixtos con Contenido de Finos Cohesivos	14
9.8	Influencia del Contenido de Humedad y la Compactación en Suelos No Saturados	15
9.9	Clasificación de suelos y sus características	15
9.10	Propiedades físicas: humedad.....	17
9.11	Cohesión.....	18
9.12	Ángulo de Fricción	19
9.13	Ensayo Triaxial No Consolidado No Drenado (UU).....	20
9.14	Teoría de la resistencia al corte: Mohr Coulomb.....	20
10.	Metodología.....	21
10.1	Tipo y enfoque de investigación.....	21
10.2	Materiales utilizados	21

10.2.1.	Arcilla bentonita.....	21
10.2.2.	Arena	22
10.2.3.	Celda triaxial de acrílico con puerto lateral.....	23
10.2.4.	Molde metálico para conformado de muestra.....	24
10.2.5.	Membrana de látex	25
10.2.6.	Filtros porosos (discos de papel sinterizado o cerámico).....	26
10.2.7.	Balanza electrónica de precisión.....	27
10.2.8.	Pisoneta metálica de compactación manual	28
10.2.9.	Máquina triaxial controlada por deformación (Strain Controlled Triaxial Tester)	29
11.	Procedimiento.....	30
11.1.1.	Proporciones de mezcla.....	30
11.1.2.	Preparación de las muestras.....	32
11.1.3.	Ejecución del ensayo triaxial UU.....	34
11.1.4.	Procesamiento y análisis de resultados	35
12.	Resultados preliminares: elección de la fracción de arena.....	37
12.1	Resultados preliminares: arena que pasa el tamiz N.º 40.....	37
12.2	Resultados preliminares: arena que se retiene en el tamiz N.º 40.....	42
12.3	Comparación entre fracciones y selección del material granular	46
13.	Composición de mezclas remoldeadas	47
13.1	Mezcla 100% arcilla – 0% arena – 45% humedad	47
13.2	Mezcla 80% arcilla – 20% arena – 45% humedad	52

13.3	Mezcla 60% arcilla – 40% arena – 45% humedad	57
13.4	Mezcla 50% arcilla – 50% arena – 45% humedad	62
13.5	Mezcla 40% arcilla – 60% arena – 45% humedad	67
13.6	Mezcla 20% arcilla – 80% arena – 45% humedad	72
13.7	Mezcla 0% arcilla – 100% arena – 8% humedad	77
13.8	Análisis.....	83
14.	Discusión de resultados.....	88
15.	Cronograma de actividades a desarrollar	90
16.	Presupuesto.....	91
17.	Conclusiones.....	92
18.	Recomendaciones	94
19.	Referencias	96
20.	Anexo A	98
21.	Anexo B	102

Índice Figuras

Figura 1	<i>Celda triaxial de acrílico con puesto lateral.</i>	23
Figura 2	<i>Molde metálico.</i>	24

Figura 3 <i>Membrana de látex.</i>	25
Figura 4 <i>Filtros Porosos.</i>	26
Figura 5 <i>Balanza electrónica.</i>	27
Figura 6 <i>Pisoneta.</i>	28
Figura 7 <i>Máquina Triaxial.</i>	29
Figura 8 <i>Muestra 1 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - Arena que pasa el Tamiz N.º 40.</i>	37
Figura 9 <i>Muestra 1 - Curva Esfuerzo-Deformación - Arena que pasa el Tamiz N.º 40.</i>	38
Figura 10 <i>Ensayo triaxial - Muestra 1 conformada por: arena - Carga 50 kPa.</i>	39
Figura 11 <i>Ensayo triaxial - Muestra 2 conformada por: arena - Carga 100 kPa.</i>	40
Figura 12 <i>Ensayo triaxial - Muestra 3 conformada por: arena - Carga 100 kPa.</i>	41
Figura 13 <i>Muestra 2 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - Arena retenida en el Tamiz N.º 40.</i>	42
Figura 14 <i>Muestra 2 - Curva Esfuerzo-Deformación - Arena retenida en el Tamiz N.º 40.</i>	43
Figura 15 <i>Ensayo triaxial - Muestra 2 conformada por: arena - Carga 50 kPa.</i>	44
Figura 16 <i>Ensayo triaxial - Muestra 2 conformada por: arena - Carga 100 kPa.</i>	45
Figura 17 <i>Ensayo triaxial - Muestra 2 conformada por: arena - Carga 200 kPa.</i>	45

Figura 18 Mezcla 1 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - 100% Arcilla – 0% Arena.....	47
Figura 19 Mezcla 1 - Curva Esfuerzo-Deformación - 100% Arcilla – 0% Arena.....	48
Figura 20 Ensayo triaxial – Muestra conformada por: 100% Arcilla - Carga 50 kPa.....	49
Figura 21 Ensayo triaxial - Muestra 100% Arcilla - Carga 100 kPa.....	50
Figura 22 Ensayo triaxial – Muestra conformada por: 100% Arcilla - Carga 200 kPa.....	51
Figura 23 Mezcla 2 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - 80% Arcilla - 20% Arena.....	52
Figura 24 Mezcla 2 - Curva Esfuerzo-Deformación - 80% Arcilla - 20% Arena.....	53
Figura 25 Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 80% Arcilla - 20% Arena - Carga 50 kPa.....	54
Figura 26 Ensayo triaxial – Muestra conformada por: 80% Arcilla - 20% Arena - Carga 100 kPa.....	55
Figura 27 Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 80% Arcilla - 20% Arena - Carga 200 kPa.....	56
Figura 28 Mezcla 3 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - 60% Arcilla - 40% Arena.....	57
Figura 29 Mezcla 3 - Curva Esfuerzo-Deformación - 60% Arcilla - 40% Arena.....	58
Figura 30 Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 60% Arcilla - 40% Arena - Carga 50 kPa.....	59

Figura 31 <i>Ensayo triaxial - Muestra 60% Arcilla - 40% Arena - Carga 100 kPa.</i>	60
Figura 32 <i>Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 60% Arcilla - 40% Arena - Carga 200 kPa.</i>	61
Figura 33 <i>Mezcla 4 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - 50% Arcilla - 50% Arena.</i>	62
Figura 34 <i>Mezcla 4 - Curva Esfuerzo-Deformación - 50% Arcilla - 50% Arena.</i>	63
Figura 35 <i>Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 50% Arcilla - 50% Arena - Carga 50 kPa.</i>	64
Figura 36 <i>Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 50% Arcilla - 50% Arena - Carga 100 kPa.</i>	65
Figura 37 <i>Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 50% Arcilla - 50% Arena - Carga 200 kPa.</i>	66
Figura 38 <i>Mezcla 5 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - 40% Arcilla - 60% Arena.</i>	67
Figura 39 <i>Mezcla 5 - Curva Esfuerzo-Deformación - 40% Arcilla - 60% Arena.</i>	68
Figura 40 <i>Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 40% Arcilla - 60% Arena - Carga 50 kPa.</i>	69
Figura 41 <i>Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 40% Arcilla - 60% Arena - Carga 100 kPa.</i>	70
Figura 42 <i>Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 40% Arcilla - 60% Arena - Carga 200 kPa.</i>	71

Figura 43 Mezcla 6 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - 20% Arcilla - 80% Arena.....	72
Figura 44 Mezcla 5 - Curva Esfuerzo-Deformación - 20% Arcilla - 80% Arena.....	73
Figura 45 Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 20% Arcilla - 80% Arena - Carga 50 kPa.....	74
Figura 46 Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 20% Arcilla - 80% Arena - Carga 100 kPa.....	75
Figura 47 Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 20% Arcilla - 80% Arena - Carga 200 kPa.....	76
Figura 48 Mezcla de arena con 45% de contenido de agua durante la preparación.	77
Figura 49 Mezcla 7 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - 0% Arcilla - 100% Arena.....	78
Figura 50 Mezcla 7 - Curva Esfuerzo-Deformación - 0% Arcilla - 100% Arena.....	79
Figura 51 Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 0% Arcilla - 100% Arena - Carga 50 kPa.....	80
Figura 52 Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 0% Arcilla - 100% Arena - Carga 100 kPa.....	81
Figura 53 Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 0% Arcilla - 100% Arena - Carga 200 kPa.....	82
Figura 54 Comparación de criterios de falla de Mohr coulomb, para cada una de las muestras.	84
Figura 55 Relación entre el porcentaje de arena y la cohesión (C).	85

Figura 56 *Relación entre el porcentaje de arena y el ángulo de fricción (ϕ)...* 86

Índice Tablas

Tabla 1 <i>Porcentajes de arena y arcilla para la elaboración de muestras remoldeadas</i>	31
Tabla 2 <i>Tabla comparativa para la elección del mejor material.</i>	46
Tabla 3 <i>Tabla de resultados obtenidos.</i>	83
Tabla 4 <i>Presupuesto</i>	91

Índice Anexo A

Figura A 1 <i>Preparación del material de arcilla bentonita para su homogenización previa al ensayo triaxial.</i>	98
Figura A 2 <i>Ingreso del suelo remoldeado al molde cilíndrico mediante embudo y papel cónico.</i>	99
Figura A 3 <i>Vertido del suelo previamente mezclado en el molde de compactación.</i>	99
Figura A 4 <i>Montaje de la muestra remoldeada dentro del equipo triaxial.</i>	100
Figura A 5 <i>Muestra instalada dentro de la celda triaxial antes de iniciar el ensayo.</i>	101

Índice Anexo B

Figura B 1 <i>Fragmento del registro de datos obtenidos en el ensayo triaxial UU</i> – <i>Muestra: Arena retenida, carga de 50 kPa.</i>	103
Figura B 2 <i>Fragmento del registro de datos obtenidos en el ensayo triaxial UU</i> – <i>Muestra: Arena retenida, carga de 100 kPa.</i>	104

Figura B 3 <i>Fragmento del registro de datos obtenidos en el ensayo triaxial UU – Muestra: Arena retenida, carga de 200 kPa.</i>	105
--	-----

Índice Tablas Anexo B

Tabla B 1 <i>Resultados finales del ensayo triaxial UU – Arena retenida N40 ($\sigma_3 = 50, 100$ y 200 kPa)</i>	106
Tabla B 2 <i>Esfuerzos normales y cortantes calculados para los tres niveles de carga en el ensayo triaxial UU– Arena retenida N.º40.</i>	107
Tabla B 3 <i>Resultados finales del ensayo triaxial UU – Arena que pasa el tamiz N.º 40 ($\sigma_3 = 50, 100$ y 200 kPa).</i>	108
Tabla B 4 <i>Esfuerzos normales y cortantes calculados – Arena que pasa el tamiz N.º 40 ($\sigma_3 = 50, 100$ y 200 kPa).</i>	109
Tabla B 5 <i>Resultados finales del ensayo triaxial UU – Muestra 100 % arcilla ($\sigma_3 = 50, 100$ y 200 kPa).</i>	110
Tabla B 6 <i>Esfuerzos normales y cortantes calculados – Muestra 100 % arcilla ($\sigma_3 = 50, 100$ y 200 kPa).</i>	111
Tabla B 7 <i>Resultados finales del ensayo triaxial UU – Mezcla 80 % arcilla y 20 % arena ($\sigma_3 = 50, 100$ y 200 kPa).</i>	112
Tabla B 8 <i>Esfuerzos normales y cortantes obtenidos en el ensayo triaxial UU – Mezcla 80 % arcilla y 20 % arena.</i>	113
Tabla B 9 <i>Resultados finales obtenidos del ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU) para la mezcla 60 % arcilla – 40 % arena.</i>	114
Tabla B 10 <i>Esfuerzos normales y cortantes obtenidos en el ensayo triaxial UU para la mezcla 60 % arcilla – 40 % arena.</i>	115

Tabla B 11 <i>Resultados finales obtenidos del ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU) para la mezcla 50 % arcilla – 50 % arena.</i>	116
Tabla B 12 <i>Datos iniciales del ensayo triaxial UU para la mezcla 50 % arcilla – 50 % arena.....</i>	117
Tabla B 13 <i>Resultados finales obtenidos del ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU) para la mezcla 40 % arcilla – 60 % arena.</i>	118
Tabla B 14 <i>Valores de esfuerzo normal y cortante obtenidos para la mezcla 40 % arcilla – 60 % arena.</i>	119
Tabla B 15 <i>Resultados finales obtenidos del ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU) para la mezcla 20 % arcilla – 80 % arena.</i>	120
Tabla B 16 <i>Valores de esfuerzo normal y cortante obtenidos para la mezcla 20 % arcilla – 80 % arena.</i>	121
Tabla B 17 <i>Resultados finales obtenidos del ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU) para la muestra de arena al 100 % con 8 % de humedad.</i>	122
Tabla B 18 <i>Esfuerzos normales y cortantes obtenidos del ensayo triaxial no consolidado no drenado para muestra 100 % arena con 8 % de humedad.....</i>	123

1. Título del trabajo 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

2. Resumen

El presente trabajo de investigación se desarrolla como parte del proceso de titulación y tiene como finalidad analizar la relación entre los parámetros de cohesión (C) y ángulo de fricción (ϕ), en función de la variación porcentual de arena y arcilla en muestras remoldeadas. Para ello, se aplicó el ensayo triaxial no consolidado–no drenado (UU), conforme a los lineamientos establecidos por la norma ASTM D2850, bajo condiciones controladas de laboratorio.

La investigación se enmarca en el contexto geotécnico del cantón Cuenca, donde la composición heterogénea de los suelos requiere una caracterización experimental precisa para una correcta interpretación de su comportamiento. En ese sentido, se elaboraron diferentes mezclas de arena y arcilla, incluyendo muestras puras y proporciones intermedias; todas con un control específico de humedad en función de su tipo.

Las muestras fueron remoldeadas, compactadas y sometidas al ensayo triaxial bajo condiciones no drenadas. Posteriormente, se registraron los esfuerzos principales con el objetivo de construir los círculos de Mohr y evaluar el comportamiento mecánico de cada combinación. Esta metodología permitió establecer una base experimental sólida que servirá como referencia técnica en el análisis de suelos de características similares para futuras aplicaciones en el ámbito de la ingeniería geotécnica.

Además, el desarrollo de este estudio busca aportar criterios objetivos que respalden la toma de decisiones en proyectos de infraestructura, especialmente en contextos donde la presencia de suelos mixtos puede comprometer la estabilidad y eficiencia de cimentaciones (superficiales o profundas). La documentación detallada del procedimiento permitirá replicar el análisis en distintas regiones con condiciones geológicas comparables.

Palabras clave: ensayo triaxial UU, cohesión, ángulo de fricción, suelos remoldeados, arena, arcilla, ingeniería geotécnica, caracterización mecánica.

3. Abstract

The present research work is developed as part of the titration process and aims to analyze the relationship between the cohesion parameters (C) and friction angle (ϕ), as a function of the percentage variation of sand and clay in remolded samples. For this purpose, the unconsolidated-undrained triaxial test (UU) was applied, according to the guidelines established by the ASTM D2850 standard, under controlled laboratory conditions.

The research is framed in the geotechnical context of the Cuenca canton, where the heterogeneous composition of soils requires an accurate experimental characterization for a correct interpretation of their behavior. In that sense, different mixtures of sand and clay were elaborated, including pure samples and intermediate proportions; all with a specific moisture control according to their type.

The samples were remolded, compacted and subjected to the triaxial test under undrained conditions. Subsequently, the principal stresses were recorded with the objective of constructing Mohr circles and evaluating the mechanical behavior of each combination. This methodology allowed establishing a solid experimental basis that will serve as a technical reference in the analysis of soils with similar characteristics for future applications in the field of geotechnical engineering.

In addition, the development of this study seeks to provide objective criteria to support decision-making in infrastructure projects, especially in contexts where the presence of mixed soils can compromise the stability and efficiency of foundations (shallow or deep). Detailed documentation of the procedure will allow replication of the analysis in different regions with comparable geological conditions.

Key words: UU triaxial test, cohesion, friction angle, remolded soils, sand, clay, geotechnical engineering, mechanical characterization.

4. Antecedentes

La región de Cuenca está formada por sedimentos aluviales del Terciario y Cuaternario, compuestos por arenas, limos y arcillas, que han sido transportados por el agua con el tiempo. Estos suelos pueden ser más blandos y cambiar sus propiedades según la humedad, lo que influye en su estabilidad para la construcción.

En las colinas predominan los depósitos coluviales. Sin embargo, en ambos tipos de depósitos están presentes las arcillas y arenas; por lo tanto, los parámetros de cohesión y ángulo de fricción varían significativamente, y, por lo tanto, el comportamiento de los suelos también varía.

La resistencia y deformabilidad del suelo influye en la respuesta sísmica de edificaciones y en la estabilidad de infraestructuras, como se ha evidenciado en estudios de estabilización de suelos en Cuenca y Quito. En particular, los suelos con alto contenido de arcilla pueden mostrar un comportamiento expansivo, mientras que los suelos con mayor proporción de arena tienden a compactarse mejor, lo que influye directamente en su capacidad portante y en su comportamiento frente a cargas. Esto hace que el análisis de sus propiedades sea fundamental para evitar fallas de cimentaciones o falla de taludes en zonas de crecimiento urbano.

El crecimiento urbano de Cuenca, Ecuador, está directamente vinculado a su expansión hacia zonas con suelos heterogéneos, incluyendo áreas aluviales y coluviales. Según el (Gad Municipal de Cuenca, 2022), el 34% del suelo urbano actual se clasifica como "rural de expansión", destinado a absorber el crecimiento demográfico y la demanda de viviendas e infraestructura, lo que exige planes parciales para garantizar servicios públicos y estabilidad geotécnica antes de su urbanización (Gad Municipal de Cuenca, 2022).

En este contexto, el crecimiento urbano de Cuenca ha impulsado una mayor demanda de construcciones residenciales, comerciales y de obras vinculadas al desarrollo de infraestructura, lo que hace imprescindible realizar estudios geotécnicos detallados para garantizar la estabilidad de las edificaciones. La heterogeneidad del suelo en el cantón Cuenca puede representar un riesgo

significativo para las estructuras, donde los parámetros de resistencia del suelo, como la cohesión (C) y el ángulo de fricción (ϕ), son fundamentales para determinar la seguridad de cimentaciones, taludes y muros.

El suelo rural de expansión urbana se define como aquel previsto para el crecimiento futuro de la ciudad, requiriendo procesos de planificación y gestión que mejoren sus condiciones y permitan prever los sistemas públicos de soporte en cumplimiento de los estándares urbanísticos necesarios antes de su consolidación. Su desarrollo debe realizarse mediante la elaboración de planes parciales que definan los instrumentos de gestión para su crecimiento (PDOT PUGS 2022 | GAD Municipal de Cuenca, Anexo 3.1, pág.92.).

En Cuenca, Ecuador, la variabilidad de los suelos es notable debido a la presencia de varios ríos y las condiciones geológicas del área. Esta diversidad genera suelos con distintas proporciones de arena y arcilla, lo que influye directamente en sus propiedades mecánicas, especialmente en su resistencia. Los suelos con mayor contenido de arcilla presentan una mayor cohesión, mientras que los suelos arenosos tienen una menor cohesión, pero un mayor ángulo de fricción.

Según estudios previos realizados en Chaullabamba y Miraflores, se ha identificado que los suelos en estos sectores presentan un alto porcentaje de partículas finas y arcilla. Chaullabamba, en particular, contiene un 77.2% de partículas finas y un 37.6% de arcilla, lo que permite clasificarlo como grava arcillosa según AASHTO y como arcilla de alta plasticidad conforme a SUCS. Los análisis de límites de Atterberg indicaron que este suelo posee un límite líquido del 72.35%, un límite plástico del 30.97% y un índice de plasticidad de 41.38%, lo que lo caracteriza como un suelo con alta capacidad de retención de agua y propenso a cambios volumétricos (Campoverde Zeas, 2024).

En la ingeniería civil, la resistencia del suelo es un factor determinante en el diseño de cimentaciones, muros de contención y estabilidad de taludes. La cohesión (C) se refiere a la capacidad del suelo de mantenerse unido debido a fuerzas intermoleculares y a la presencia de partículas finas,

mientras que el ángulo de fricción (ϕ) mide la resistencia al deslizamiento entre partículas, siendo mayor en suelos arenosos.

En estudios previos realizados en Quito, se han llevado a cabo ensayos triaxiales UU (no consolidado-no drenado) en suelos con características similares. Estos ensayos han permitido establecer correlaciones entre el módulo de elasticidad y los parámetros de resistencia del suelo, como la cohesión (C) y el ángulo de fricción (ϕ). Los resultados han demostrado que la relación entre cohesión (C) y el ángulo de fricción (ϕ) varía significativamente dependiendo de la composición del suelo, lo que resalta la importancia de realizar un análisis detallado en la zona de estudio.

Según (Maturrano Vilchez & Rojas Medina, 2022) estudios previos han evidenciado que la combinación de estos parámetros la cohesión (C) y el ángulo de fricción (ϕ); puede influir directamente en la capacidad portante del suelo, determinando la viabilidad de las cimentaciones y su comportamiento bajo cargas estáticas y dinámicas.

Investigaciones en otras regiones con suelos similares han reportado valores específicos de cohesión (C) y ángulo de fricción (ϕ) según el tipo de suelo. Un estudio en Puente Piedra -Lima encontró que, para suelos granulares, el ensayo triaxial UU arrojó una cohesión (C) promedio de 11.97 kPa y un ángulo de fricción (ϕ) de 28.77°, mientras que en suelos finos la cohesión (C) fue de 57.7 kPa y el ángulo de fricción (ϕ) disminuyó a 17.37° (Maturrano Vilchez & Rojas Medina, 2022). Esto confirma que la cohesión aumenta en suelos con mayor contenido de finos, pero el ángulo de fricción tiende a ser menor en comparación con los suelos más arenosos.

En Cuenca, estudios sobre suelos expansivos han demostrado que la alta plasticidad de ciertas arcillas puede generar variaciones significativas en la cohesión (C) y el ángulo de fricción (ϕ). Se ha determinado que el suelo de Chaullabamba contiene un 37.6% de arcilla y un 77.2% de finos, lo que lo clasifica como una arcilla de alta plasticidad con tendencia a la expansión (Campoverde Zeas, 2024).

Además, en un estudio sobre arena arcillosa en Bucaramanga, se realizó una comparación entre el ensayo triaxial y el ensayo de corte directo. Se encontró que el triaxial tendía a mostrar valores más

altos de cohesión (C), mientras que el corte directo reflejaba un ángulo de fricción (ϕ) levemente superior. Esta diferencia se debe a que el ensayo triaxial permite evaluar el suelo en condiciones de confinamiento, mientras que el corte directo lo hace en una condición más controlada pero menos representativa de esfuerzos tridimensionales (Peña Rojas & Pérez Ballen, 2012).

El presente estudio se centrará en la elaboración de muestras remoldadas, utilizando arcilla y arena fina. Esto permitirá controlar con precisión la proporción de arena y arcilla en cada ensayo, asegurando que los resultados reflejen de manera más precisa la influencia de estos componentes en la cohesión (C) y el ángulo de fricción (ϕ). El uso de muestras remoldeadas resulta especialmente útil para evaluar suelos en escenarios de compactación artificial o en terrenos que han sido alterados por actividades constructivas. Además, permite analizar cómo la modificación en la composición del suelo afecta sus parámetros de resistencia, proporcionando información valiosa para mejorar el diseño de cimentaciones y prevenir fallas en edificaciones en las zonas de Cuenca.

Por ello, el presente trabajo contribuirá al conocimiento geotécnico, proporcionando datos cuantitativos y correlaciones que servirán de base para futuras investigaciones y aplicaciones en ingeniería geotécnica.

5. Problema de estudio

Determinar cómo influye la variación en la proporción de arena y arcilla en muestras remoldeadas sobre los parámetros de cohesión y ángulo de fricción, a través del ensayo triaxial (UU), en suelos representativos del cantón Cuenca, provincia del Azuay.

6. Justificación

Esta investigación nace de la necesidad de comprender con mayor precisión cómo influye la variación en la proporción de arena y arcilla sobre los parámetros de resistencia al corte de suelos remoldeados. En contexto como en el cantón Cuenca, donde hay suelos con composiciones heterogéneas, no siempre es posible aplicar criterios de diseño geotécnico generalizado.

La resistencia al corte del suelo, expresada a través de la cohesión y en ángulo de fricción, depende directamente de la estructura o composición del material y a su vez de los esfuerzos. Al elaborar muestras de mezclas controladas de arena y arcilla y someterlas al ensayo triaxial (UU), se simula situaciones reales de carga, en donde nos muestran parámetros más acercados a la realidad sobre los materiales que se están tomando en cuenta.

Esta investigación busca generar datos reales que se puedan aplicar al diseño geotécnico, optimizando de esta manera la toma de decisiones. Además, fortalece la comprensión técnica sobre cómo interactúan los componentes del suelo en condiciones no drenadas.

7. Objetivos

7.1 Objetivo General

Analizar la influencia de diferentes proporciones de arena y arcilla en los parámetros de cohesión y ángulo de fricción de suelos remoldeados, mediante la aplicación del ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU).

7.2 Objetivo Específicos

- Preparar muestras remoldeadas con diferentes proporciones de arena y arcilla bajo condiciones controladas.
- Explorar la influencia del contenido de humedad en la variación de los parámetros de cohesión y ángulo de fricción en muestras remoldeadas.
- Aplicar el ensayo triaxial UU a cada una de las mezclas y registrar los esfuerzos de falla para cada combinación de material.
- Establecer la relación entre el contenido relativo de arena y arcilla y los parámetros de resistencia al corte, con el fin de generar criterios técnicos útiles para el diseño geotécnico.

8. Hipótesis y Supuestos

8.1 Hipótesis

El propósito de este proyecto se fundamenta en la hipótesis de que la variación en la porción de arena y arcilla dentro de una muestra remoldeada influye directamente en los parámetros de resistencia de corte del suelo, específicamente en la cohesión (C) y el ángulo de fricción (ϕ). Esta relación se basa en los principios fundamentales de la geotecnia, los cuales establecen que la composición granulométrica y la plasticidad de los suelos influyen directamente en su resistencia y estabilidad. Es decir, las arcillas y arenas, cuando estas no son debidamente caracterizadas, pueden presentar comportamientos como es de estabilidad y resistencia: las arcillas por su alta plasticidad y cambios volumétricos, y las arenas por su baja cohesión.

De esta manera, surge la necesidad de establecer parámetros propios que permitan entender cómo influye la variación del contenido de arena y arcilla en la resistencia al corte del suelo. Para ello, se elaborarán muestras remoldeadas con proporciones controladas de estos materiales, con el fin de analizar su efecto sobre la cohesión y el ángulo de fricción interna. La aplicación del ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU) permitirá obtener resultados representativos bajo condiciones controladas, generando de esta manera la información más clara y confiable.

Asimismo, se considera que, al modificar la proporción relativa entre arena y arcilla, uno de los dos materiales puede llegar a influir de manera predominante en el comportamiento de la mezcla. Es decir, se espera que la arena, al alcanzar un volumen significativo, impulse una respuesta mecánica más próxima a la de un suelo granular; mientras que, con mayor presencia de arcilla, las características cohesivas comiencen a regir el comportamiento del conjunto. Esta transición permitiría evidenciar cómo la estructura interna del suelo varía en función del material que actúe como dominante, y cómo esa condición afecta directamente los parámetros de resistencia al corte.

8.2 Supuestos

Se asume que las muestras remoldeadas presentan una distribución homogénea de arena y arcilla tras el proceso de mezclado y compactación. Se considera que las propiedades medidas en laboratorio representan adecuadamente el comportamiento de suelos remoldeados preparados en condiciones controladas, similares a las que pueden presentarse naturalmente. Asimismo, se acepta que el contenido de humedad permanece constante durante los ensayos triaxiales (UU) y que los equipos utilizados cumplen con las normas vigentes, asegurando la validez de los resultados. Finalmente, se supone que los materiales empleados están libres de impurezas que puedan alterar las propiedades mecánicas evaluadas.

9. Marco Teórico

9.1 Fundamentos Teóricos sobre la Resistencia al Corte en Suelos Remoldeados

Donghwi & Heejung, 2018, investigaron el efecto del contenido de arcilla sobre la resistencia al corte de mezclas arena–arcilla, utilizando pruebas de corte directo y mediciones del ángulo de reposo. Sus resultados indicaron que, a medida que se incrementa el porcentaje de arcilla, la cohesión tiende a aumentar inicialmente debido a la mayor interacción entre partículas finas; sin embargo, el ángulo de fricción disminuye significativamente, lo que reduce la capacidad de resistencia del material a esfuerzos tangenciales. Esta relación inversa entre cohesión y fricción interna es especialmente relevante en suelos parcialmente saturados o bajo condiciones no drenadas, donde los mecanismos de transferencia de carga se ven modificados por la matriz plástica del material fino.

9.2 El comportamiento no drenado de las arenas arcillosas en compresión y extensión triaxial

Georgiannou, Burland & Hight, 1990 realizaron un estudio experimental sobre el comportamiento no drenado de mezclas arena–arcilla mediante ensayos triaxiales en compresión y extensión. Los resultados mostraron que pequeñas cantidades de finos plásticos pueden tener un impacto significativo en la respuesta mecánica del suelo, alterando su rigidez, capacidad de carga y tendencia a la generación de presiones de poro. Se evidenció que las mezclas con cierto contenido de arcilla desarrollan una resistencia no drenada considerablemente diferente de la de sus componentes puros, debido a la redistribución interna de esfuerzos y a la evolución de la estructura del esqueleto granular. Este trabajo es fundamental para comprender cómo suelos mixtos responden en condiciones de carga rápida, como ocurre en cimentaciones superficiales o eventos sísmicos.

9.3 Efectos de la arcilla y el contenido de humedad en los ensayos de cizallamiento directo para mezclas de arcilla y arena

Dafalla, 2013, analizó cómo la presencia de arcilla y las variaciones en el contenido de humedad influyen directamente en la resistencia al corte de suelos granulares modificados. Mediante ensayos de corte directo, observó que un aumento en la humedad genera una disminución tanto en la cohesión como en el ángulo de fricción, especialmente en mezclas con alto contenido de finos plásticos. Este comportamiento fue atribuido al efecto lubricante del agua sobre los contactos entre partículas, el cual interrumpe la estructura interna del material y favorece su deslizamiento. Estos hallazgos refuerzan la importancia de controlar cuidadosamente el contenido de humedad en estudios donde se analiza el comportamiento mecánico de suelos remoldeados bajo condiciones no drenadas.

9.4 Influencia de la Arcilla en el Comportamiento Mecánico de Mezclas Arena–Arcilla

En su estudio experimental, según (Rathnam & Suresh, 2007), evaluaron el comportamiento de mezclas de arena con diferentes contenidos de arcilla bajo condiciones no drenadas, utilizando ensayos triaxiales. Los resultados mostraron que, a medida que se incrementa la fracción de arcilla, se observa un aumento progresivo en la cohesión del suelo, debido al efecto cementante de las partículas finas. No obstante, este incremento viene acompañado de una reducción en el ángulo de fricción, ya que la matriz granular se ve reemplazada por una estructura más plástica y menos resistente al corte. El autor resalta que estas variaciones afectan directamente el diseño geotécnico de obras cimentadas sobre suelos heterogéneos, donde la presencia de arcilla puede alterar significativamente la respuesta estructural esperada.

9.5 Compresión triaxial de mezclas de arena y finos a bajas presiones de confinamiento

Un estudio reciente sobre mezclas arena–finos realizados por: Ullmann, Schmidt, S & Herle, I; 2025, se enfocó en el comportamiento bajo presiones de confinamiento bajas, utilizando ensayos triaxiales no drenados. Los autores observaron que, al incrementar la proporción de finos plásticos, el material presentó una reducción sustancial en la resistencia al corte y una mayor deformabilidad, especialmente en los primeros ciclos de carga. Asimismo, se reportó que la cohesión aparente se eleva moderadamente, pero el ángulo de fricción disminuye de manera abrupta a medida que se pierde la estructura granular dominante. Este comportamiento resulta crítico en suelos superficiales con compactación deficiente o en zonas con sobre humedad.

9.6 Formación y Composición de los suelos

El suelo es un sistema natural formado por la desintegración de rocas mediante procesos físicos, químicos y biológicos, combinado con materia orgánica en descomposición. Su estructura está compuesta por tres fases: sólida (minerales y materia orgánica), líquida (agua) y gaseosa (aire), las cuales interactúan para definir su comportamiento mecánico (Maturrano Vilchez & Rojas Medina, 2022). Según el (Gad Municipal de Cuenca, 2022), la ciudad de Cuenca presenta una diversidad de suelos generados por procesos volcánicos y aluviales, que se han asentado sobre formaciones antiguas, generando zonas con características geotécnicas particulares.

9.7 Comportamiento Cíclico de Suelos Mixtos con Contenido de Finos Cohesivos

(Jagodnik, V, Marušić, D. Peranić, J. Prodan, M Vivoda & Arbanas, Ž, 2024), investigaron las propiedades cíclicas de mezclas arena–arcilla bajo condiciones de baja presión confinante. A través de ensayos triaxiales cíclicos, se concluyó que el comportamiento de estas mezclas depende en gran

medida del contenido de finos cohesivos y su grado de saturación. En particular, se observó que las muestras con contenido intermedio de arcilla presentaron una pérdida acelerada de rigidez y acumulación de deformaciones plásticas bajo carga repetitiva. Esta tendencia es relevante en contextos sísmicos o de vibración constante, donde las propiedades dinámicas del suelo son determinantes para la estabilidad de estructuras superficiales o subterráneas.

9.8 Influencia del Contenido de Humedad y la Compactación en Suelos No Saturados

Ahmad & Uchimura, 2023, investigaron la influencia del contenido de humedad, tanto en la compactación como en el momento del ensayo, junto con la distribución del tamaño de grano, sobre la resistencia al corte en arenas no saturadas. Con muestras de sílice compactadas a humedad óptima y residual, demostraron que el contenido de humedad durante la compactación tiene un efecto significativo sobre la resistencia al corte final: aquellas muestras compactadas al contenido residual mostraron una mayor resistencia, incluso cuando fueron ensayadas al contenido óptimo. Además, observaron que la incorporación de finos (20 %) altera la densidad seca y el comportamiento mecánico. Estos hallazgos evidencian que, para suelos parcialmente saturados o con mezclas de finos, el control de la humedad en cada etapa del ensayo es crucial para obtener resultados fiables en el diseño geotécnico.

9.9 Clasificación de suelos y sus características

Según (Campoverde Zeas, 2024), la clasificación de suelos es un sistema que permite organizar y describir los diferentes tipos de suelo en función de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas. Su objetivo es facilitar la selección de materiales adecuados para obras civiles y predecir su comportamiento frente a cargas estructurales. Esta clasificación se basa principalmente en el tamaño de partícula, la plasticidad, la permeabilidad y el contenido de finos.

Dentro de los tipos de suelos más comunes se encuentran:

Suelos Granulares: Los suelos granulares están conformados por partículas de mayor tamaño, como gravas y arenas, las cuales no presentan una cohesión significativa entre sí. Debido a los espacios intersticiales existentes entre las partículas, estos materiales permiten un adecuado drenaje, facilitando la circulación de agua y aire. Su resistencia y estabilidad estructural dependen, en gran medida, de su densidad y del grado de compactación alcanzado durante su disposición en campo (Braja M. Das, 2013).

Gravas: Según (Braja M. Das, 2013), las gravas corresponden a partículas de suelo cuyo tamaño oscila entre 2 mm y 76.2mm. Se distinguen por su elevada capacidad de carga y óptimas propiedades de drenaje, características que las hacen adecuadas para su uso en bases y subbases de proyectos de construcción, tales como carreteras y cimentaciones.

Arenas: Las arenas están compuestas por partículas cuyo tamaño varía entre 0.075mm y 2 mm. Al igual que las gravas, presentan adecuadas propiedades de drenaje, lo que las hace aptas para diversas aplicaciones en ingeniería, incluyendo la fabricación de concreto y su uso como material de relleno en obras de construcción (Braja M. Das, 2013).

Suelos Finos: Los suelos Finos están conformados por limos y arcillas, las cuales presentan fuerzas de cohesión significativas debido a su reducido tamaño y a sus propiedades electroquímicas. Estos materiales tienen una alta capacidad de retención de agua y exhiben comportamientos plásticos, factores que pueden influir en su estabilidad y resistencia, especialmente en aplicaciones geotécnicas (Braja M. Das, 2013).

Limos: Los limos corresponden a partículas de suelo cuyo tamaño oscila entre 0.002 mm y 0.075mm. Se caracterizan por su baja plasticidad y su susceptibilidad a la erosión, así como a cambios volumétricos cuando se encuentran saturados, lo que puede comprometer la estabilidad de las estructuras cimentadas sobre ellos (Braja M. Das, 2013).

Arcillas: Las arcillas están conformadas por partículas de tamaño inferior a 0.002 mm y se distinguen por su alta plasticidad y su capacidad para retener agua. Estas pueden experimentar expansiones y contracciones significativas ante variaciones en el contenido de humedad, lo que podría generar problemas en las estructuras si dichas características no se consideran adecuadamente durante las etapas de diseño y construcción (Braja M. Das, 2013).

Entre los sistemas más empleados para clasificar suelos se encuentran el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y el sistema AASHTO. En el SUCS, los suelos se dividen en dos grandes grupos: gruesos (arenas y gravas) y finos (limos y arcillas). Cada grupo se clasifica según el porcentaje que pasa por el tamiz N.º 200 (0.075 mm), y se codifican con letras como G (grava), S (arena), M (limo), C (arcilla), entre otros (Campoverde Zeas, 2024).

Según (Maturrano Vilchez & Rojas Medina, 2022), los suelos gruesos presentan buena capacidad de drenaje y bajo contenido de finos, mientras que los suelos finos tienen mayor cohesión y plasticidad, pero menor capacidad de drenaje y mayor sensibilidad a la humedad.

9.10 Propiedades físicas: humedad

El contenido de humedad en un suelo se refiere a la cantidad de agua presente en los espacios porosos entre las partículas sólidas. Un procedimiento detallado para determinar el contenido de agua en suelos y rocas se lleva a cabo mediante el método gravimétrico, el cual consiste en medir la masa de la muestra antes y después de someterla a un proceso de secado en horno (ASTM D2216, 1998).

El contenido de agua es un factor clave en la evaluación de las propiedades del suelo, ya que influye directamente en su comportamiento mecánico, como la capacidad de carga y la estabilidad. En consecuencia, esta norma se presenta como una herramienta esencial para caracterizar los materiales geotécnicos y asegurar la seguridad y efectividad de las estructuras que utilizan dichos materiales (ASTM D2216, 1998).

La humedad es una propiedad fundamental en el estudio de suelos, ya que afecta directamente su resistencia al corte y su comportamiento volumétrico. Se define como la relación entre el peso del agua contenida en el suelo y el peso seco del mismo. Los suelos finos como las arcillas tienen alta capacidad de retención de humedad, lo que influye en su expansividad y en la disminución de su resistencia cuando están saturados (Maturrano Vilchez & Rojas Medina, 2022).

9.11 Cohesión

La cohesión del suelo es un parámetro fundamental en la geotecnia, lo cual representa la capacidad del suelo para resistir esfuerzos cortantes, este parámetro corresponde al valor de la resistencia al corte cuando el esfuerzo normal es 0. Este valor se obtiene generalmente a partir de los ensayos Triaxiales (UU).

Según (Braja M. Das, 2013), la cohesión es uno de los dos componentes principales de la resistencia al corte en la teoría de Mohr Coulomb.

La cohesión (c) corresponde al valor de resistencia al corte cuando el esfuerzo normal (σ) es cero. Este valor se obtiene generalmente a partir de ensayos como el triaxial UU (no consolidado, no drenado), donde las condiciones no permiten el drenaje del agua durante la carga, y la resistencia observada está dominada por la cohesión (Braja M. Das, 2013).

En suelos arcillosos, la cohesión es alta debido a la naturaleza de las partículas, que son muy pequeñas, con carga superficial y gran capacidad para retener agua. Esta retención genera fuerzas de atracción entre partículas que aumentan la resistencia aparente del material. Sin embargo, este tipo de cohesión también es altamente dependiente de la humedad, lo que implica que un suelo puede volverse inestable si su contenido de agua varía significativamente (Maturrano Vilchez & Rojas Medina, 2022).

En contraste, los suelos granulares como las arenas y gravas presentan muy baja o nula cohesión, ya que su resistencia al corte se debe casi en su totalidad a la fricción entre partículas. Por

esta razón, en mezclas de arena con arcilla, como las utilizadas en esta investigación, la cohesión varía en función del porcentaje de finos presentes, siendo mayor en proporciones elevadas de arcilla (Braja M. Das, 2013).

Entender y cuantificar la cohesión es clave para el diseño geotécnico de cimentaciones, muros de contención y estabilidad de taludes, ya que condiciona la respuesta del suelo frente a cargas y posibles fallas.

9.12 Ángulo de Fricción

El ángulo de fricción interna es un parámetro fundamental en la mecánica de suelos que representa la resistencia al deslizamiento entre partículas sólidas del suelo cuando se aplica una carga. Es uno de los dos componentes principales de la resistencia al corte en la teoría de Mohr-Coulomb, junto con la cohesión. A mayor ángulo de fricción, mayor será la capacidad del suelo para resistir esfuerzos cortantes (Braja M. Das, 2013).

En suelos granulares, como las arenas limpias, el ángulo de fricción suele ser elevado (30° a 40°) debido al contacto directo entre partículas. En cambio, en suelos cohesivos como las arcillas, el ángulo de fricción es menor o incluso despreciable en condiciones no drenadas, ya que la resistencia proviene principalmente de la cohesión (Braja M. Das, 2013; Maturrano Vilchez & Rojas Medina, 2022).

La determinación del ángulo de fricción es esencial en el diseño de obras de ingeniería geotécnica, ya que influye en la estabilidad de taludes, la capacidad portante del terreno y el comportamiento de estructuras enterradas. En esta investigación, el valor de ϕ fue obtenido a partir del ensayo triaxial UU, mediante la interpretación de los círculos de Mohr y la envolvente de falla correspondiente a cada mezcla de suelo (Braja M. Das, 2013).

9.13 Ensayo Triaxial No Consolidado No Drenado (UU)

El ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU) es una prueba de laboratorio utilizada para determinar la resistencia al corte de suelos cohesivos en condiciones rápidas, donde no se permite la consolidación ni el drenaje durante el ensayo. Este ensayo es fundamental para evaluar la estabilidad de suelos en situaciones donde las cargas se aplican rápidamente, como en sismos o explosiones (Braja M. Das, 2013).

9.14 Teoría de la resistencia al corte: Mohr Coulomb

Esta teoría es una de algunas de las bases fundamentales para el análisis de la resistencia al corte en suelos, esta teoría establece que la resistencia al corte del suelo es una función lineal del esfuerzo normal aplicado, lo cual toma en cuenta a dos parámetros. La cohesión (C) y ángulo de fricción interna (ϕ). En donde la relación de estos dos parámetros se representa de la siguiente manera:

$$\tau = C + \sigma \cdot \tan(\phi)$$

Donde:

τ : Es el tau, representa la resistencia del suelo al corte.

C: Es la cohesión del suelo.

σ : Es el esfuerzo normal aplicado.

ϕ : Es el ángulo de fricción interna.

Según Braja M. Das, 2013, esta es la ecuación la cual representa el criterio de falla del suelo en condiciones normales, el cual permite determinar el límite de resistencia en un diagrama de esfuerzo normal versus el esfuerzo cortante. La cohesión representa la capacidad natural que tiene el suelo para resistir el corte, mientras que el ángulo de fricción está relacionado con la interacción de las partículas y su grado de compactación.

10. Metodología

10.1 Tipo y enfoque de investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque experimental y cuantitativo, ya que se manipularon de forma controlada las proporciones de arena y arcilla en una serie de mezclas remoldeadas, con el objetivo de analizar su influencia sobre los parámetros de resistencia al corte: cohesión (C) y ángulo de fricción (ϕ). Para este fin, se aplicó exclusivamente el ensayo triaxial no consolidado-no drenado (triaxial UU), bajo condiciones de laboratorio, lo cual permitió evaluar el comportamiento mecánico del suelo en condiciones rápidas de carga y sin drenaje.

10.2 Materiales utilizados

Para el desarrollo experimental de la presente investigación, se seleccionaron dos materiales con propiedades contrastantes que permitieran analizar el comportamiento mecánico de mezclas suelo bajo condiciones controladas. Estos fueron:

10.2.1. Arcilla bentonita

La arcilla bentonita, adquirida comercialmente, de los proveedores de la fábrica Orellana, utilizada por su elevada plasticidad, capacidad de hinchamiento y alto contenido de minerales del grupo montmorillonita. Su comportamiento altamente cohesivo y su tendencia a absorber agua la convierten en una representación adecuada de los suelos finos plásticos, permitiendo evaluar su influencia sobre la resistencia al corte en mezclas remoldeadas.

10.2.2. Arena

En cuanto a la arena, se obtuvo de manera comercial de una mina ubicada en el sector el descanso. Posteriormente, se sometió a un proceso de tamizado utilizando el tamiz N.º 40 (apertura de 0.425 mm), lo cual permitió dividir el material en dos fracciones distintas: la fracción que pasa y la fracción que se retiene en dicho tamiz. A cada una de estas fracciones se le aplicó el ensayo triaxial no consolidado-no drenado (UU) con el objetivo de comparar sus características mecánicas básicas en condiciones controladas de laboratorio.

Cabe destacar que, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), las partículas comprendidas entre el tamiz N.º 4 (4.75 mm) y el tamiz N.º 200 (0.075 mm) corresponden al grupo de arenas. En este caso particular, la fracción que se retiene en el tamiz N.º 40 está compuesta principalmente por arena media y gruesa, mientras que la fracción que pasa por dicho tamiz corresponde a arena fina o incluso podría contener una cantidad de finos (limo o arcilla), dependiendo de la pureza del material original.

La evaluación de ambas fracciones mediante el ensayo triaxial UU fue un paso necesario para determinar cuál de ellas era más adecuada para el diseño experimental de las mezclas. Esta decisión se sustenta únicamente en criterios mecánicos observados durante la etapa experimental, los cuales se analizarán y discutirán en el capítulo de resultados.

10.2.3. Celda triaxial de acrílico con puerto lateral

Figura 1

Celda triaxial de acrílico con puerto lateral.



Nota: Molde utilizado para colocar la muestra remoldeada con la membrana. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Dispositivo cilíndrico fabricado en metal, empleado en el proceso de preparación de la muestra remoldeada para el ensayo triaxial. Su función es facilitar la colocación uniforme de la membrana de látex alrededor de la muestra, sin provocar deformaciones ni atrapamiento de aire (ASTM D2850, 2015).

El equipo cuenta con un puerto lateral para conectar una manguera que permite aplicar vacío. Esto expande la membrana contra las paredes internas del cilindro; posteriormente, se inserta cuidadosamente la muestra y, al liberar el vacío, la membrana se ajusta correctamente sobre su superficie (ASTM D2850, 2015).

10.2.4. Molde metálico para conformado de muestra

Figura 2

Molde metálico.



Nota: Molde utilizado para la elaboración de las probetas remoldeadas. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Componente cilíndrico de acero de alta resistencia, diseñado para dar forma y dimensiones precisas a la muestra de suelo remoldeado antes del ensayo. Este molde permite la compactación en capas con golpes controlados y garantiza que la muestra mantenga el diámetro y altura requeridos por la norma (generalmente 38 mm de diámetro y 76 mm de altura) (ASTM D2850, 2015).

10.2.5. Membrana de látex

Figura 3

Membrana de látex.



Nota: Membrana utilizada para evitar el paso del agua hacia las probetas ensayadas. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Elemento flexible y delgado, fabricado en látex, que recubre la muestra de suelo una vez conformada. Su función es evitar el contacto directo entre la muestra y el fluido de la celda durante ensayos donde se aplica presión de confinamiento (aunque en el ensayo UU no se emplea esta carga). En este caso, la membrana sirve para asegurar el manejo uniforme de la muestra durante la instalación en el equipo (ASTM D2850, 2015).

10.2.6. Filtros porosos (discos de papel sinterizado o cerámico)

Figura 4

Filtros Porosos.



Nota: Filtros porosos, utilizados para la distribución uniforme de la carga. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Discos de pequeño espesor, elaborados en material poroso, que se colocan en las caras superior e inferior de la muestra. Su objetivo es permitir una distribución uniforme de la carga axial y, en otros tipos de ensayos, facilitar el drenaje del agua de poros. En el ensayo UU, aunque no se permite drenaje, estos discos siguen siendo necesarios para mantener una distribución de carga homogénea y proteger la integridad de los platillos de carga (ASTM D2850, 2015).

10.2.7. Balanza electrónica de precisión

Figura 5

Balanza electrónica.



Nota: Balanza electrónica, utilizada para determinar el peso de los materiales. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Instrumento digital utilizado para determinar la masa del suelo seco, húmedo o mezclado, con una precisión de hasta 0.01 g. Es fundamental para el control de humedad y la dosificación exacta de materiales durante la preparación de las muestras. Su uso asegura la uniformidad de las condiciones de ensayo y la repetibilidad de resultados (ASTM D2850, 2015).

10.2.8. Pisoneta metálica de compactación manual

Figura 6

Pisoneta.



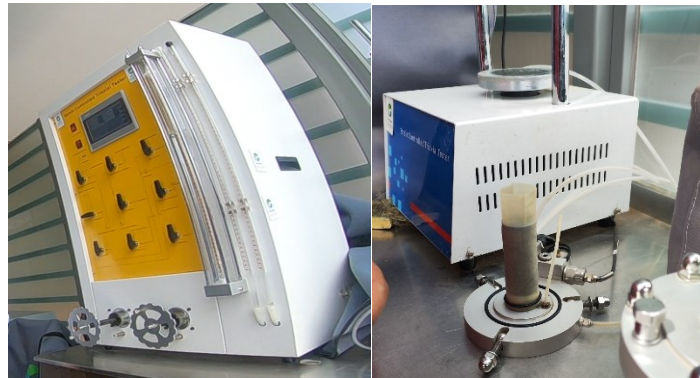
Nota: Dispositivo utilizado para la compactación de las probetas. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Dispositivo cilíndrico con mango alargado, diseñado para aplicar golpes verticales de forma manual durante el proceso de conformado de la muestra en capas. La compactación se realizó aplicando **25 golpes por capa**, con una masa constante, asegurando que todas las muestras fueran preparadas bajo las mismas condiciones de energía (ASTM D2850, 2015).

10.2.9. Máquina triaxial controlada por deformación (Strain Controlled Triaxial Tester)

Figura 7

Máquina Triaxial.



Nota: Máquina utilizada para el ensayo triaxial (UU) de las probetas remoldeadas. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Equipo principal del ensayo triaxial UU. Este sistema aplica carga axial de forma controlada sobre la muestra, midiendo simultáneamente la deformación vertical y la carga aplicada. La base del equipo permite el alojamiento de la celda triaxial, y cuenta con conexiones para sensores, válvulas y registros automatizados. En este ensayo, se utilizó únicamente la carga axial, manteniéndose cerrados los drenajes para cumplir con las condiciones no consolidadas y no drenadas (ASTM D2850, 2015).

11. Procedimiento

11.1.1. Proporciones de mezcla

Para cada una de las muestras que iban a ser remoldeadas, se determinó una cantidad de 170 g de material seco, este fue calculado en base al volumen del molde en donde serian remoldeadas las muestras. Esta cantidad total se dividió según los porcentajes establecidos de arena y arcilla correspondientes a cada mezcla, de esta manera garantizando la uniformidad del proceso y la utilidad en la comparación de los resultados.

Una vez seleccionados los materiales, se procedió a la preparación de las mezclas remoldeadas, compuestas por distintas proporciones de arcilla bentonita y arena. Este proceso tuvo como finalidad garantizar una distribución homogénea de los componentes y un contenido de humedad controlado en cada muestra, condiciones indispensables para la confiabilidad de los resultados obtenidos durante los ensayos triaxiales.

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

Tabla 1

Porcentajes de arena y arcilla para la elaboración de muestras remoldeadas

Material total que entra en el molde (Arcilla y Arena)			170	gramos	
Porcentaje de arcilla (%)	Humedad (%)	Porcentaje de arena (%)	Cantidad de arcilla (g)	Cantidad de arena (g)	Cantidad de Agua (g)
100	45	0	170	0	76.5
80	45	20	136	34	76.5
60	45	40	102	68	76.5
50	45	50	85	85	76.5
40	45	60	68	102	76.5
20	45	80	34	136	76.5
0	8	100	0	170	13.6

Nota. La Tabla 1 presenta los porcentajes y cantidades correspondientes de arena y arcilla que conforman cada muestra remoldeada, así como la cantidad de agua requerida para alcanzar el contenido de humedad establecido para las probetas. Elaborado por: Los Autores.

El contenido de humedad del 45 % fue seleccionado para las mezclas que contenían arcilla bentonita, ya que esta arcilla presenta una alta capacidad de absorción de agua y plasticidad. Este valor se determinó como la humedad óptima necesaria para reconformar adecuadamente las muestras remoldeadas bajo condiciones controladas. Cabe destacar que el análisis de diferentes contenidos de humedad no fue parte de los objetivos del presente estudio.

En contraste, la muestra conformada por 100 % arena requirió un contenido de humedad significativamente menor. Se utilizó un 8 % de agua, valor suficiente para permitir la manipulación del material durante la compactación sin inducir cohesión artificial. Esto responde a la naturaleza no plástica y granular de la arena, la cual no retiene humedad con la misma facilidad que la arcilla y no requiere altos contenidos de agua para alcanzar una densidad adecuada en estado remoldeado.

Cada mezcla fue inicialmente preparada en seco, pesando las cantidades correspondientes de arena y arcilla con una balanza digital de precisión. Luego, se realizó el mezclado manual en seco hasta

lograr una distribución visualmente uniforme. A continuación, se incorporó el agua correspondiente de forma gradual, con agitación continua, y se procedió al amasado manual hasta obtener una masa plástica homogénea, libre de grumos y con una consistencia adecuada para el proceso de moldeo.

11.1.2. Preparación de las muestras

Con las mezclas remoldeadas ya preparadas, se procedió a la formación de las probetas cilíndricas que serían sometidas al ensayo triaxial no consolidado-no drenado (UU). Las dimensiones de cada muestra fueron de 38 mm de diámetro y 76 mm de altura, conforme a los parámetros establecidos por la norma ASTM D2850, lo que permitió mantener condiciones uniformes durante toda la fase experimental (ASTM D2850, 2015).

El proceso de conformación se desarrolló en los siguientes pasos:

Compactación por capas: Cada muestra fue moldeada en tres capas de espesor uniforme, introduciendo el material dentro del molde en porciones sucesivas. Para compactar cada capa, se utilizó un compactador manual con masa incorporada, aplicando 25 golpes distribuidos de forma uniforme sobre la superficie. Este método aseguró una compactación consistente y homogénea en todas las muestras.

Desmoldeo y control dimensional: Una vez completado el proceso de compactación, el molde fue desarmado cuidadosamente, permitiendo extraer la probeta sin la necesidad de un extractor mecánico. Posteriormente, se verificaron sus dimensiones físicas (diámetro y altura) mediante el uso de un calibrador digital, garantizando que cumplieran con los requisitos establecidos para el ensayo triaxial.

Almacenamiento previo al ensayo: Las probetas fueron protegidas con una membrana de látex para conservar su contenido de humedad y evitar deformaciones superficiales. Se almacenaron en condiciones controladas hasta su montaje en la celda triaxial.

Este procedimiento permitió obtener muestras con densidad uniforme, forma regular y humedad constante, asegurando la confiabilidad de los datos obtenidos en los ensayos triaxiales UU.

11.1.3. Ejecución del ensayo triaxial UU

El ensayo triaxial no consolidado-no drenado (UU) fue el procedimiento seleccionado para evaluar la resistencia al corte de las muestras moldeadas. Este tipo de ensayo se aplica comúnmente a suelos cohesivos y permite simular condiciones de carga rápida, donde no existe tiempo suficiente para el drenaje del agua contenida en los poros. El procedimiento se llevó a cabo de acuerdo con los lineamientos establecidos en la norma ASTM D2850.

Una vez moldeadas y protegidas, las muestras fueron montadas en la celda triaxial, sobre una base porosa y alineadas en posición vertical. Cada probeta fue recubierta con una membrana de látex impermeable, ajustada en ambos extremos mediante anillos de sellado, con el fin de evitar la salida de agua y permitir el confinamiento uniforme de la muestra durante el ensayo.

A continuación, se aplicó una presión de confinamiento constante en la cámara de la celda, sin permitir el drenaje del agua de los poros del suelo. Esta condición se mantuvo durante todo el ensayo, simulando un escenario no consolidado y no drenado.

Luego, se aplicó una carga axial vertical de forma continua, a una velocidad controlada, hasta que la muestra alcanzó el punto de falla. Durante esta etapa se registraron de forma simultánea la carga axial aplicada y la deformación vertical correspondiente, utilizando un sistema de adquisición de datos.

Al finalizar cada ensayo, se procedió a desmontar cuidadosamente la muestra y se anotaron las observaciones físicas del cuerpo de prueba tras la ruptura. La información obtenida se utilizó para construir los respectivos círculos de Mohr y determinar los valores de cohesión (C) y ángulo de fricción (ϕ) para cada una de las proporciones de mezcla analizadas.

Este procedimiento se repitió para todas las combinaciones de mezcla establecidas, bajo condiciones uniformes de ensayo, lo cual permitió obtener resultados comparables y consistentes entre las distintas probetas.

11.1.4. Procesamiento y análisis de resultados

Finalizada la ejecución de los ensayos triaxiales UU, se procedió al procesamiento de los datos obtenidos, siguiendo los lineamientos técnicos establecidos en procedimientos estándar de laboratorio. Para cada muestra se analizaron tanto la deformación axial como la carga aplicada, con el objetivo de calcular el esfuerzo axial y la deformación unitaria en cada etapa de la prueba.

La deformación unitaria axial (ε) fue determinada mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

Donde:

ΔL : es la deformación vertical registrada durante el ensayo (en pulgadas o milímetros).

L_0 : es la altura inicial de la muestra.

El esfuerzo axial no drenado (σ) se obtuvo a partir de la carga corregida y el área de la muestra correspondiente a cada etapa del ensayo:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

Donde:

P : es la carga vertical corregida aplicada sobre la muestra (en libras o newtons),

A : es el área corregida en función de la deformación.

Dado que la muestra sufre cambios dimensionales durante el ensayo, el área fue ajustada mediante la siguiente relación:

$$A = \frac{A_0}{1 - \varepsilon}$$

Donde:

A_0 : es el área inicial de la muestra,

ϵ : es la deformación unitaria axial.

El cálculo del área inicial de la muestra (A_0) se realizó con base en su diámetro (D), utilizando la fórmula geométrica convencional:

$$A_0 = \frac{\pi \times D^2}{4}$$

Donde:

D : es el diámetro de la muestra (38 mm o 1.5 pulgadas).

Al finalizar cada ensayo, se determinó el contenido de humedad ($w\%$) de la muestra, con el objetivo de verificar la condición remoldeada y controlar la variable de humedad en el análisis. Para ello se empleó la siguiente expresión:

$$w(\%) = \left[\frac{Mh - Ms}{Ms} \right] \times 100$$

Donde:

Mh : es la masa húmeda de la muestra,

Ms : es la masa seca obtenida tras el secado en horno.

Una vez obtenidos los valores de esfuerzo y deformación correspondientes a cada lectura, se construyeron los círculos de Mohr para cada muestra. A partir de las envolventes de falla trazadas, se determinaron los parámetros de resistencia al corte: cohesión (C) y ángulo de fricción (ϕ).

Finalmente, los resultados fueron organizados en tablas comparativas y representados en gráficos de dispersión, permitiendo observar el comportamiento de las mezclas remoldeadas en función de su composición porcentual de arcilla y arena, así como el efecto del contenido de humedad sobre su resistencia mecánica.

12. Resultados preliminares: elección de la fracción de arena

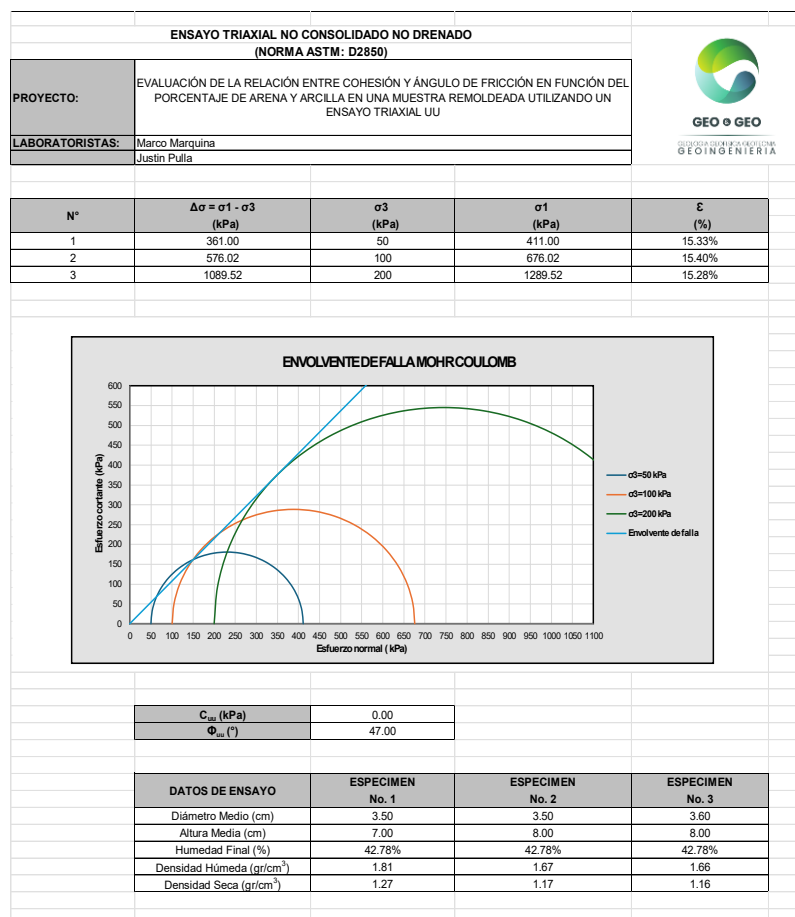
12.1 Resultados preliminares: arena que pasa el tamiz N.º 40

Con el fin de evaluar el comportamiento mecánico de la arena fina, se preparó y ensayó una muestra compuesta únicamente por la fracción que pasa el tamiz N.º 40, es decir, partículas menores a 0.425 mm. Esta fracción fue compactada en condiciones remoldeadas y sometida al ensayo triaxial no consolidado-no drenado (UU), utilizando un contenido de humedad controlado del 45%.

Los resultados del ensayo triaxial UU fueron:

Figura 8

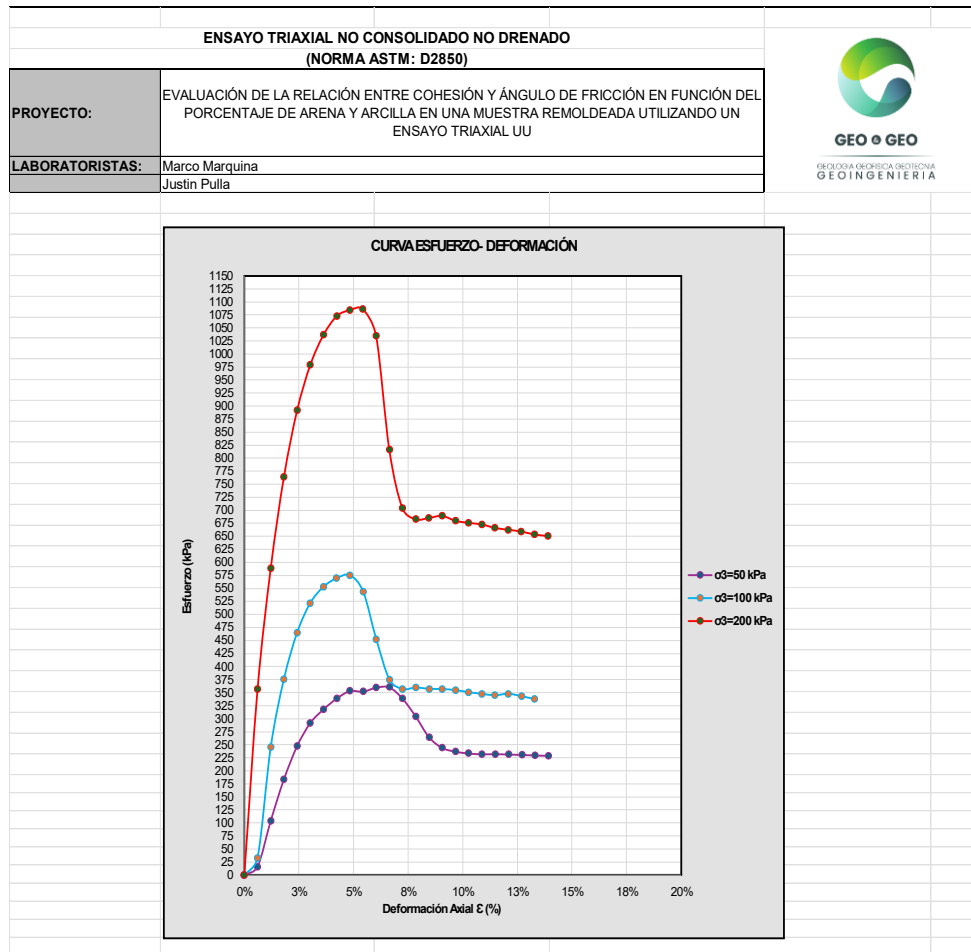
Muestra 1 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - Arena que pasa el Tamiz N.º 40.



Nota. La figura 8 muestra la envolvente de falla obtenida mediante el ensayo triaxial UU para una muestra de arena que pasa el tamiz N.º 40. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura 9

Muestra 1 - Curva Esfuerzo-Deformación - Arena que pasa el Tamiz N.º40.



Nota. La figura 9 muestra las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de la muestra 1 (arena que pasa el tamiz N.º40), sometidas a tres niveles de carga: 50,100,200 kPa, en el ensayo triaxial UU. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

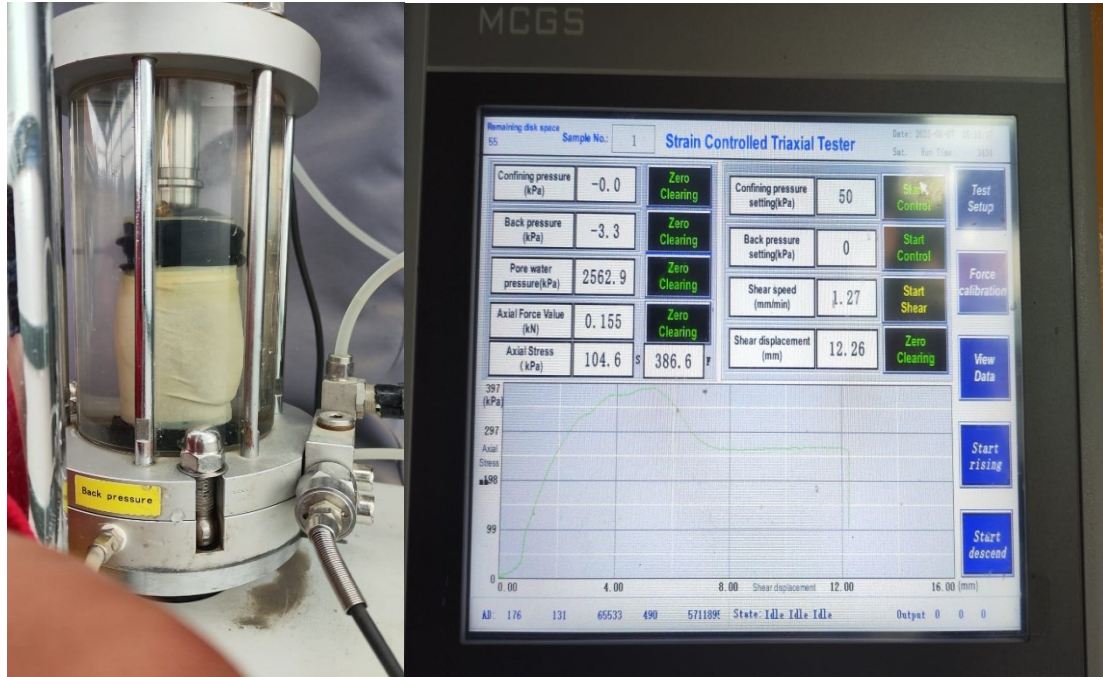
El resultado de cohesión nula evidencia un comportamiento típico de suelo no cohesivo, sin ningún tipo de adherencia entre partículas. Esta condición es esperable en arenas limpias y compactadas en estado remoldeado, donde la resistencia al corte depende exclusivamente del ángulo de fricción.

Por su parte, el valor de 47° en el ángulo de fricción indica una alta capacidad de resistencia al deslizamiento interno entre granos, atribuida a su granulometría gruesa, forma angular o grado de compactación. Este comportamiento refuerza su validez como componente granular ideal para las

mezclas experimentales, ya que permite aislar con claridad el efecto de la fricción en la resistencia total del suelo.

Figura 10

Ensayo triaxial - Muestra 1 conformada por: arena - Carga 50 kPa.



Nota. La figura 10 muestra la cámara triaxial, ensayo de arena que pasa el tamiz N.º40 con una carga aplicada de 50 kPa. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura 11

Ensayo triaxial - Muestra 2 conformada por: arena - Carga 100 kPa.



Nota. La figura 11 muestra la cámara triaxial, ensayo de arena que pasa el tamiz N.º40 con una carga aplicada de 100 kPa. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura 12

Ensayo triaxial - Muestra 3 conformada por: arena - Carga 100 kPa.



Nota. La figura 12 muestra la cámara triaxial, ensayo de arena que pasa el tamiz N.º40 con una carga aplicada de 200 kPa. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

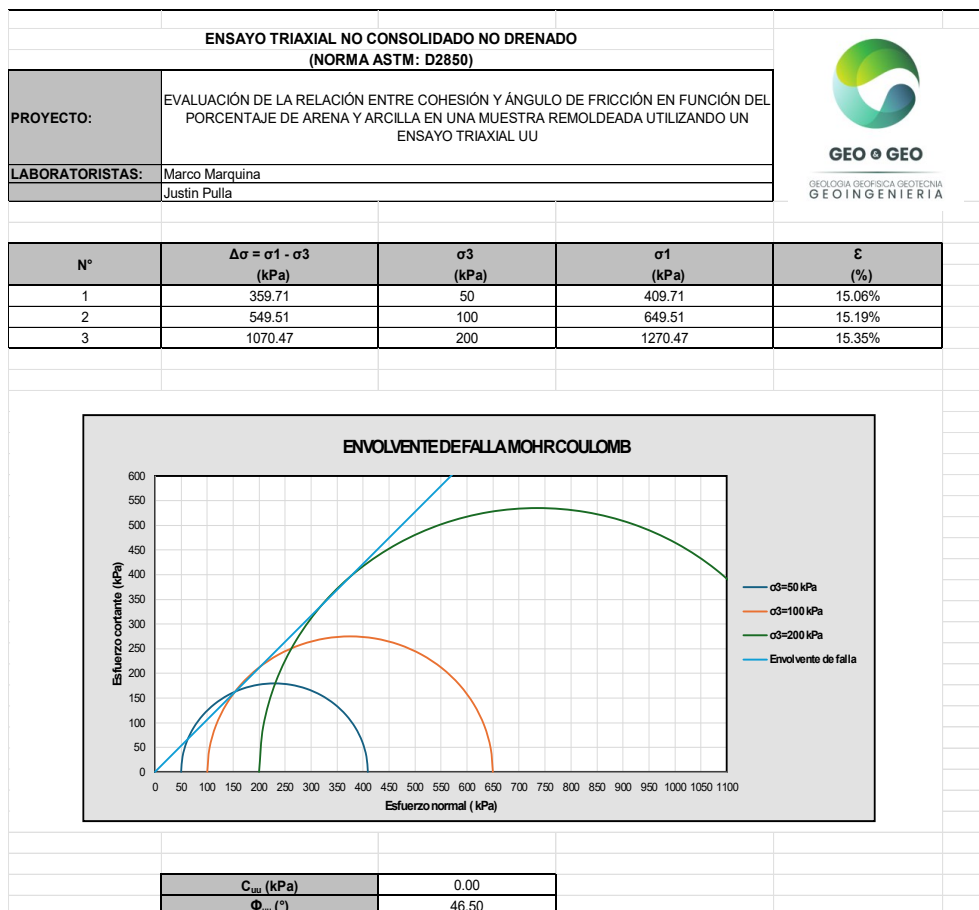
12.2 Resultados preliminares: arena que se retiene en el tamiz N.º 40

Se preparó una muestra compuesta exclusivamente por la fracción de arena retenida en el tamiz N.º 40, es decir, con partículas mayores a 0.425 mm, correspondientes a arena media y gruesa según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Esta fracción fue seleccionada para evaluar su comportamiento mecánico sin interferencia de partículas finas, bajo condiciones de carga rápida en estado remoldeado.

Los resultados del ensayo triaxial UU fueron:

Figura 13

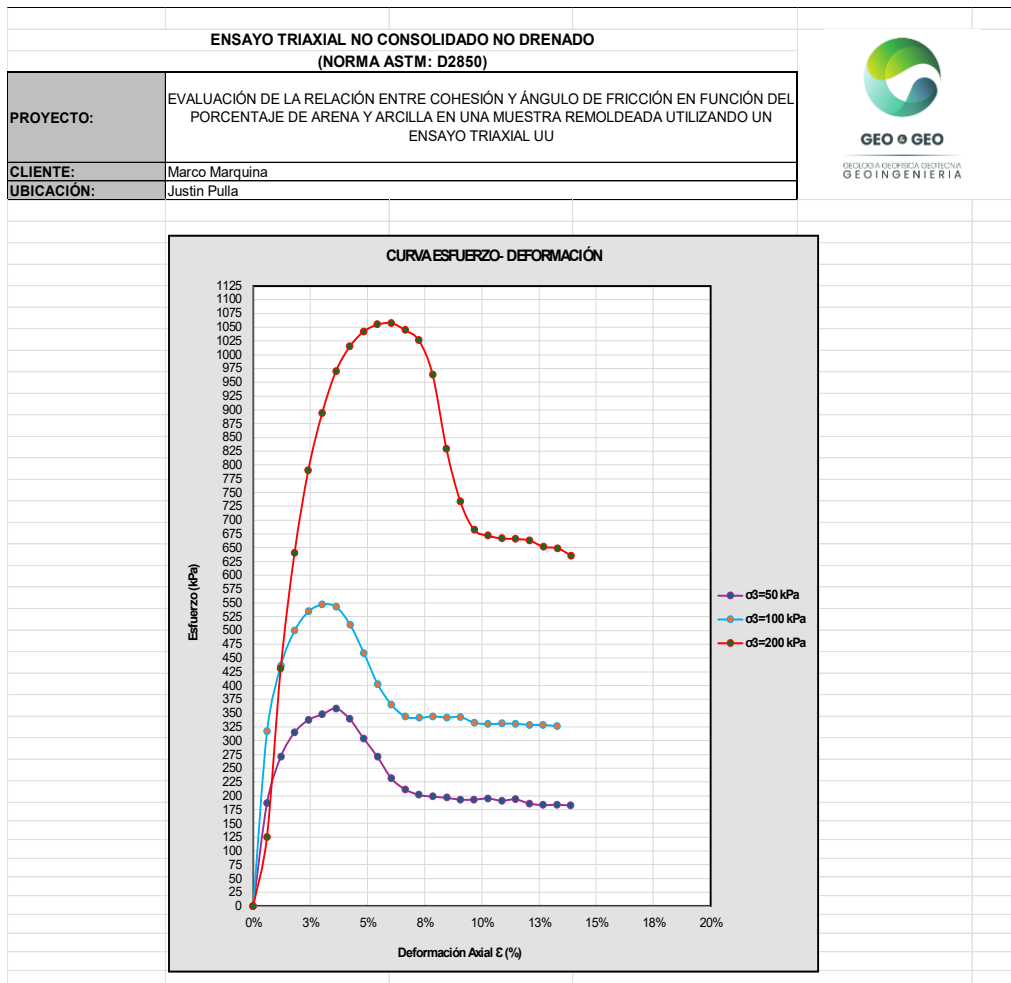
Muestra 2 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - Arena retenida en el Tamiz N.º 40.



Nota. La figura 13 muestra la envolvente de falla obtenida mediante el ensayo triaxial UU para una muestra de arena que es retenida por el tamiz N.º 40. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura 14

Muestra 2 - Curva Esfuerzo-Deformación - Arena retenida en el Tamiz N.º40.



Nota. La figura 14 muestra las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de la muestra 2 (arena que se retiene en el tamiz N.º40), sometidas a tres niveles de carga: 50,100,200 kPa, en el ensayo triaxial UU. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

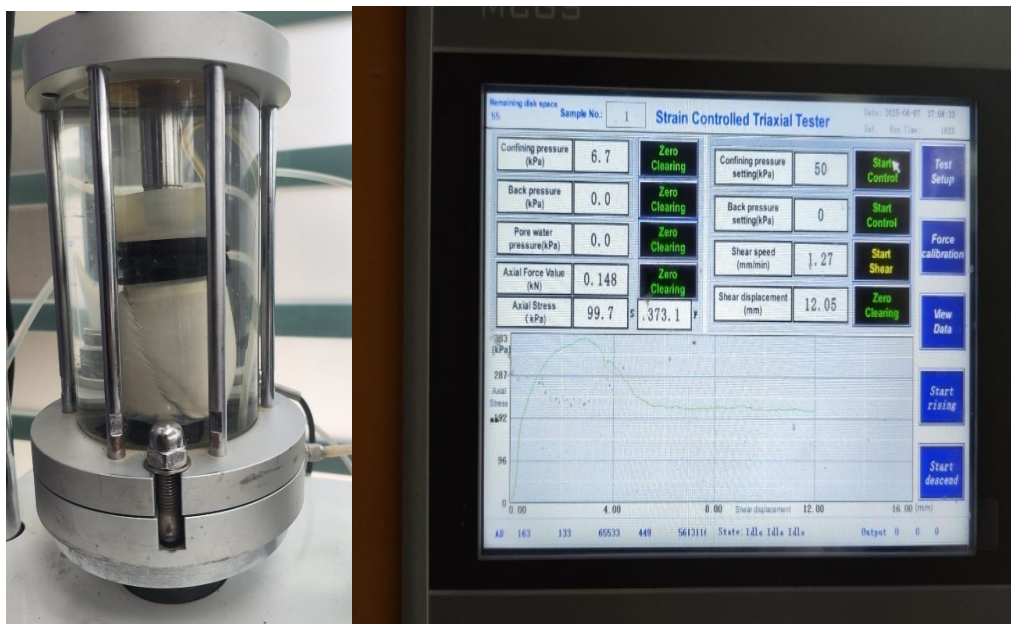
La cohesión nula obtenida confirma que esta fracción se comporta como un material no cohesivo, sin presencia significativa de partículas adherentes o plastificantes. Este resultado es consistente con la expectativa para arenas limpias y gruesas, donde la resistencia al corte proviene exclusivamente del contacto y rozamiento entre partículas.

El valor del ángulo de fricción fue considerablemente alto (46.5°), lo cual puede atribuirse a factores como la granulometría gruesa, forma angular de los granos, buen grado de compactación y bajo contenido de humedad. Este resultado evidencia un comportamiento mecánico altamente resistente al corte por fricción, ideal para suelos no cohesivos.

Visualmente, durante el ensayo se observó una ruptura bien definida, sin deformaciones plásticas previas ni pérdida de estructura. Este tipo de respuesta mecánica refuerza la idoneidad de esta fracción para ser utilizada como componente granular en las mezclas, ya que permite analizar con claridad el contraste entre suelos dominados por fricción y cohesivos.

Figura 15

Ensayo triaxial - Muestra 2 conformada por: arena - Carga 50 kPa.



Nota. La figura 15 muestra la cámara triaxial, ensayo de arena que es retenida por el tamiz N.º40 con una carga aplicada de 50 kPa. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura 16

Ensayo triaxial - Muestra 2 conformada por: arena - Carga 100 kPa.



Nota. La figura 16 muestra la cámara triaxial, ensayo de arena que es retenida por el tamiz N.º40 con una carga aplicada de 100 kPa. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura 17

Ensayo triaxial - Muestra 2 conformada por: arena - Carga 200 kPa.



Nota. La figura 17 muestra la cámara triaxial, ensayo de arena que es retenida por el tamiz N.º40 con una carga aplicada de 200 kPa. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

12.3 Comparación entre fracciones y selección del material granular

Tabla 2

Tabla comparativa para la elección del mejor material.

Tabla comparativa del mejor material			
Retiene el tamiz N.º40		Pasa el tamiz N.º40	
C	0	C	0
Φ	46.5	Φ	47

Nota. En la tabla 2 se puede observar los resultados a comparar de los ensayos triaxiales elaborados. Elaborado por: Los Autores.

Ambas fracciones mostraron un comportamiento similar en sus ángulos de fricción, sin presencia de cohesión ni efectos de deformación plástica. Sin embargo, se tomó la decisión de trabajar con la fracción que se retiene en el tamiz N.º 40 por una razón técnica clave: la arcilla ya aporta la fracción de finos en las mezclas.

Utilizar arena más gruesa permitió mantener una separación clara entre el material granular y el cohesivo, evitando que se sobreponga el efecto de los finos provenientes de dos fuentes. Además, al seleccionar una fracción libre de partículas pequeñas, se minimizó el riesgo de interferencia con el comportamiento plástico de la arcilla, lo que permite un análisis más limpio y controlado del efecto de cada componente en la resistencia al corte del suelo remoldeado.

13. Composición de mezclas remodeladas

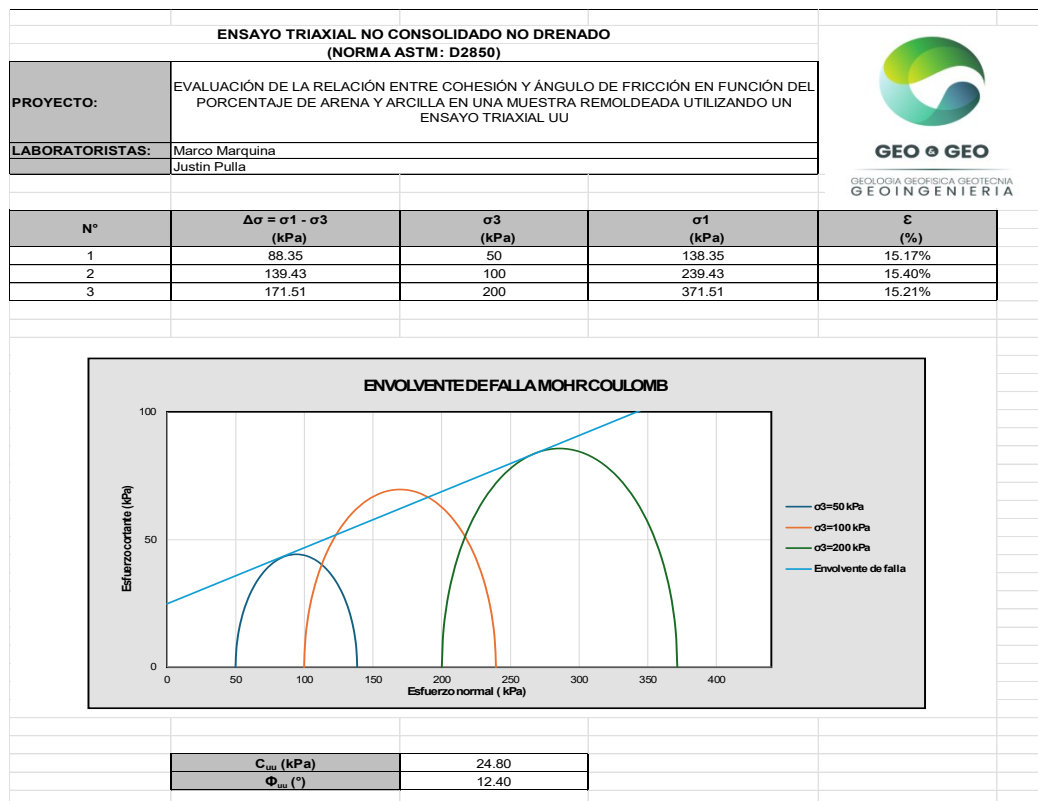
13.1 Mezcla 100% arcilla – 0% arena – 45% humedad

Esta muestra fue preparada únicamente con arcilla bentonita, sin presencia de partículas granulares. El contenido de humedad utilizado fue del 45 %, valor establecido para asegurar una condición remodelada plástica, representativa del comportamiento típico de un suelo fino cohesivo.

Los resultados del ensayo triaxial UU fueron:

Figura 18

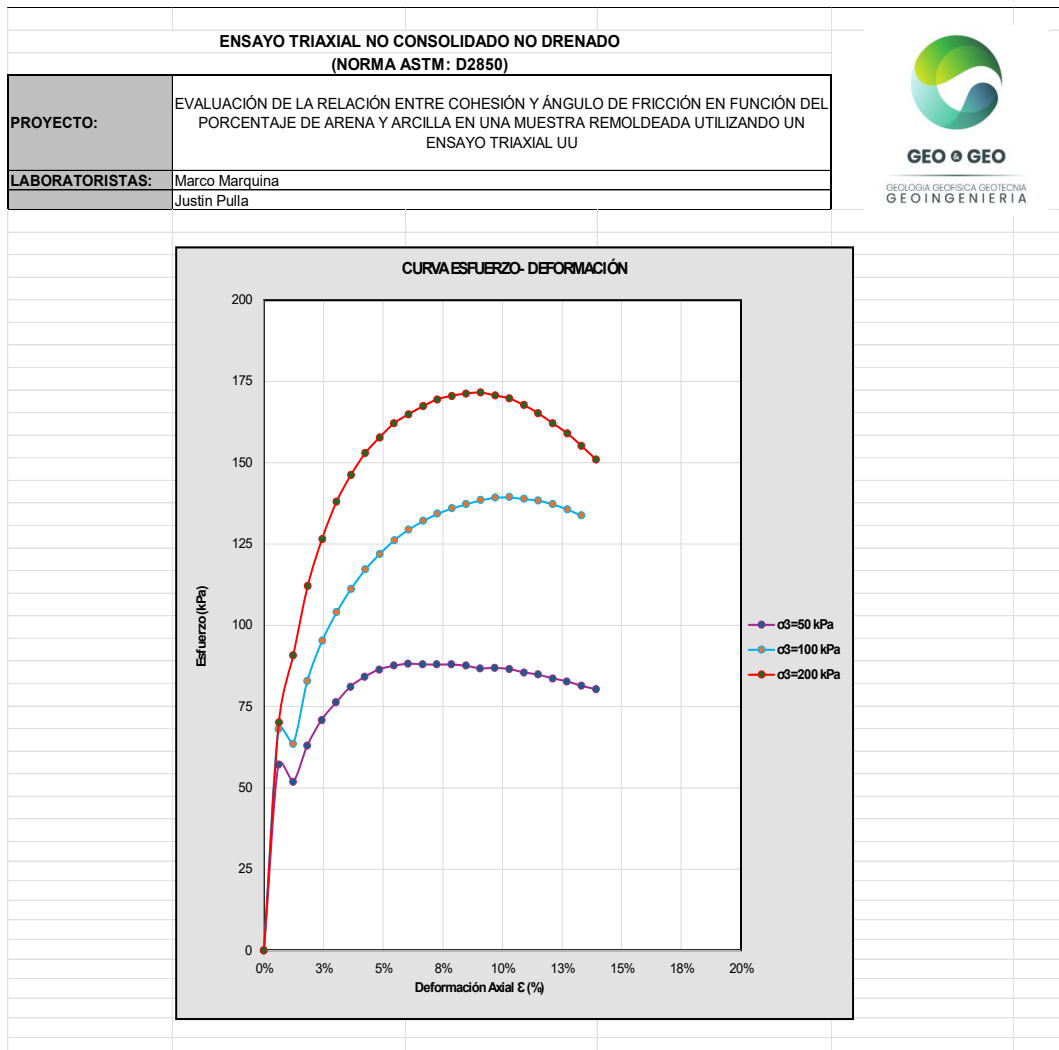
Mezcla 1 - Envoltente Falla Mohr Coulomb - 100% Arcilla – 0% Arena.



Nota. La figura 18 muestra la envoltente de falla obtenida mediante el ensayo triaxial UU para una probeta elaborada de 100% arcilla y con una humedad del 45%. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura 19

Mezcla 1 - Curva Esfuerzo-Deformación - 100% Arcilla – 0% Arena.



Nota. La figura 19 muestra las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de una probeta elaborada de 100% arcilla, sometidas a tres niveles de carga: 50, 100, 200 kPa, en el ensayo triaxial UU.

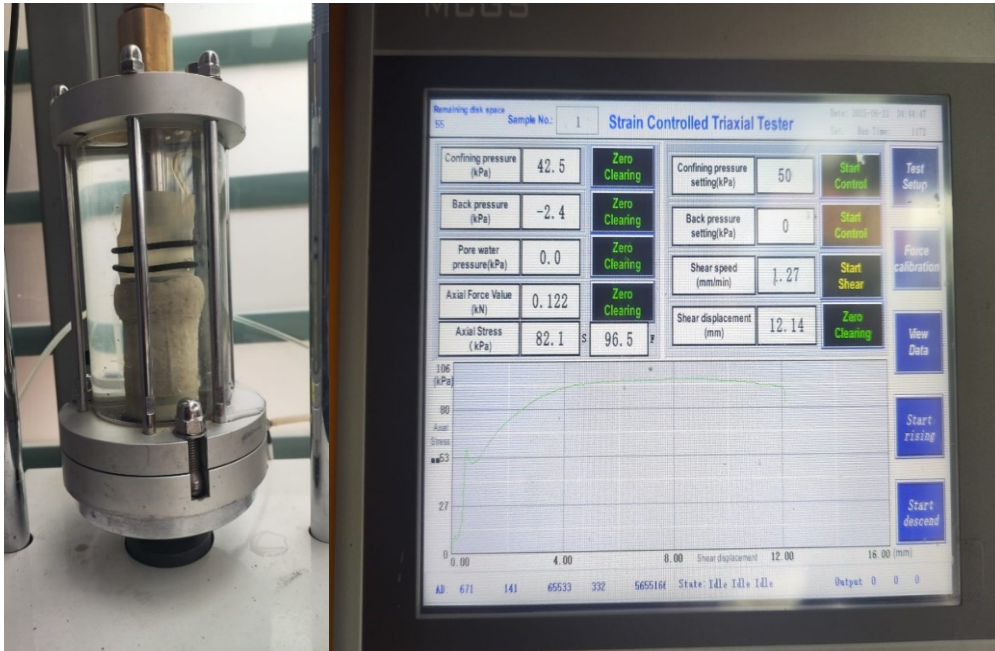
Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Estos valores reflejan un comportamiento característico de un suelo altamente cohesivo, en el cual la resistencia al corte está dominada principalmente por la cohesión entre partículas. La fricción interna es limitada, lo cual es esperable en arcillas plásticas, donde el contacto entre láminas minerales y la presencia de agua reducen la interacción friccional.

Durante el ensayo se observó una deformación progresiva en el cuerpo de prueba, sin un plano de falla definido. Este tipo de respuesta es típica en arcillas saturadas, en las que el colapso se produce por acomodamiento interno más que por fractura estructural.

Figura 20

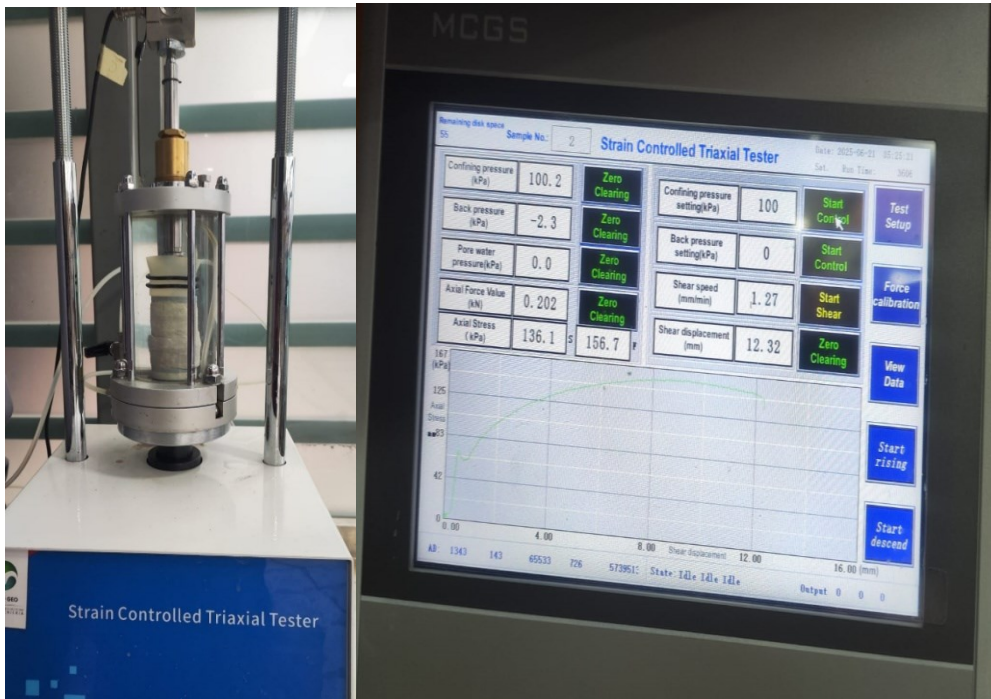
Ensayo triaxial – Muestra conformada por: 100% Arcilla - Carga 50 kPa.



Nota. La figura 20 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 1), compuesta por 100 % arcilla y 45 % de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 50 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

Figura 21

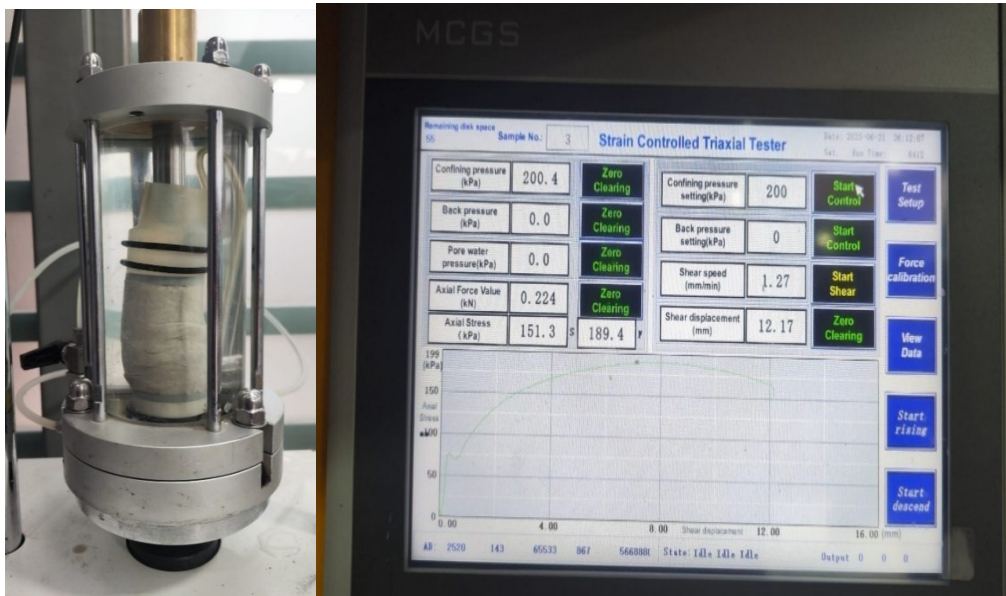
Ensayo triaxial - Muestra 100% Arcilla - Carga 100 kPa.



Nota. La figura 21 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 1), compuesta por 100 % arcilla y 45 % de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 100 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

Figura 22

Ensayo triaxial – Muestra conformada por: 100% Arcilla - Carga 200 kPa.



Nota. La figura 22 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 1), compuesta por 100 % arcilla y 45 % de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 200 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

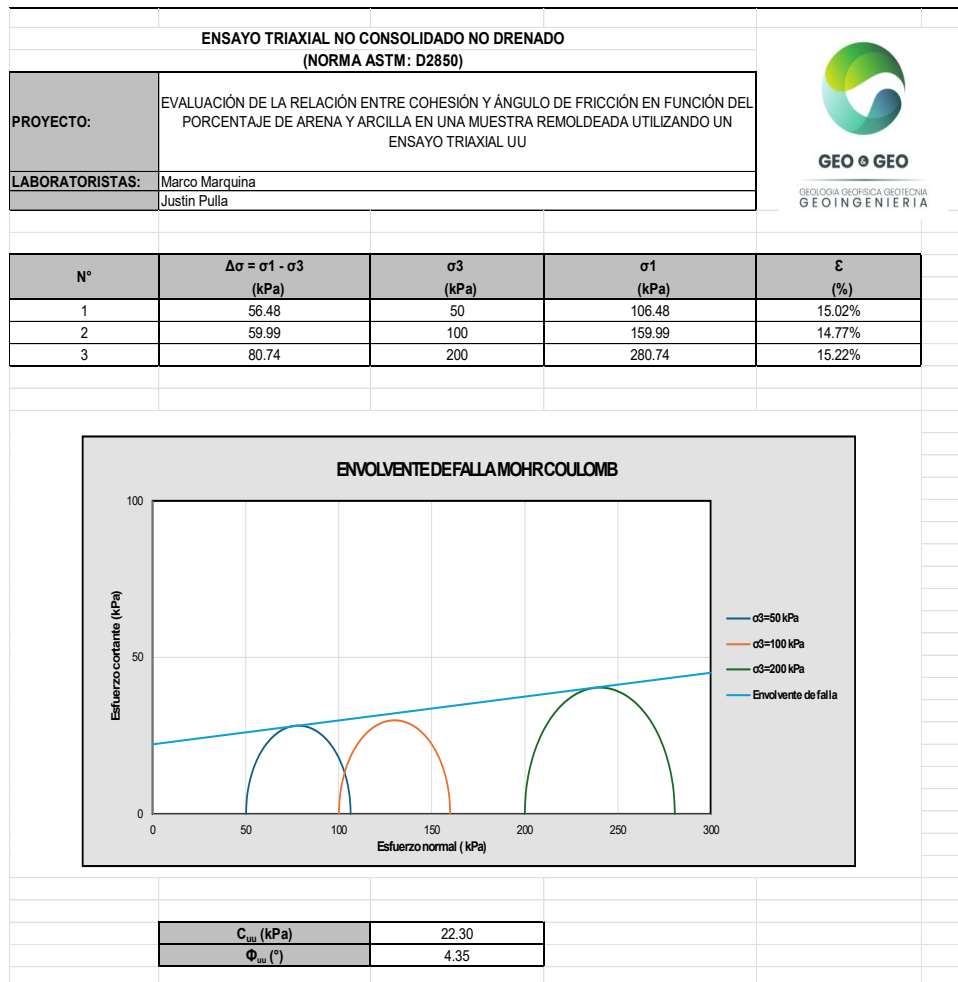
13.2 Mezcla 80% arcilla – 20% arena – 45% humedad

Esta muestra estuvo compuesta por 80 % de arcilla bentonita y 20 % de arena retenida en el tamiz N.º 40, manteniendo un contenido de humedad del 45 %, igual al utilizado en el resto de las mezclas con presencia de arcilla. El objetivo de esta combinación fue analizar el efecto inicial de la incorporación de un componente granular en un suelo altamente cohesivo.

Los resultados obtenidos tras el ensayo triaxial UU fueron:

Figura 23

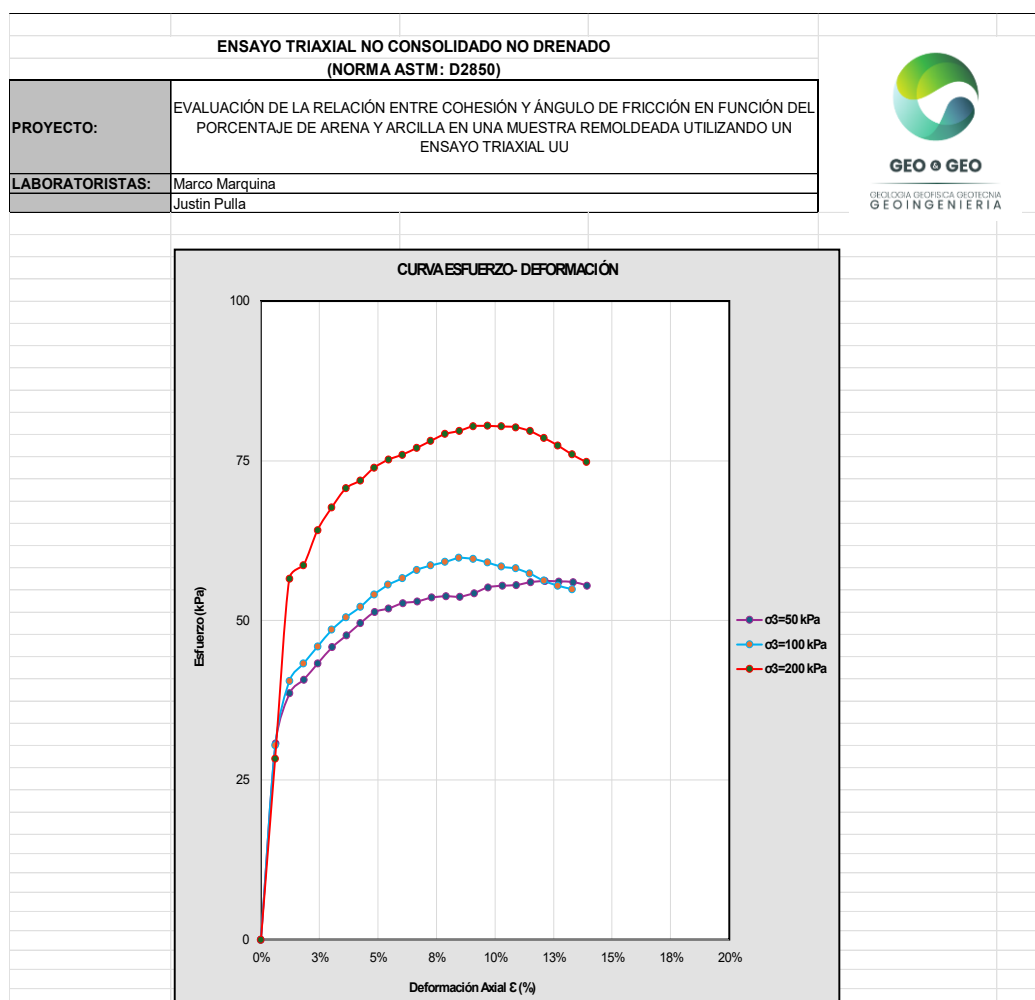
Mezcla 2 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - 80% Arcilla - 20% Arena.



Nota. La figura 23 muestra la envolvente de falla obtenida mediante el ensayo triaxial UU para una muestra de 80% arcilla y 20% arena, con una humedad del 45%. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura 24

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



Nota. La figura 24 muestra las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de la muestra de 80% arcilla y 20% arena, sometidas a tres niveles de carga: 50,100,200 kPa, en el ensayo triaxial UU. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Al compararla con la muestra de 100 % arcilla, se observa una ligera disminución en la cohesión y una caída considerable del ángulo de fricción, lo cual indica que la introducción de arena en baja proporción puede alterar la estructura interna de la arcilla, pero sin generar un efecto friccional dominante.

Esta mezcla mostró una respuesta mecánica aún gobernada por la cohesión, aunque con indicios de pérdida de estructura continua debido al ingreso de partículas gruesas que interrumpen la matriz arcillosa. La fricción no logró incrementarse significativamente, lo cual se justifica por la baja proporción de arena, que no alcanza a formar una red de contactos dominante.

Figura 25

Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 80% Arcilla - 20% Arena - Carga 50 kPa.



Nota. La figura 25 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 2), compuesta por 80% arcilla, 20% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 50 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

Figura 26

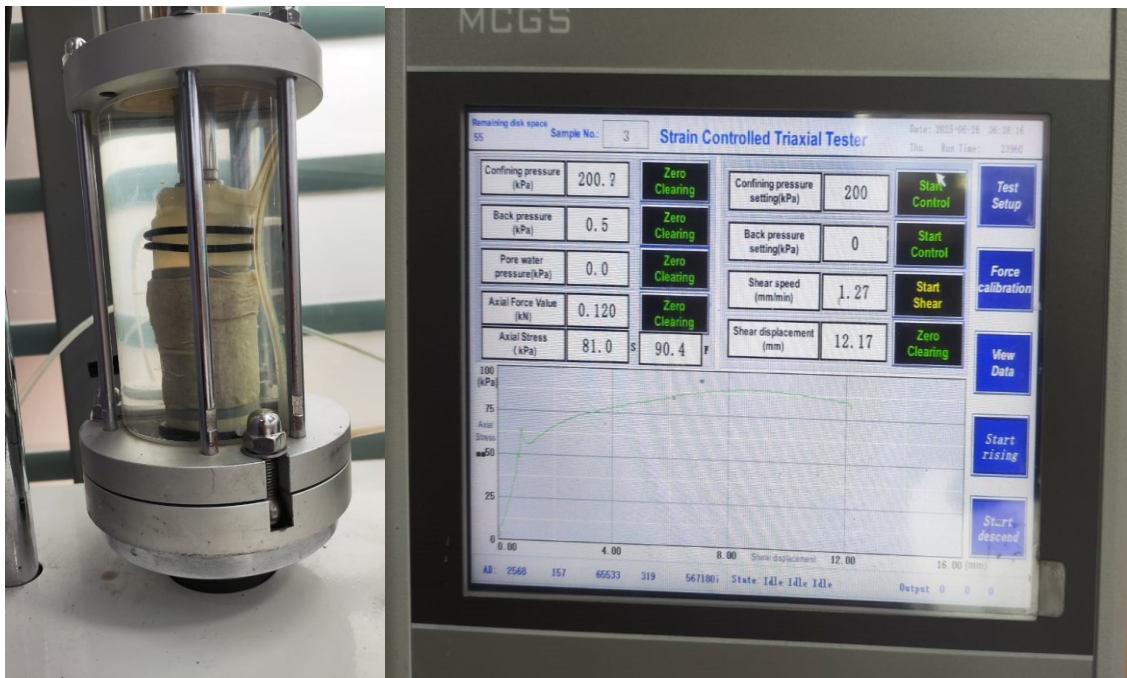
Ensayo triaxial – Muestra conformada por: 80% Arcilla - 20% Arena - Carga 100 kPa.



Nota. La figura 26 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 2), compuesta por 80% arcilla, 20% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 100 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

Figura 27

Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 80% Arcilla - 20% Arena - Carga 200 kPa.



Nota. La figura 27 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 2), compuesta por 80% arcilla, 20% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 200 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

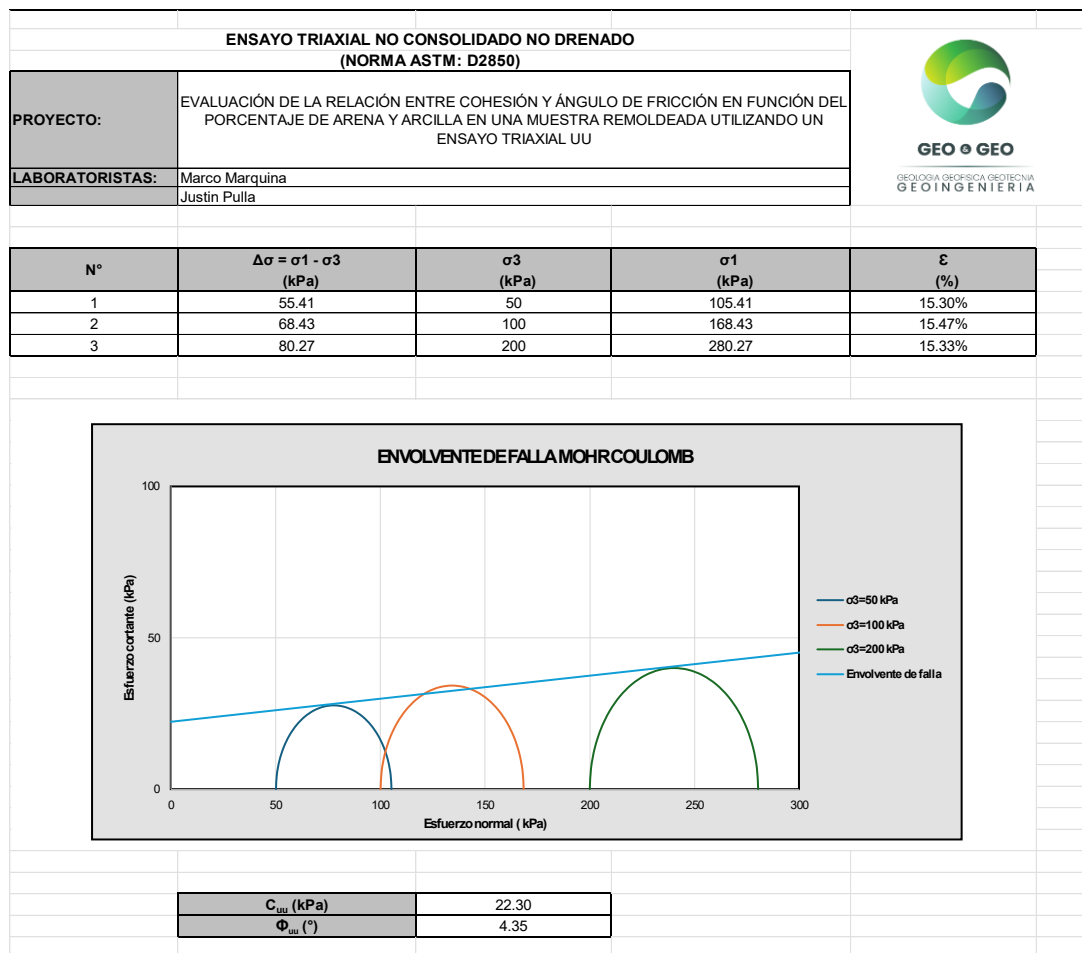
13.3 Mezcla 60% arcilla – 40% arena – 45% humedad

La tercera combinación ensayada estuvo compuesta por 60 % de arcilla bentonita y 40 % de arena (retenida en el tamiz N.º 40), bajo un contenido de humedad constante del 45 %. Esta proporción permitió evaluar el comportamiento de una mezcla donde el componente granular comienza a adquirir mayor presencia, sin superar aún al cohesivo.

Los resultados del ensayo triaxial UU fueron los siguientes:

Figura 28

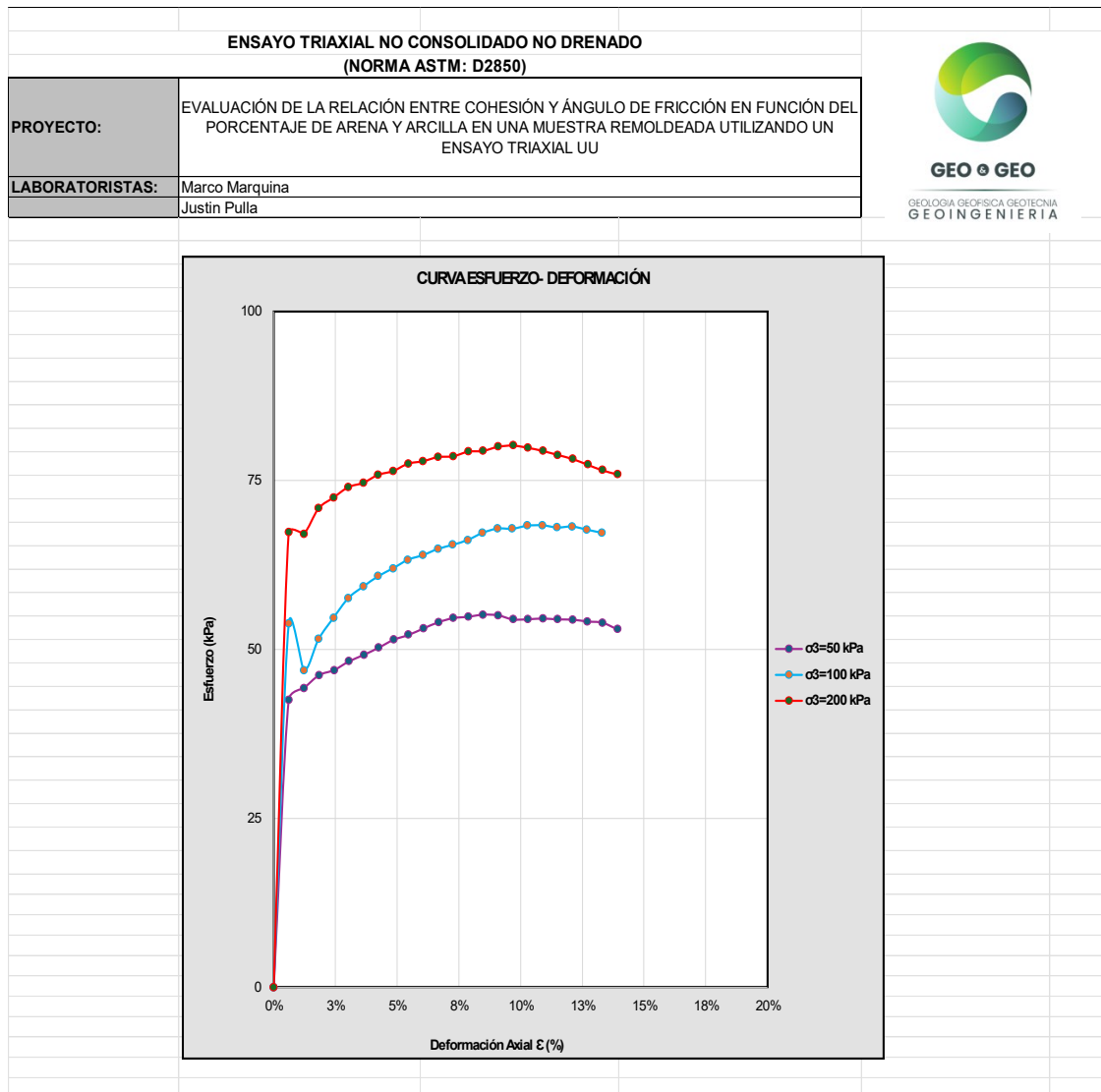
Mezcla 3 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - 60% Arcilla - 40% Arena.



Nota. La figura 28 muestra la envolvente de falla obtenida mediante el ensayo triaxial UU para una muestra de 60% arcilla y 40% arena, con una humedad del 45%. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura 29

Mezcla 3 - Curva Esfuerzo-Deformación - 60% Arcilla - 40% Arena.



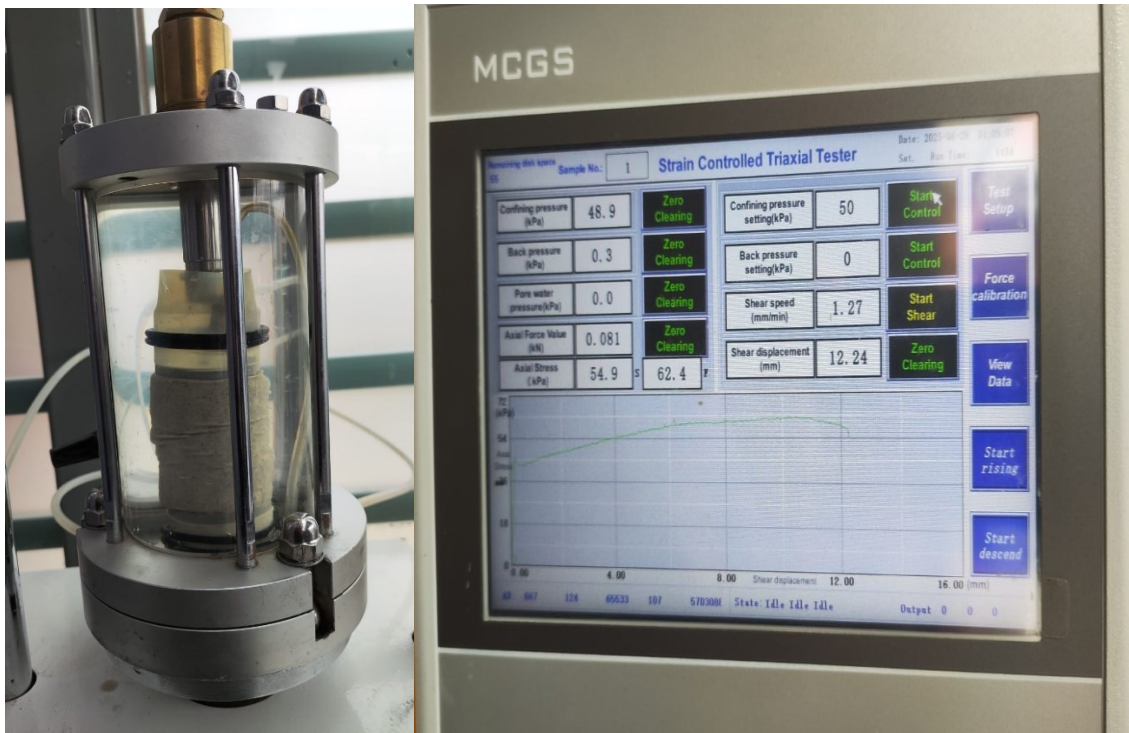
Nota. La figura 29 muestra las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de la muestra de 60% arcilla y 40% arena, sometidas a tres niveles de carga: 50,100,200 kPa, en el ensayo triaxial UU. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Se observa que la cohesión se mantiene igual a la obtenida en la mezcla 80–20, mientras que el ángulo de fricción disminuye ligeramente, lo cual resulta poco convencional desde el punto de vista teórico. Este comportamiento puede estar asociado a la reorganización interna de las partículas, donde la arena, al aumentar su volumen relativo, rompe parcialmente la continuidad de la estructura arcillosa, sin llegar todavía a formar una red dominada por la fricción.

El resultado sugiere que, en esta proporción, el suelo aún se comporta principalmente como un material cohesivo modificado, con un efecto de transición estructural que no se traduce en un incremento inmediato de la fricción.

Figura 30

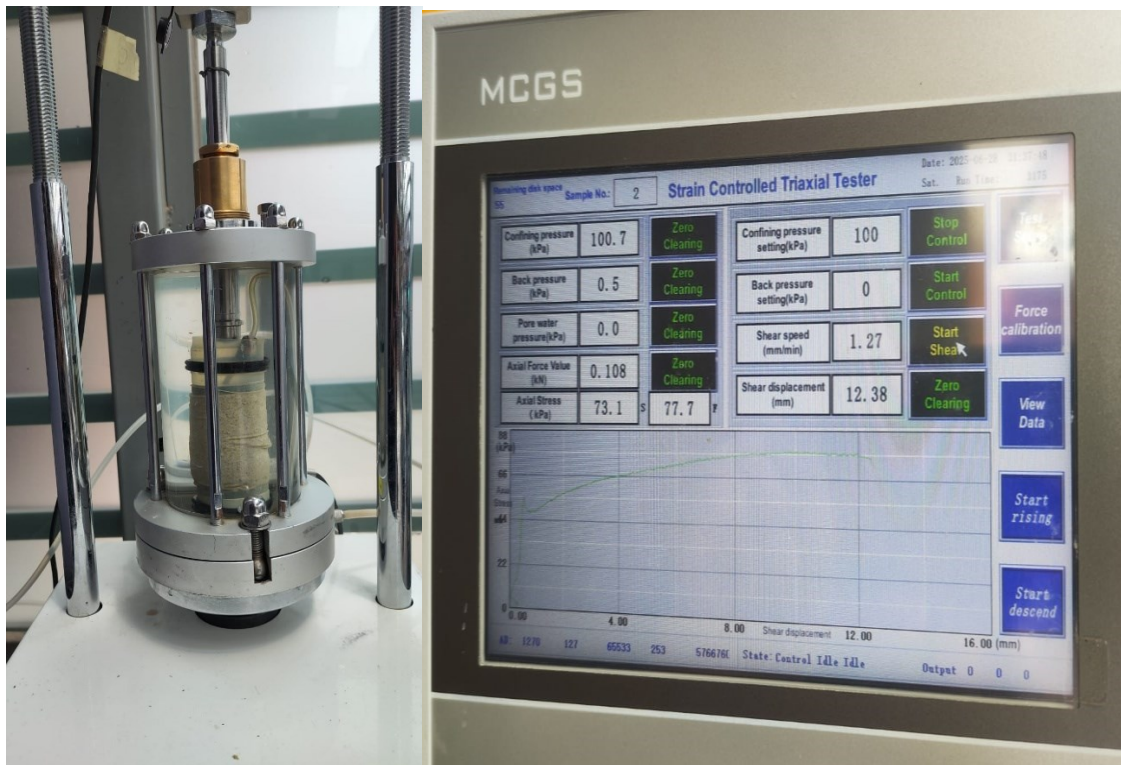
Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 60% Arcilla - 40% Arena - Carga 50 kPa.



Nota. La figura 30 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 3), compuesta por 60% arcilla, 40% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 50 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

Figura 31

Ensayo triaxial - Muestra 60% Arcilla - 40% Arena - Carga 100 kPa.



Nota. La figura 31 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 3), compuesta por 60% arcilla, 40% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 100 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

Figura 32

Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 60% Arcilla - 40% Arena - Carga 200 kPa.



Nota. La figura 32 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 3), compuesta por 60% arcilla, 40% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 200 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

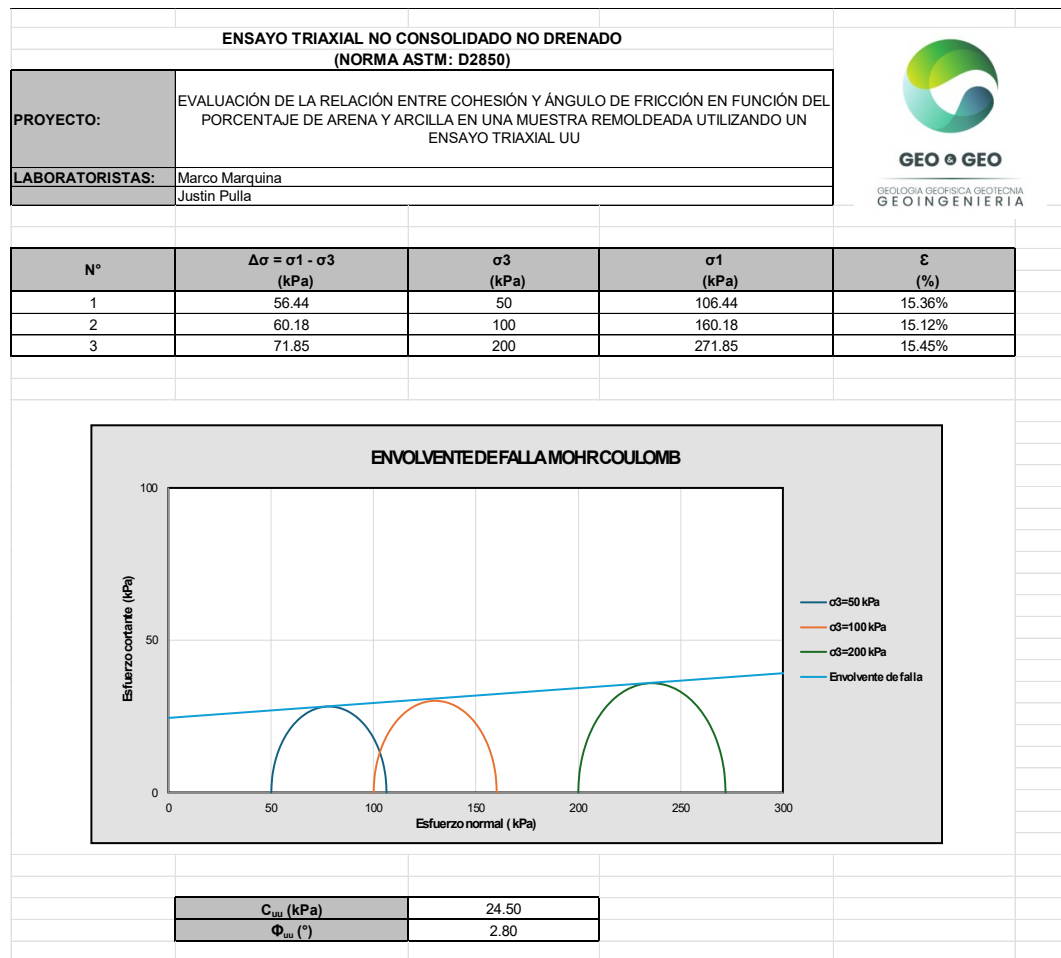
13.4 Mezcla 50% arcilla – 50% arena – 45% humedad

Esta mezcla presentó una proporción equilibrada entre ambos componentes: 50 % de arcilla bentonita y 50 % de arena retenida en el tamiz N.º 40, manteniéndose constante el contenido de humedad en 45 %. Esta combinación se consideró crítica para evaluar la transición entre el dominio cohesivo y la fricción dentro del comportamiento mecánico del suelo remoldeado.

Los resultados del ensayo triaxial UU fueron:

Figura 33

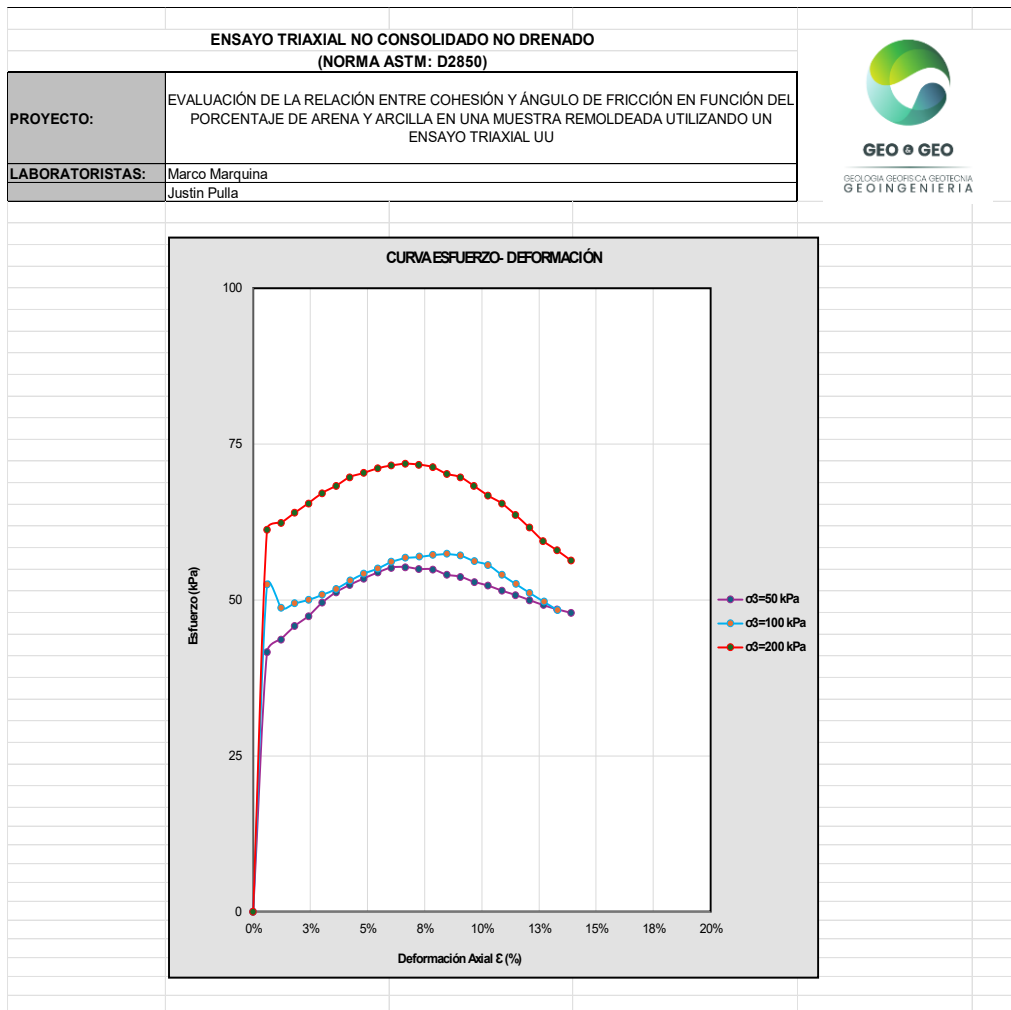
Mezcla 4 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - 50% Arcilla - 50% Arena.



Nota. La figura 33 muestra la envolvente de falla obtenida mediante el ensayo triaxial UU para una muestra de 50% arcilla y 50% arena, con una humedad del 45%. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura 34

Mezcla 4 - Curva Esfuerzo-Deformación - 50% Arcilla - 50% Arena.



Nota. La figura 34 muestra las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de la muestra de 50% arcilla y 50% arena, sometidas a tres niveles de carga: 50,100,200 kPa, en el ensayo triaxial UU.

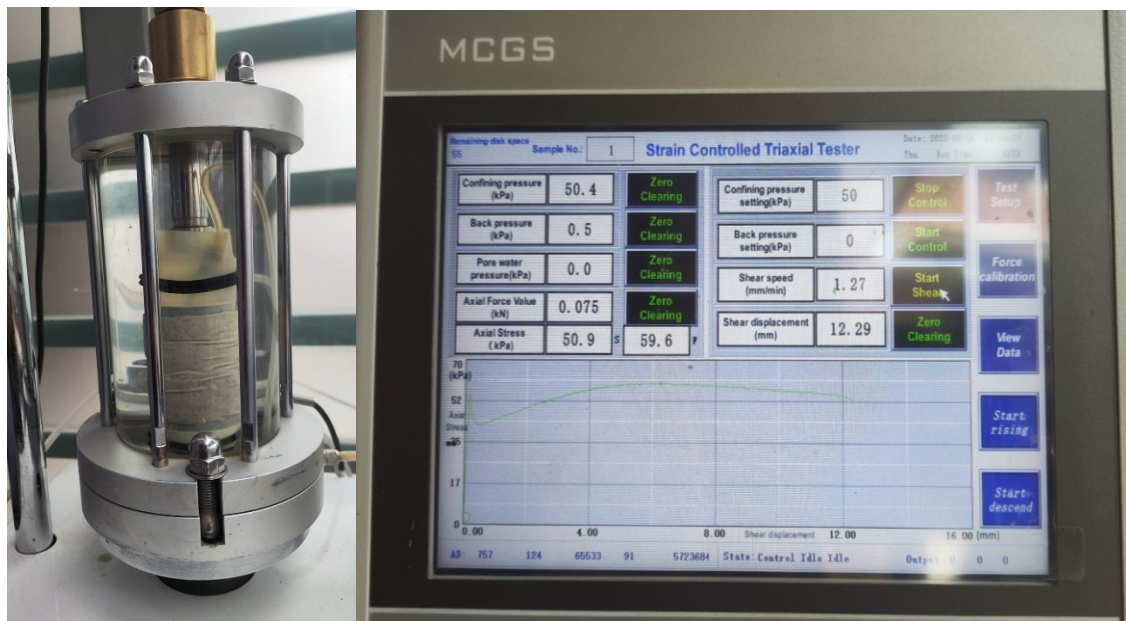
Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Contrario a lo esperado, se registró un ligero aumento en la cohesión respecto a las mezclas anteriores, pero un descenso considerable en el ángulo de fricción, ubicándose en el valor más bajo de toda la serie. Este comportamiento sugiere que, en esta proporción específica, la estructura interna del suelo se ve altamente perturbada. La presencia igualitaria de arena y arcilla impide que alguno de los dos materiales forme una red dominante de resistencia, lo que genera una condición de inestabilidad interna.

La mezcla mostró una resistencia al corte fuertemente dependiente de la cohesión, mientras que la fricción perdió relevancia como mecanismo de soporte. Este resultado puede estar relacionado con la interferencia entre partículas de diferente tamaño, que impiden una correcta transferencia de esfuerzos tanto en la matriz arcillosa como en los puntos de contacto granular.

Figura 35

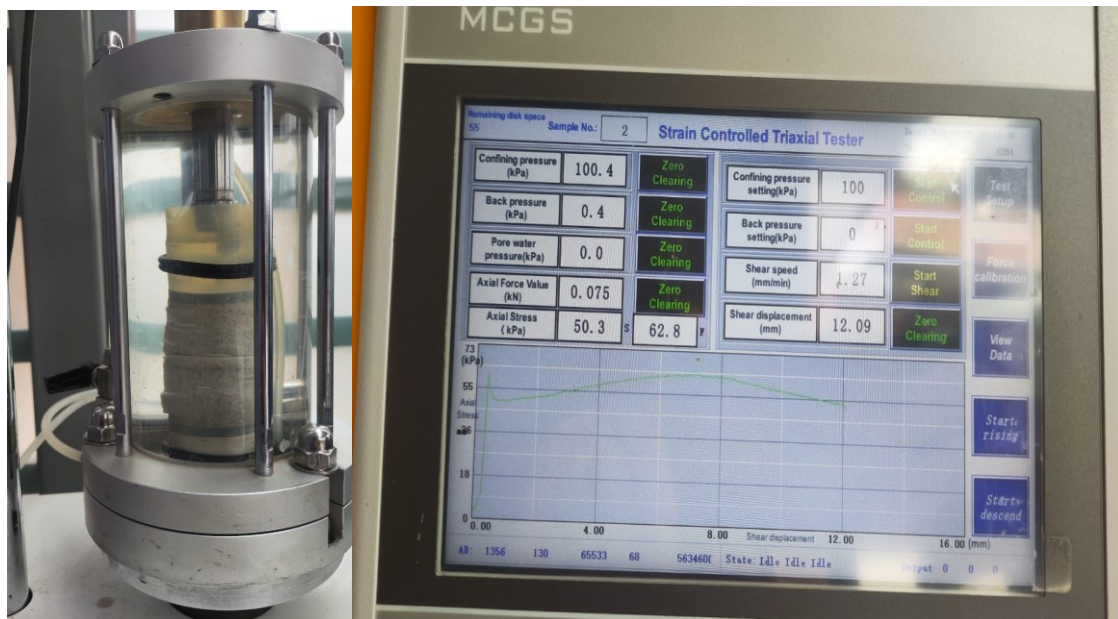
Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 50% Arcilla - 50% Arena - Carga 50 kPa.



Nota. La figura 35 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 4), compuesta por 50% arcilla, 50% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 50 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

Figura 36

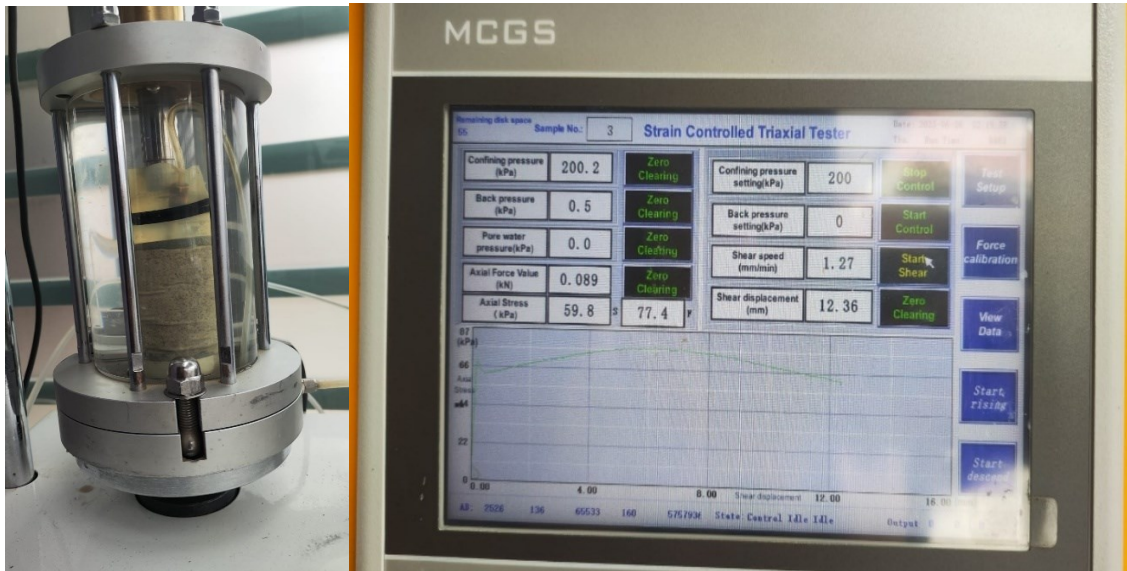
Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 50% Arcilla - 50% Arena - Carga 100 kPa.



Nota. La figura 36 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 4), compuesta por 50% arcilla, 50% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 100 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

Figura 37

Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 50% Arcilla - 50% Arena - Carga 200 kPa.



Nota. La figura 37 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 4), compuesta por 50% arcilla, 50% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 200 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

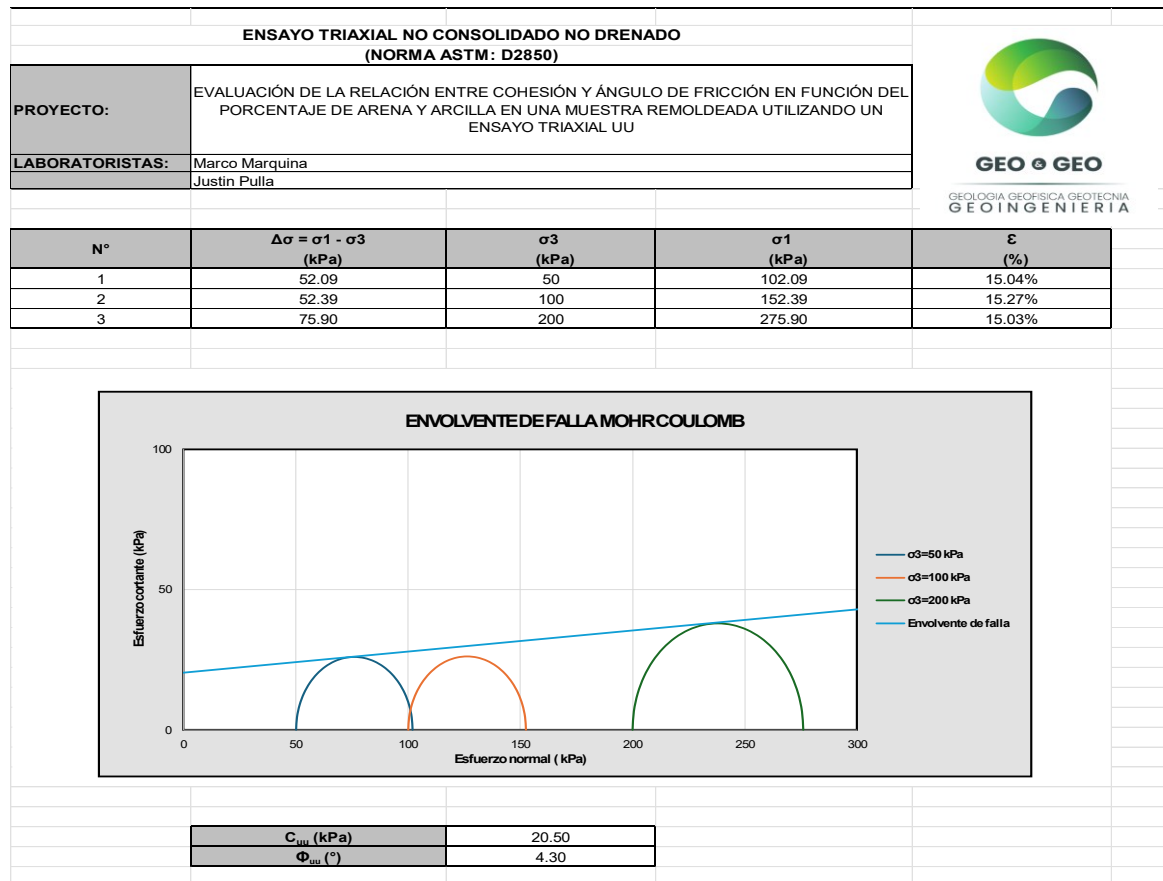
13.5 Mezcla 40% arcilla – 60% arena – 45% humedad

Esta combinación estuvo compuesta por 40 % de arcilla bentonita y 60 % de arena retenida en el tamiz N.º 40, con un contenido de humedad constante de 45 %. En esta mezcla, el componente granular ya representa la mayor parte del volumen total, por lo que se esperaba una transición hacia un comportamiento más dominado por la fricción.

Los resultados del ensayo triaxial UU fueron:

Figura 38

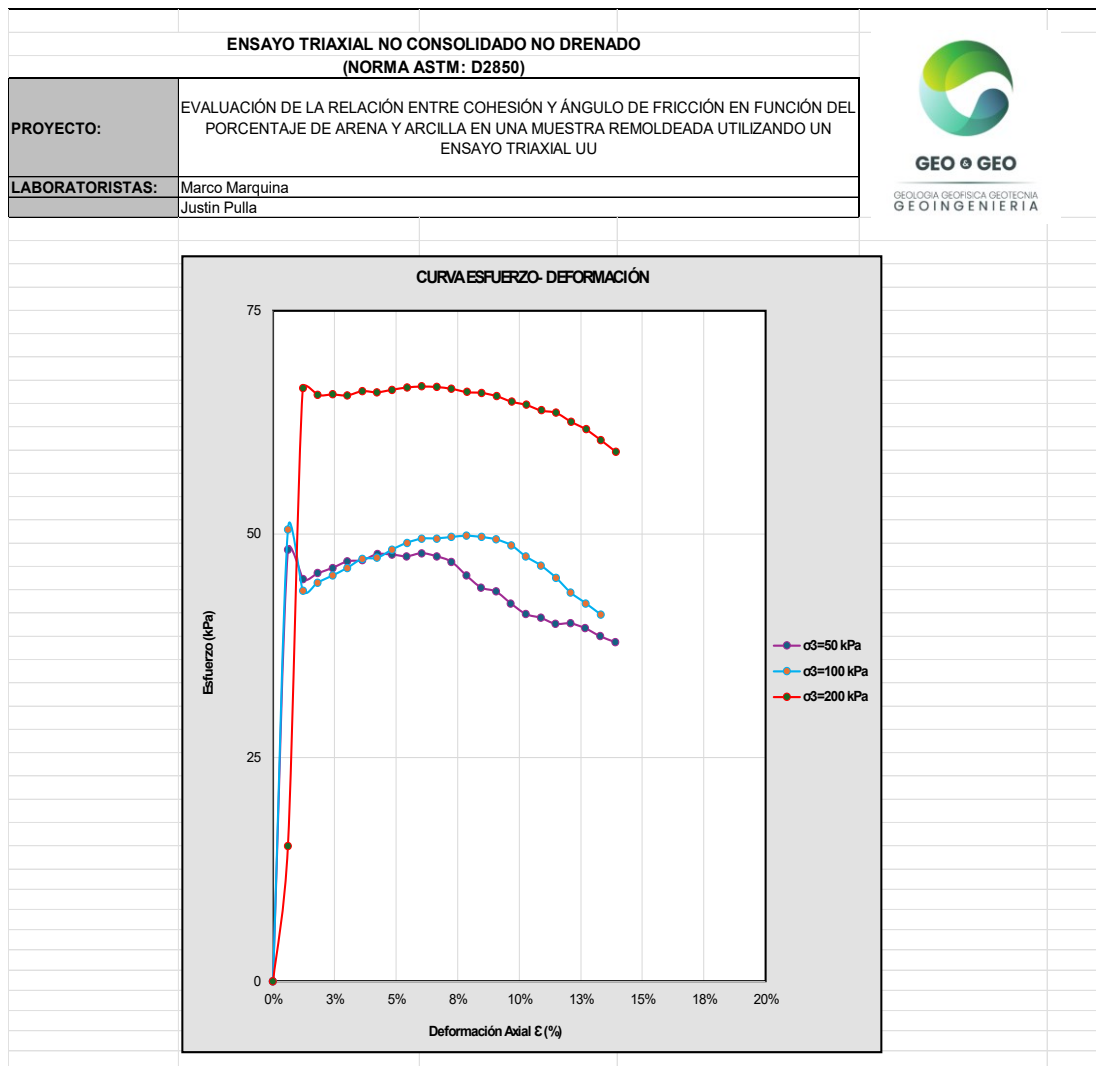
Mezcla 5 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - 40% Arcilla - 60% Arena.



Nota. La figura 38 muestra la envolvente de falla obtenida mediante el ensayo triaxial UU para una muestra de 40% arcilla y 60% arena, con una humedad del 45%. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura 39

Mezcla 5 - Curva Esfuerzo-Deformación - 40% Arcilla - 60% Arena.



Nota. La figura 39 muestra las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de la muestra de 40% arcilla y 60% arena, sometidas a tres niveles de carga: 50,100,200 kPa, en el ensayo triaxial UU. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

La cohesión presentó una disminución moderada respecto a las mezclas con mayor proporción de arcilla, lo cual indica que el efecto cohesivo comienza a perder dominio estructural. Sin embargo, el ángulo de fricción, aunque ligeramente mayor que en la mezcla 50–50, sigue siendo bajo para una muestra con predominancia de arena, lo que sugiere que la fricción todavía no logra establecerse como el mecanismo principal de resistencia.

Este comportamiento puede deberse a que, aunque la arena es mayoritaria, la arcilla aún ocupa un volumen suficiente como para influir negativamente en los contactos intergranulares, generando lubricación entre partículas o reteniendo agua que impide la transferencia eficiente de esfuerzos.

Figura 40

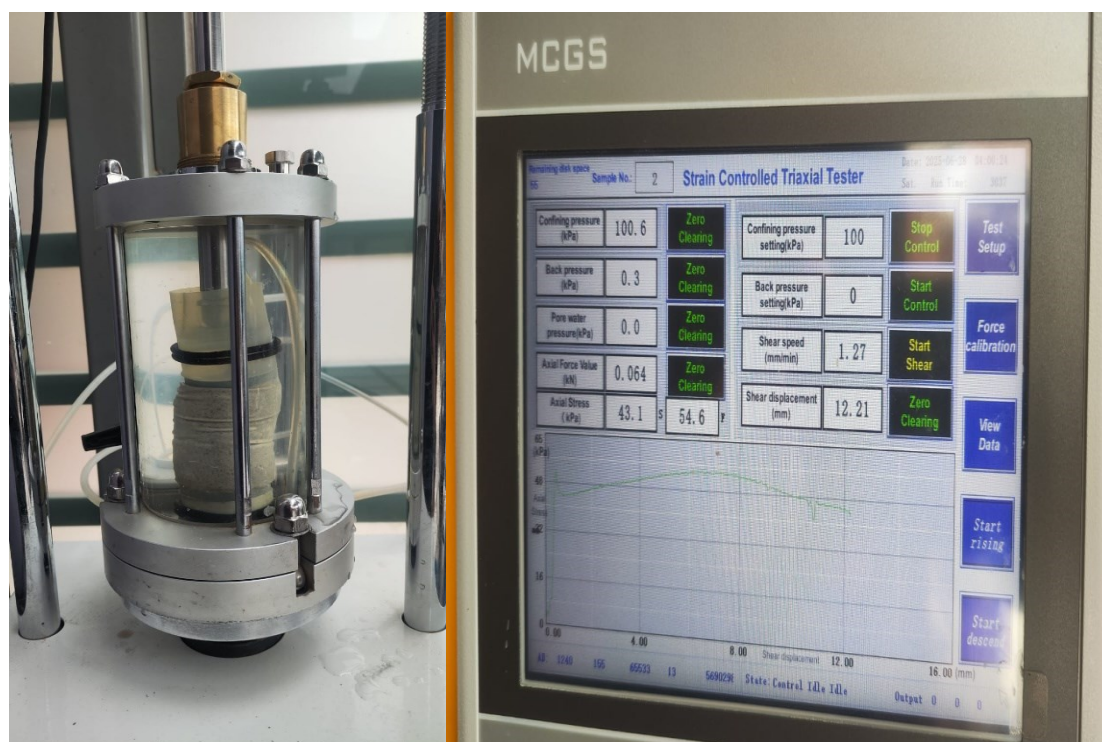
Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 40% Arcilla - 60% Arena - Carga 50 kPa.



Nota. La figura 40 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 5), compuesta por 40% arcilla, 60% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 50 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

Figura 41

Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 40% Arcilla - 60% Arena - Carga 100 kPa.



Nota. La figura 41 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 5), compuesta por 40% arcilla, 60% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 100 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

Figura 42

Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 40% Arcilla - 60% Arena - Carga 200 kPa.



Nota. La figura 42 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 5), compuesta por 40% arcilla, 60% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 200 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

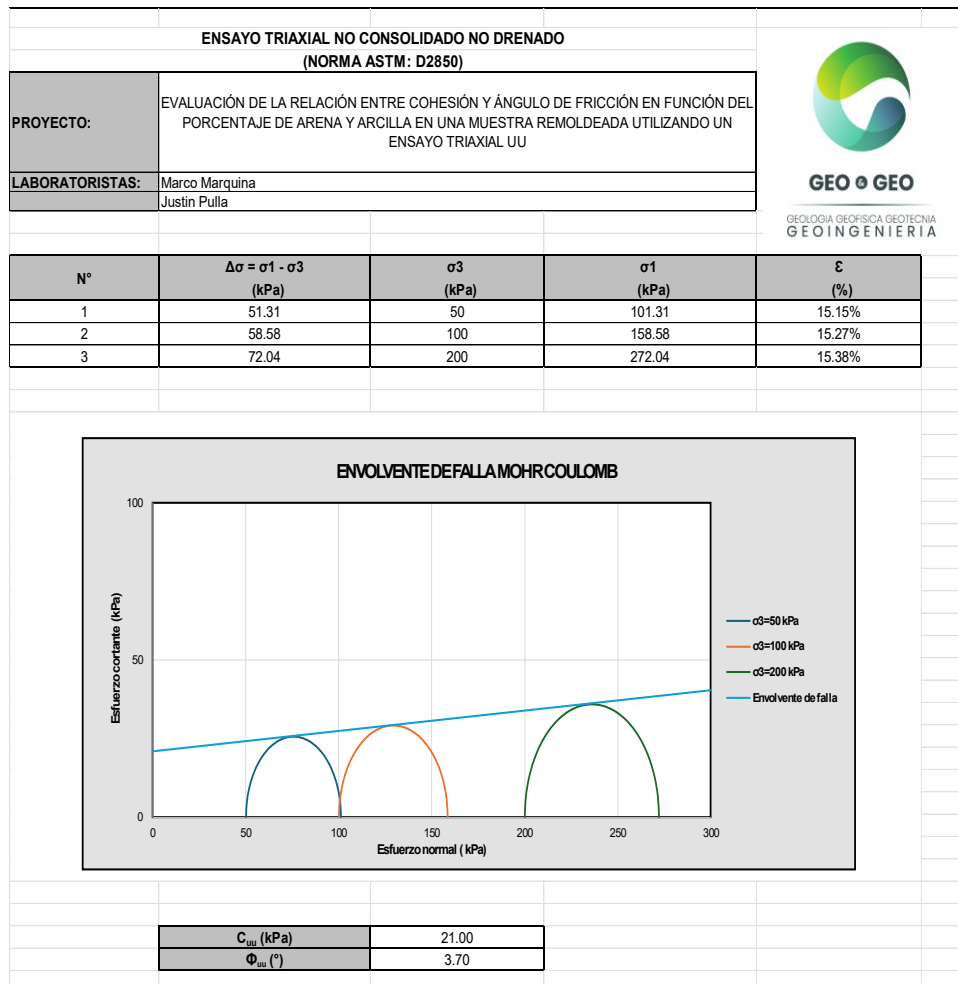
13.6 Mezcla 20% arcilla – 80% arena – 45% humedad

Esta mezcla fue compuesta por 20 % de arcilla bentonita y 80 % de arena retenida en el tamiz N.º 40. Se mantuvo el contenido de humedad en 45 %, como en las mezclas anteriores. En esta proporción, se esperaba que el comportamiento comenzara a reflejar un dominio del componente granular.

Los resultados del ensayo triaxial UU fueron:

Figura 43

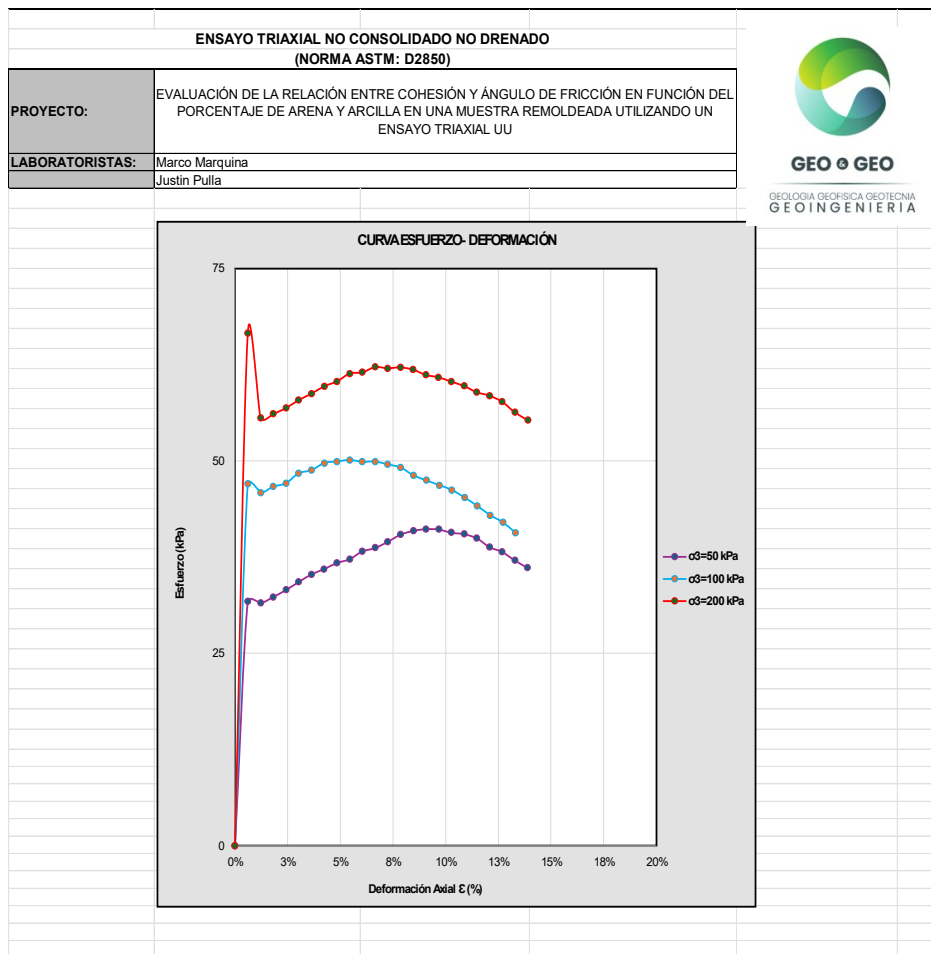
Mezcla 6 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - 20% Arcilla - 80% Arena.



Nota. La figura 43 muestra la envolvente de falla obtenida mediante el ensayo triaxial UU para una muestra de 20% arcilla y 80% arena, con una humedad del 45%. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura 44

Mezcla 5 - Curva Esfuerzo-Deformación - 20% Arcilla - 80% Arena.



Nota. La figura 44 muestra las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de la muestra de 20% arcilla y 80% arena, sometidas a tres niveles de carga: 50,100,200 kPa, en el ensayo triaxial UU. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

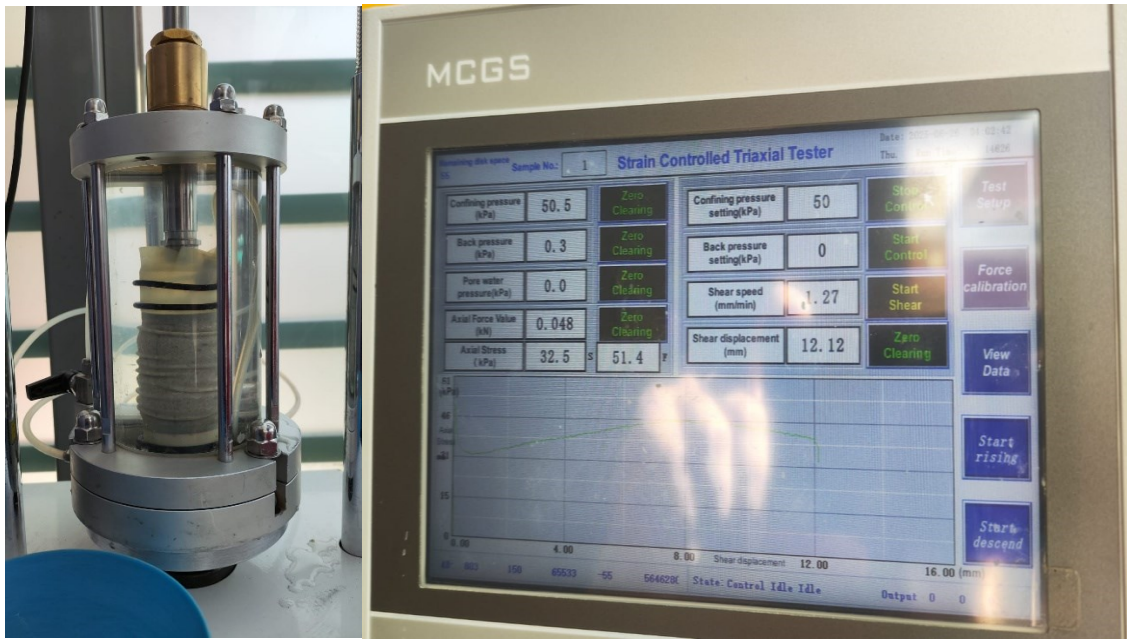
Sorprendentemente, pese a la alta proporción de arena, la cohesión permaneció relativamente alta, y el ángulo de fricción fue más bajo de lo esperado para una mezcla con predominancia granular. Esto sugiere que incluso un 20 % de arcilla altamente plástica es suficiente para para modificar el comportamiento no cohesivo del suelo, generando una matriz que aún depende en gran medida de la cohesión como mecanismo de resistencia.

La interacción entre las partículas de arcilla y arena puede estar provocando una interferencia negativa en los puntos de contacto granular, impidiendo que la fricción se manifieste plenamente.

Además, la alta humedad empleada favorece la saturación de la arcilla y reduce la eficacia del contacto entre granos, lo que explicaría la baja fricción registrada.

Figura 45

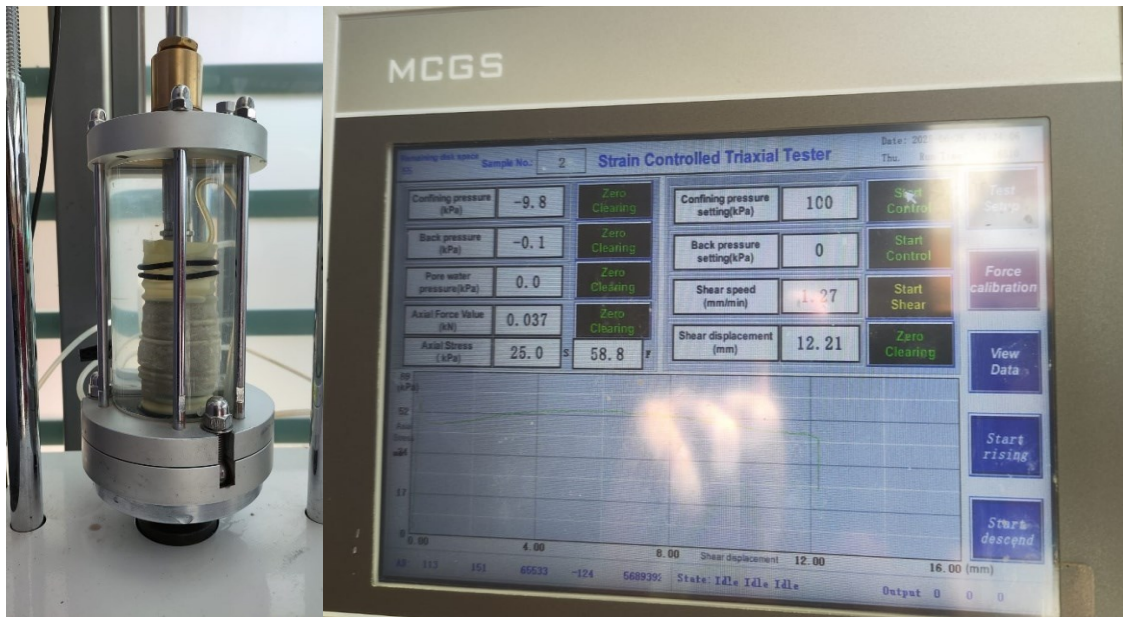
Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 20% Arcilla - 80% Arena - Carga 50 kPa.



Nota. La figura 45 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 6), compuesta por 20% arcilla, 80% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 50 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

Figura 46

Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 20% Arcilla - 80% Arena - Carga 100 kPa.



Nota. La figura 46 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 6), compuesta por 20% arcilla, 80% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 100 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

Figura 47

Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 20% Arcilla - 80% Arena - Carga 200 kPa.



Nota. La figura 47 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 6), compuesta por 20% arcilla, 80% arena y 45% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 200 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

13.7 Mezcla 0% arcilla – 100% arena – 8% humedad

La última muestra fue elaborada exclusivamente con arena retenida en el tamiz N.º 40, sin presencia de arcilla. Esta configuración permitió evaluar el comportamiento de un material puramente granular bajo condiciones de carga rápida. A diferencia del resto de las mezclas, se utilizó un contenido de humedad del 8 %, valor suficiente para permitir la manipulación, homogeneización y compactación adecuada del material. El empleo de este porcentaje reducido se justifica en función de la naturaleza no cohesiva de la arena, ya que una humedad del 45 %, como la utilizada en las mezclas con arcilla, generó un exceso de agua libre que impide una compactación eficiente. Por tanto, se optó por un valor más representativo del estado óptimo de trabajo para suelos arenosos, asegurando así resultados mecánicos realistas y comparables bajo el mismo protocolo de ensayo.

Figura 48

Mezcla de arena con 45 % de contenido de agua durante la preparación.



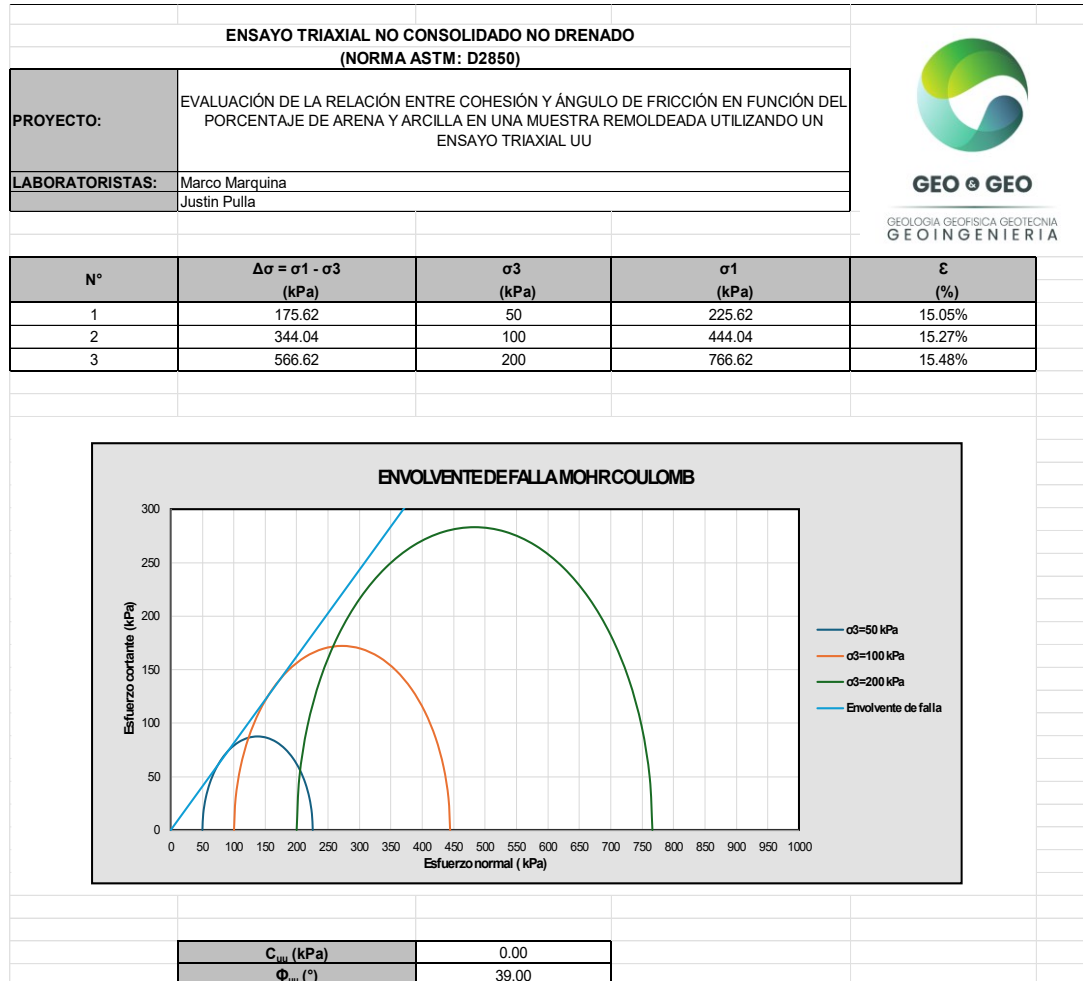
Nota. En la figura 48 se observa la presencia excesiva de agua libre en la superficie, característica muestra saturada. Esta consistencia impide la compactación adecuada del material granular, razón por la cual se optó por un contenido reducido del 8 % en la muestra de 100 % arena.

Elaborado por: Los Autores

Los resultados del ensayo triaxial UU fueron:

Figura 49

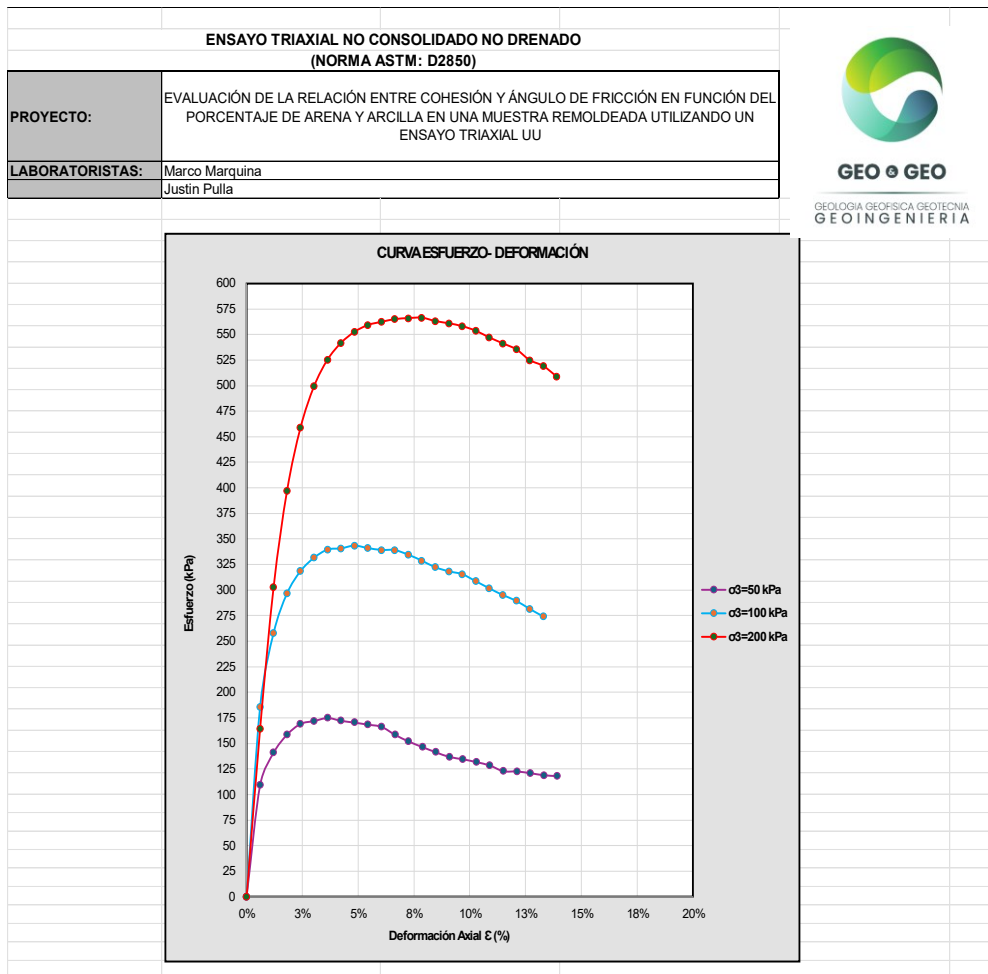
Mezcla 7 - Envolvente Falla Mohr Coulomb - 0% Arcilla - 100% Arena.



Nota. La figura 49 muestra la envolvente de falla obtenida mediante el ensayo triaxial UU para una muestra de 100% arena, con una humedad del 8%. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura 50

Mezcla 7 - Curva Esfuerzo-Deformación - 0% Arcilla - 100% Arena.



Nota. La figura 50 muestra las curvas esfuerzo-deformación obtenidas de la muestra de 0% arcilla y 100% arena, sometidas a tres niveles de carga: 50,100,200 kPa, en el ensayo triaxial UU. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

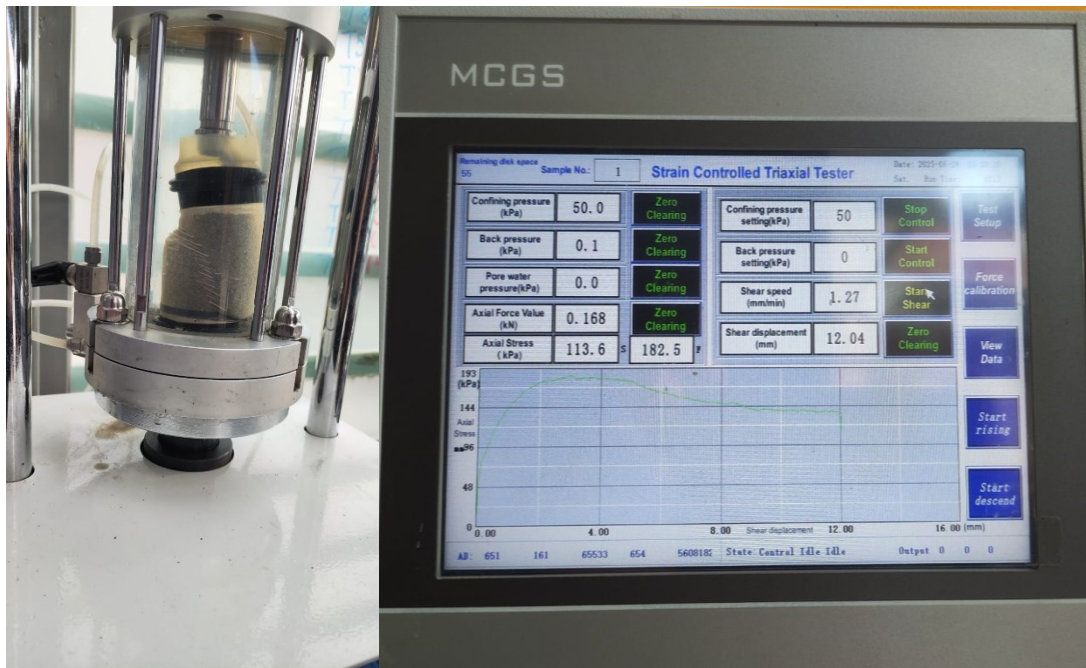
Tal como se esperaba, la cohesión fue nula, lo que confirma que el material no presentaba adherencia entre partículas y se comportó como un suelo sin cohesión, dominado por la fricción. El ángulo de fricción fue alto (39°), reflejando una buena resistencia interna al corte, propia de materiales granulares limpios y bien compactados.

Durante la prueba se observó una ruptura nítida y localizada, sin deformaciones progresivas ni expansión significativa. Este comportamiento es característico de arenas con baja humedad, donde la fricción entre granos domina completamente la resistencia al corte.

Este resultado sirve como punto de comparación directo con la muestra 100 % arcilla, permitiendo delimitar el rango completo de variación de los parámetros mecánicos dentro del conjunto de mezclas analizadas.

Figura 51

Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 0% Arcilla - 100% Arena - Carga 50 kPa.



Nota. La figura 51 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 7), compuesta por 0% arcilla, 100% arena y 8% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 50 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

Figura 52

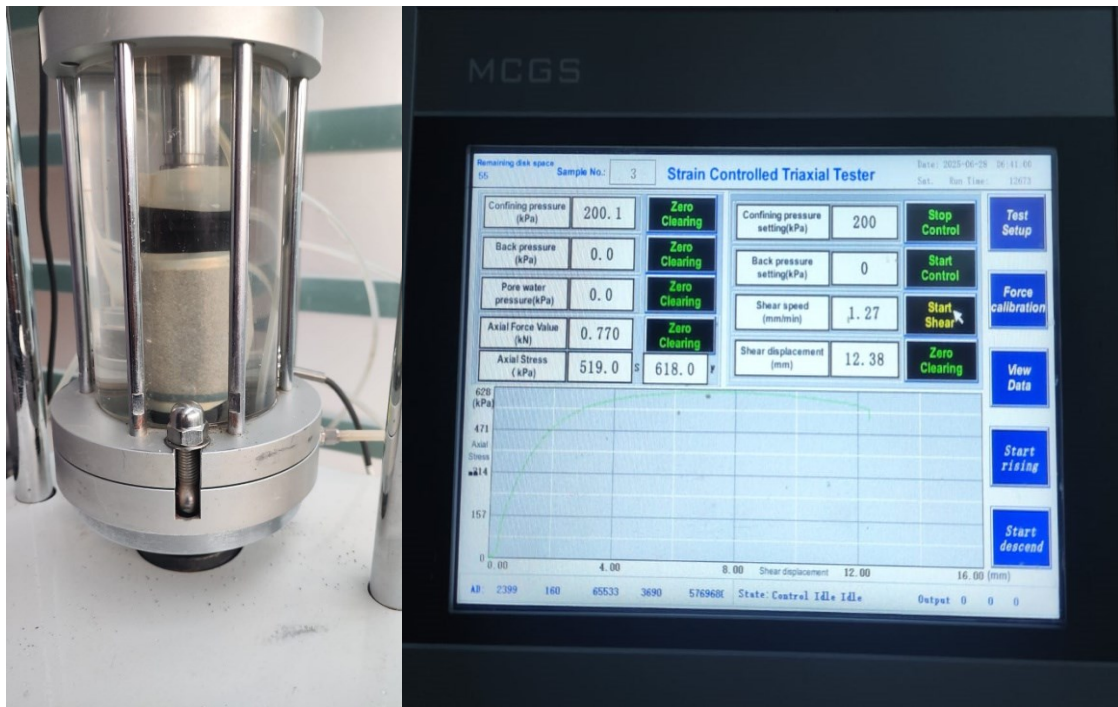
Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 0% Arcilla - 100% Arena - Carga 100 kPa.



Nota. La figura 52 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 7), compuesta por 0% arcilla, 100% arena y 8% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 100 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

Figura 53

Ensayo triaxial - Muestra conformada por: 0% Arcilla - 100% Arena - Carga 200 kPa.



Nota. La figura 53 muestra la cámara triaxial durante el ensayo aplicado a la probeta (mezcla 7), compuesta por 0% arcilla, 100% arena y 8% de humedad. El ensayo se realizó con una presión confinante de 200 kPa. Fuente: GEO & GEO Cía. Ltda. (2025).

13.8 Análisis

Tabla 3

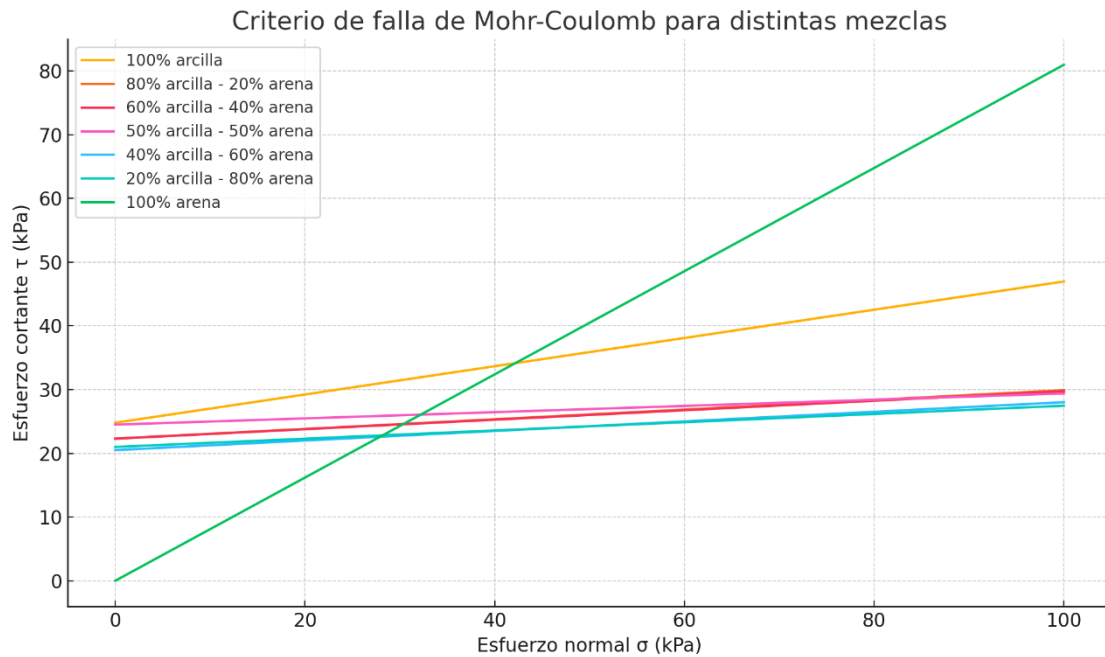
Tabla de resultados obtenidos.

N.º de Muestra	Porcentajes de las muestras	Cohesión (C)	Ángulo de fricción (ϕ)	% 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. En la tabla 3 se puede observar los resultados obtenidos de todos los ensayos triaxiales elaborados. Elaborado por: Los Autores.

Figura 54

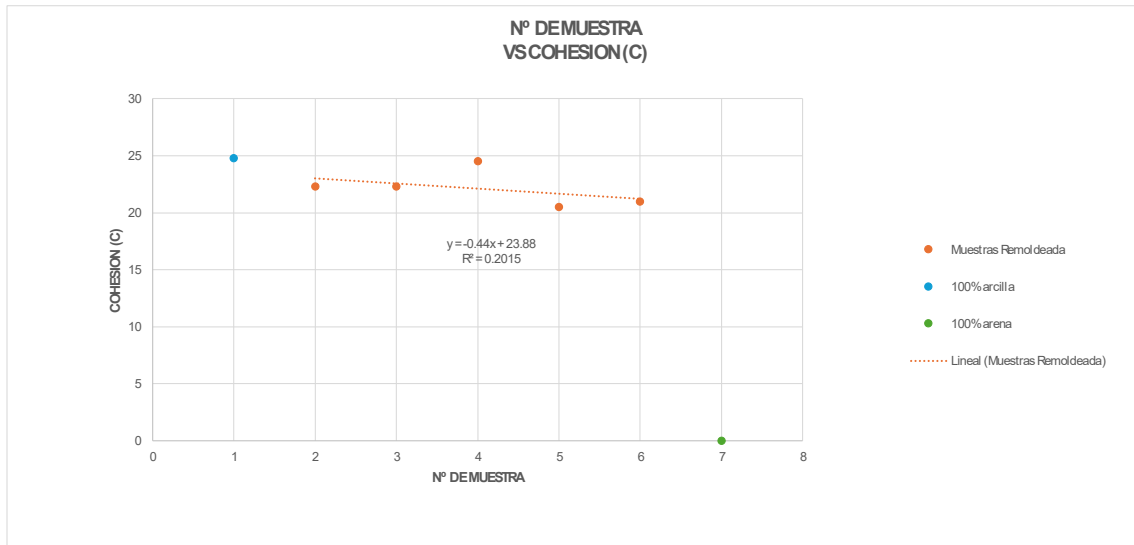
Comparación de criterios de falla de Mohr coulomb, para cada una de las muestras.



Nota. En la figura 54 se puede observar que todos los criterios de falla de las mezclas son muy similares, es decir, la resistencia de los materiales no se ve afectada de manera significativa con la inclusión de arena. Elaborado por: Los Autores.

Figura 55

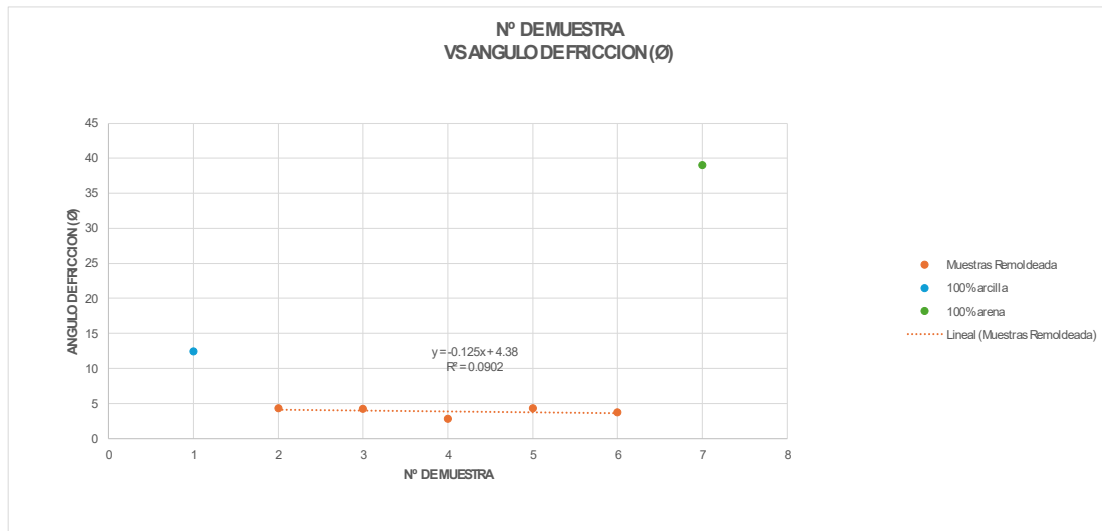
Relación entre el porcentaje de arena y la cohesión (C).



Nota. En la figura 55 se observa una tendencia ligeramente decreciente de la cohesión conforme aumenta el contenido de arena en las mezclas remoldeadas. Aunque existen ligeras fluctuaciones en los datos (como en la mezcla 50–50), la línea de tendencia sugiere una pérdida progresiva de la capacidad cohesiva a medida que el suelo deja de estar dominado por finos plásticos. Las muestras extremas (100 % arcilla y 100 % arena) no fueron consideradas en la regresión para evitar distorsión en el modelo. Elaborado por: Los Autores.

Figura 56

Relación entre el porcentaje de arena y el ángulo de fricción (ϕ).



Nota. En la figura 56 se observa que el ángulo de fricción muestra una tendencia prácticamente constante —incluso ligeramente descendente— entre las mezclas remoldeadas. Esto refleja que, en mezclas con contenidos combinados, no se logra consolidar una red estructural eficiente de fricción. El punto correspondiente a la muestra de 100 % arena se visualiza claramente separado, fuera de la tendencia, con un valor alto que confirma el carácter netamente friccional del suelo granular puro. Elaborado por: Los Autores.

En la Figura 55, la cohesión (C) exhibe una tendencia general decreciente conforme se incrementa el contenido de arena en las mezclas remoldeadas. El mayor valor corresponde a la muestra de 100 % arcilla (24.8 kPa), mientras que la cohesión disminuye progresivamente a medida que se introduce material granular. Si bien la mezcla 50–50 presenta un valor ligeramente elevado (24.5 kPa), este comportamiento puntual podría estar asociado a condiciones de compactación o distribución interna de partículas, sin representar una alteración significativa en la tendencia general. La muestra compuesta por 100 % arena presentó cohesión nula, lo cual es característico de suelos puramente granulares, en los que la resistencia al corte se debe exclusivamente al contacto entre partículas y no a enlaces cohesivos.

Por su parte, la Figura 56 muestra que el ángulo de fricción (ϕ) sigue una tendencia lineal e incluso se muestra que hay una disminución en la característica del ángulo de fricción ϕ de las mezclas remodeladas. Las muestras con mayor contenido de arcilla mantienen valores bajos de ϕ , lo cual es atribuible a la dominancia de finos plásticos que limitan el desarrollo de fricción interna. A pesar de aumentar la proporción de arena, no se observa un incremento progresivo del ángulo, y en combinaciones como la de 50 % arcilla - 50 % arena, el valor de ϕ incluso disminuye notoriamente. Este fenómeno sugiere que en estas mezclas no se alcanza una estructura granular estable, sino una transición con baja eficiencia en la transmisión de esfuerzos por fricción. Solo la muestra compuesta por 100 % arena —no incluida en la tendencia— refleja el comportamiento típico de materiales granulares, alcanzando un valor de 39° , atribuible a un mecanismo de resistencia exclusivamente friccional.

En conjunto, ambos diagramas evidencian que la evolución del comportamiento mecánico del suelo no sigue una progresión lineal entre los extremos cohesivo y granular. Las mezclas intermedias no representan una transición homogénea, sino estados estructurales complejos que pueden comprometer la resistencia del material. Por ello, resulta esencial caracterizar experimentalmente este tipo de suelos mixtos, ya que su desempeño bajo carga puede ser más crítico que el de los materiales puros.

14. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos a través del ensayo triaxial no consolidado-no drenado (UU) para las distintas proporciones de arcilla bentonita y arena permitieron observar un comportamiento no lineal en los parámetros de resistencia al corte. En general, se comprobó que:

La cohesión fue mayor en mezclas con alta proporción de arcilla, disminuyendo progresivamente a medida que se incorporaba arena, hasta llegar a 0 kPa en la muestra 100 % arena.

El ángulo de fricción mostró un comportamiento lineal en las mezclas analizadas, con valores especialmente bajos en proporciones intermedias (como 50 % arcilla – 50 % arena y 20 % arcilla – 80 % arena), mientras que los valores más altos se registraron en los extremos: 12.4° para la mezcla 100 % arcilla y 39° para la mezcla 100 % arena, alcanzando incluso 46.5° en la arena limpia retenida en el tamiz N.° 40.

Este patrón sugiere que la interacción entre partículas de distintos tamaños y comportamientos (cohesivos vs friccionales) genera una estructura interna transicional y, en ciertos casos, inestable, donde la fricción no manifiesta de forma dominante. Además, el uso de un contenido de humedad del (45 %) en todas las mezclas con arcilla influyó significativamente en la respuesta mecánica, provocando lubricación interna, reducción del contacto efectivo y, en consecuencia, disminución del ángulo de fricción. A pesar de estas condiciones controladas, los resultados obtenidos permitieron cumplir los objetivos planteados, al evidenciar cómo la variación en la proporción arena–arcilla influye directamente en los parámetros de resistencia al corte en suelos remoldeados, bajo condiciones no drenadas.

Si bien los resultados obtenidos guardan cierta correspondencia con observaciones reportadas en investigaciones previas, como las de (Dafalla, 2013; Ma et al., 2011), es importante aclarar que el presente estudio no busca establecer una comparación directa con dichos trabajos. En este caso, las referencias fueron utilizadas únicamente como antecedentes teóricos para contextualizar el efecto de

la humedad y la composición del suelo en su resistencia al corte. A diferencia de los estudios mencionados, esta investigación se centró exclusivamente en evaluar el comportamiento mecánico de mezclas remoldeadas bajo una humedad constante, con el objetivo de proponer una metodología práctica para analizar la influencia de la proporción arena–arcilla en condiciones controladas. Por tanto, los resultados obtenidos constituyen un aporte experimental específico, orientado a ampliar el conocimiento sobre el comportamiento transicional de suelos compuestos, sin pretender replicar ni validar los enfoques de estudios con objetivos o condiciones distintas.

15. Cronograma de actividades a desarrollar

Tabla 4

Cronograma de actividades a desarrollar.

Tiempo Actividad	Mes 1				Mes 2				Mes 3				Mes 4			
	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4	S1	S2	S3	S4
Ejecutar ensayos triaxiales UU para determinar cohesión y ángulo de fricción.	x	x	x	x	x	x	x	x								
Revisión y correcciones del informe de investigación										x	x	x	x			
Adaptación a formato APA 7 ^{ma} edición														x	x	
Informe final																x

Nota. En la tabla 4 se muestra el cronograma establecido para las actividades a desarrollar en el trabajo de titulación. Elaborado por: Los Autores

16. Presupuesto

Tabla 5

Presupuesto

GEO & GEO			
GEOLOGIA GEOFISICA GEOTECNIA GEOINGENIERIA			
Descripción	Precio Unitario \$	N. de ensayos	Precio Final \$
Ensayo no consolidado no drenado (UU)	120	9	1080
Total			1080

Nota. En la tabla 5 se muestra el presupuesto de los ensayos triaxiales UU. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

17. Conclusiones

Se observó que la cohesión del suelo tiende a disminuir progresivamente con la incorporación de arena, lo cual es consistente con la pérdida del componente cohesivo dominante a medida que aumenta la fracción granular.

El ángulo de fricción no mostró una tendencia lineal, registrándose valores especialmente bajos en mezclas intermedias, lo que evidencia un comportamiento estructural transitorio y poco eficiente en términos de resistencia al corte.

Ambas fracciones de arena (pasa y retiene el tamiz N.º 40) mostraron comportamiento únicamente por fricción. Sin embargo, se seleccionó la fracción retenida por no aportar finos adicionales, ya que la arcilla cumplía esa función.

El contenido de humedad tuvo un papel determinante en los resultados. El uso de 45 % de humedad en las mezclas con arcilla recalcar el carácter cohesivo del suelo y redujo su fricción. El uso de un contenido de humedad constante del 45 % en las mezclas con arcilla influyó directamente en el comportamiento mecánico observado, particularmente en la disminución del ángulo de fricción. Este valor, si bien permitió mantener condiciones homogéneas durante los ensayos, no representa necesariamente el estado óptimo de los suelos. Por ello, se recomienda que futuras investigaciones incorporen variaciones controladas de humedad para evaluar su influencia directa sobre la resistencia al corte y la fricción.

Si bien el presente estudio se fundamenta en metodologías ampliamente reconocidas dentro de la mecánica de suelos, su contribución radica en la validación experimental aplicada a mezclas remodeladas con proporciones controladas de arena y arcilla, bajo condiciones específicas de humedad. Se determinó que estas mezclas no se comportan como una combinación lineal entre materiales puros, sino que atraviesan estados transicionales de baja resistencia que pueden comprometer la estabilidad si no son correctamente caracterizados. Este comportamiento es

especialmente relevante en contextos donde hay la existencia de suelos con contenido de arcilla o de arena.

Además, que la resistencia del suelo en estas condiciones está mayormente influenciada por la presencia de arcilla, dado que las mezclas con mayor contenido de este material —como la muestra de 100 % arcilla ($C = 24.8$ kPa)— presentaron los valores más altos de cohesión. En contraste, al aumentar la proporción de arena, la cohesión disminuyó gradualmente hasta alcanzar un valor nulo en la muestra 100 % granular. Por su parte, el contenido de humedad del 45 %, utilizado en todas las mezclas con arcilla, demostró tener un efecto limitante sobre el desarrollo de fricción interna, reflejándose en ángulos de fricción bajos incluso en mezclas con proporciones significativas de arena. Esto sugiere que, bajo condiciones no drenadas, la humedad actúa como un factor dominante en la respuesta mecánica del suelo, afectando la transmisión de esfuerzos internos. Por tanto, el control preciso de este parámetro es fundamental para asegurar que los resultados obtenidos en laboratorio sean representativos del comportamiento real en campo.

Se concluye que la humedad desempeña un papel fundamental en el comportamiento mecánico de las mezclas arena–arcilla, ya que el uso de un contenido constante del 45 % influyó directamente en la reducción del ángulo de fricción, incluso en mezclas con alta proporción de arena. Esta condición favoreció un comportamiento cohesivo generalizado, limitando la formación de estructuras friccionales efectivas. Además, al tratarse de un ensayo no consolidado y no drenado (UU), las muestras fueron sometidas a cargas rápidas sin disipación del agua dentro del suelo, lo que generó presión de poros que redujo la resistencia efectiva del material. Este efecto combinado entre humedad elevada y presión de poros no medida provocó una disminución notable en la fricción interna, lo que refuerza la necesidad de controlar ambos factores para obtener resultados coherentes.

18. Recomendaciones

- En estudios futuros sobre mezclas arena-arcilla, se recomienda realizar ensayos adicionales con distintos contenidos de humedad, especialmente cercanos al óptimo de compactación, con el fin de analizar su efecto en la resistencia al corte y obtener resultados más ajustados a condiciones reales de obra.
- Se sugiere utilizar otros tipos de arcilla con diferente plasticidad para comparar su influencia sobre la cohesión y el ángulo de fricción, y así ampliar la aplicabilidad de los resultados a distintas regiones geotécnicas.
- Para mejorar la interpretación del comportamiento transicional de las mezclas intermedias, sería útil aplicar métodos complementarios como el ensayo de corte directo o el consolidado-drenado (CD), lo cual permitiría observar el efecto del tiempo y del drenaje en la evolución de la resistencia.
- Se recomienda a profesionales en geotecnia considerar con cautela el uso de suelos compuestos con proporciones balanceadas entre cohesivos y granulares, ya que estas combinaciones pueden presentar resistencias más bajas que los materiales puros, afectando la estabilidad de estructuras si no se evalúan correctamente.
- Se recomienda realizar el mismo análisis utilizando ensayos triaxiales consolidados-drenados (CD) o consolidados no drenados (CU) con medición de presión de poros, lo cual permitiría observar la influencia del proceso de consolidación y del drenaje en la resistencia al corte del suelo, ampliando la comprensión del comportamiento real en condiciones más representativas del suelo.
- Se sugiere que, en investigaciones futuras, se profundice en el análisis del comportamiento de mezclas arena-arcilla mediante ensayos triaxiales consolidados drenados (CD) con medición de presión de poros, ya que estos métodos permitirían evaluar con mayor precisión el efecto del drenaje y la consolidación en la resistencia al corte. No obstante, se

debe considerar que los ensayos CD requieren un mayor tiempo de ejecución debido al proceso de consolidación y drenaje completo, lo cual puede representar una limitación operativa en entornos de laboratorio o cuando se dispone de tiempo restringido para el análisis.

19. Referencias

- Ahmad, W., & Uchimura, T. (2023). The Effect of Moisture Content at Compaction and Grain Size Distribution on the Shear Strength of Unsaturated Soils. *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 5123, 15(6), 5123. <https://doi.org/10.3390/SU15065123>
- ASTM D2216. (1998). *Método de prueba estándar para Determinación en Laboratorio de contenido de agua (humedad) de Suelos y Rocas en relación a su masa.*
- ASTM D2850. (2015). *Test Method for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils.* ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2850-15>
- Braja M. Das. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica Cuarta edición.*
- Campoverde Zeas, B. F. (2024). *Caracterización y estabilización de suelos expansivos en la zona de Chaullabamba y Miraflores de la ciudad de Cuenca.*
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/28841>
- Dafalla, M. A. (2013). Effects of Clay and Moisture Content on Direct Shear Tests for Clay-Sand Mixtures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013(1), 562726. <https://doi.org/10.1155/2013/562726>
- Donghwi, K., & Heejung, Y. (2018). Effect of clay content on the shear strength of clay–sand mixture. *International Journal of Geo-Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/S40703-018-0087-X>
- Gad Municipal de Cuenca. (2022). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca.*
<https://www.cuenca.gob.ec/content/pdot-pugs-2022>
- Georgiannou, V. N., Burland, J. B., & Hight, D. W. (1990). The undrained behaviour of clayey sands in triaxial compression and extension. *Geotechnique*, 40(3), 431–449. <https://doi.org/10.1680/GEOT.1990.40.3.431>

- Jagodnik, V., Marušić, D., Peranić, J., Prodan, M. V., & Arbanas, Ž. (2024). *Cyclic properties of sand-clay mixtures at low confining stresses Propriétés cycliques des mélanges sable-argile à faibles contraintes de confinement*. <https://doi.org/10.1201/9781003431749>
- Ma, G. W., Li, J. C., & Zhao, J. (2011). Three-phase medium model for filled rock joint and interaction with stress waves. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 35(1), 97–110. <https://doi.org/10.1002/NAG.941>
- Maturrano Vilchez, A. J., & Rojas Medina, B. M. (2022). Análisis comparativo de ensayos triaxial, compresión no confinada y corte directo para suelos granulares y finos Puente Piedra – Lima 2022. *Repositorio Institucional - UCV*. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/106949>
- Peña Rojas, K. J., & Pérez Ballen, I. K. (2012). *Comparación de los parámetros de resistencia al corte obtenidos en los ensayos de corte directo y triaxial de una arena arcillosa*.
- Rathnam, C. A., & Suresh, K. (2007). Shear Strength Behaviour of Sand Clay Mixture. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (An ISO, 3297)*. <https://doi.org/10.15680/IJRSET.2015.0406117>
- Ullmann, S., Schmidt, S., & Herle, I. (2025). Triaxial Compression of Sand-Fines Mixtures at Low Confining Pressures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43(6), 267. <https://doi.org/10.1007/S10706-025-03251-7>

20. Anexo A

Este anexo contiene una serie de fotografías tomadas durante el desarrollo de los ensayos triaxiales no consolidado-no drenado (UU), realizados en laboratorio. Se documentan visualmente:

Figura A 1

Preparación del material de arcilla bentonita para su homogenización previa al ensayo triaxial.



Nota. Se utilizó una espátula metálica para deshacer grumos y garantizar una distribución uniforme de humedad antes del moldeo. Fuente: Elaborado por: Los Autortes.

Figura A 2

Ingreso del suelo remoldeado al molde cilíndrico mediante embudo y papel cónico.



Nota. El procedimiento busca facilitar el llenado uniforme del molde sin pérdida de material ni generación de vacíos, previo al proceso de compactación por capas. Fuente: Elaborado por: Los Autortes.

Figura A 3

Vertido del suelo previamente mezclado en el molde de compactación.



Nota. Se utilizó un embudo cónico con una manga plástica como guía para introducir la muestra en el molde metálico sin pérdidas ni alteraciones de volumen, garantizando una preparación controlada y uniforme. Fuente: Elaborado por: Los Autortes.

Figura A 4

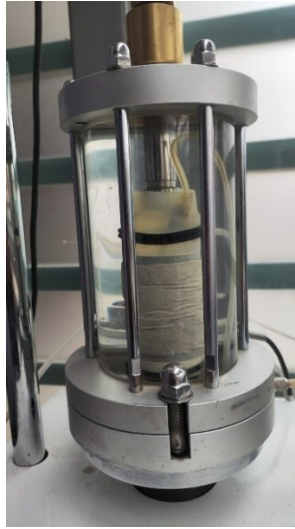
Montaje de la muestra remoldeada dentro del equipo triaxial.



Nota. Se observa la muestra recubierta con membrana de látex, colocada sobre el pedestal de la celda triaxial. Los anillos de sellado y las conexiones laterales garantizan la fijación adecuada y la ausencia de filtraciones durante el ensayo no consolidado-no drenado (UU). Fuente: Elaborado por: Los Autortes.

Figura A 5

Muestra instalada dentro de la celda triaxial antes de iniciar el ensayo.



Nota. La muestra remodelada, encapsulada con membrana de látex, ha sido posicionada y sellada dentro de la celda triaxial. El sistema está listo para aplicar la carga axial bajo condiciones no drenadas, conforme a la norma ASTM D2850-15. Fuente: Elaborado por: Los Autortes.

21. Anexo B

En este anexo se presenta el registro de datos crudos obtenidos a partir de los ensayos triaxiales UU realizados con diferentes proporciones de mezcla arena–arcilla. Los datos fueron generados por el equipo de ensayo controlado por deformación, e incluyen:

Figura B 1

Fragmento del registro de datos obtenidos en el ensayo triaxial UU – Muestra: Arena retenida, carga de 50 kPa.

MCGS_TIME	MCGS_TIMEMS	Test_No	h0	A	SIndex	σ ₃ _kPa	u0_kPa	u_kPa	Δσ ₁ _kPa	Deformacion_mmm	Phase	Fuerza (N)	ε (%)	Área corregida Ac (cm2)	Δσ = σ ₁ -σ ₃	ε (%)
07/06/2025 6:57		4 mp50r	80	12.6	1	50.463444	0	0	3.8277	0	0	4.822902	0	12.6	3.8277	0
07/06/2025 6:57		4 mp50r	80	12.6	1	50.463444	0	0	3.368198	0.004192	0	4.24392948	0.0000524	12.60066027	3.368021506	0.0000524
07/06/2025 6:57		4 mp50r	80	12.6	1	50.463444	0	0	3.979556	0.025202	0	5.01424056	0.000315025	12.60397057	3.97830234	0.000315025
07/06/2025 6:57		4 mp50r	80	12.6	1	50.463444	0	0	5.204307	0.021005	0	6.55742682	0.000262563	12.60330916	5.202940544	0.000262563
07/06/2025 6:57		4 mp50r	80	12.6	1	50.463444	0	0	7.80441	0.042011	0	9.8335566	0.000525138	12.60662021	7.800311612	0.000525138
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.463444	0	0	9.179243	0.06302	0	11.56584618	0.00078775	12.60993348	9.172012051	0.00078775
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.463444	0	0	12.388725	0.084032	0	15.6097935	0.0010504	12.61324896	12.37571188	0.0010504
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.463444	0	0	14.373257	0.105035	0	18.11030382	0.001312938	12.61656476	14.35438581	0.001312938
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.549267	0	0	14.675212	0.12604	0	18.49076712	0.0015755	12.61988263	14.6520912	0.0015755
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.549267	0	0	14.671352	0.147052	0	18.48590352	0.00183815	12.62320334	14.64438385	0.00183815
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.549267	0	0	15.889786	0.168055	0	20.02113036	0.002100688	12.62652438	15.85640653	0.002100688
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.549267	0	0	18.176798	0.189065	0	22.90276548	0.002363313	12.62984828	18.13384055	0.002363313
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.549267	0	0	18.019306	0.210072	0	22.70432556	0.0026259	12.63317345	17.9719891	0.0026259
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.549267	0	0	26.258512	0.23108	0	33.08572512	0.0028885	12.63650053	26.18266429	0.0028885
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.291798	0	0	49.755936	0.252092	0	62.69247936	0.00315115	12.63983	49.59914758	0.00315115
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.377621	0	0	69.273749	0.273101	0	87.28492374	0.003413763	12.64316075	69.03726487	0.003413763
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.120155	0	0	89.238913	0.294106	0	112.4410304	0.003676325	12.64649262	88.91084175	0.003676325
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.205978	0	0	106.143433	0.315118	0	133.7407256	0.003938975	12.64982735	105.7253367	0.003938975
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	49.948509	0	0	122.42919	0.336126	0	154.2607794	0.004201575	12.65316321	121.9147946	0.004201575
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	49.948509	0	0	137.486937	0.357133	0	173.2335406	0.004464163	12.65650068	136.873173	0.004464163
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.205978	0	0	151.927184	0.378138	0	191.4282518	0.004726725	12.65983958	151.209066	0.004726725
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.120155	0	0	164.531645	0.39915	0	207.3098727	0.004989375	12.66318136	163.7107349	0.004989375
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.205978	0	0	174.692591	0.420158	0	220.1126647	0.005251975	12.66652427	173.7751099	0.005251975
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.205978	0	0	181.498336	0.441167	0	228.6879034	0.005514588	12.6698691	180.4974475	0.005514588
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.205978	0	0	185.255999	0.462177	0	233.4225587	0.005777213	12.67321586	184.1857357	0.005777213
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.205978	0	0	188.250728	0.483184	0	237.1959173	0.0060398	12.67656391	187.1137313	0.0060398
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.205978	0	0	191.700287	0.504192	0	241.5423616	0.0063024	12.67991389	190.4921151	0.0063024
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.205978	0	0	196.212727	0.525197	0	247.228036	0.006564963	12.68326516	194.9245978	0.006564963
07/06/2025 6:58		5 mp50r	80	12.6	1	50.205978	0	0	200.722748	0.5462	0	252.9106625	0.0068275	12.68661788	199.3523134	0.0068275
07/06/2025 6:58		4 mp50r	80	12.6	1	50.205978	0	0	205.686436	0.567208	0	259.1649094	0.0070901	12.68997318	204.2280986	0.0070901

Nota. Se presenta una porción representativa del total de lecturas tomadas por el equipo Strain Controlled Triaxial Tester, correspondiente al ensayo con 50 kPa de presión de confinamiento. La tabla incluye datos de esfuerzo, deformación axial, área corregida y cálculo de parámetros mecánicos. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura B 2

Fragmento del registro de datos obtenidos en el ensayo triaxial UU – Muestra: Arena retenida, carga de 100 kPa.

MCGS_TIME	MCGS_TIMEMS	Test_No	h0	A	SIndex	σ ₃ _kPa	u0_kPa	u_kPa	Δσ ₁ _kPa	Δ ₁ _mm	Phase	Fuerza (N)	ε (%)	Área corregida Ac (cm ²)	Δσ = σ ₁ -σ ₃	ε (%)
15/06/2025 0:27	959	mp100r	80	12.6	2	100.068665	-0.090074	0	1.837295	0	0	2.3149917	0	12.6	1.837295	0
15/06/2025 0:27	958	mp100r	80	12.6	2	100.068665	-0.090074	0	1.837295	0	0	2.3149917	0	12.6	1.837295	0
15/06/2025 0:27	959	mp100r	80	12.6	2	100.068665	-0.090074	0	1.530999	0.004194	0	1.92905874	0.000052425	12.60066059	1.530918737	0.000052425
15/06/2025 0:27	958	mp100r	80	12.6	2	100.068665	-0.090074	0	0	0.025204	0	0	0.00031505	12.60397088	0	0.00031505
15/06/2025 0:27	959	mp100r	80	12.6	2	100.068665	-0.090074	0	-0.612078	0.046213	0	-0.77121828	0.000577663	12.60728275	-0.61172443	0.000577663
15/06/2025 0:27	958	mp100r	80	12.6	2	100.068665	-0.090074	0	-0.611917	0.067223	0	-0.77101542	0.000840288	12.61059653	-0.61140281	0.000840288
15/06/2025 0:27	959	mp100r	80	12.6	2	99.811195	-0.090074	0	0	0.088233	0	0	0.001102913	12.61391204	0	0.001102913
15/06/2025 0:27	958	mp100r	80	12.6	2	99.811195	-0.090074	0	1.834787	0.10924	0	2.31183162	0.0013655	12.61722883	1.832281598	0.0013655
15/06/2025 0:27	958	mp100r	80	12.6	2	99.811195	-0.090074	0	26.444564	0.13025	0	33.32015064	0.001628125	12.62054783	26.40150894	0.001628125
15/06/2025 0:27	958	mp100r	80	12.6	2	99.897018	-0.090074	0	55.716691	0.021005	0	70.20303066	0.000262563	12.60330916	55.70206189	0.000262563
15/06/2025 0:27	959	mp100r	80	12.6	2	99.897018	-0.090074	0	79.574358	0.042015	0	100.2636911	0.000525188	12.60662084	79.53256654	0.000525188
15/06/2025 0:27	958	mp100r	80	12.6	2	99.639557	-0.090074	0	101.583651	0.063022	0	127.9954003	0.000787775	12.60993379	101.5036259	0.000787775
15/06/2025 0:27	959	mp100r	80	12.6	2	99.725372	-0.090074	0	122.663662	0.08403	0	154.5562141	0.001050375	12.61324864	122.5348192	0.001050375
15/06/2025 0:28	958	mp100r	80	12.6	2	99.725372	-0.090074	0	142.662224	0.105044	0	179.7544022	0.00131305	12.61656618	142.4749014	0.00131305
15/06/2025 0:28	959	mp100r	80	12.6	2	99.982841	-0.090074	0	162.344526	0.126051	0	204.5541028	0.001575638	12.61988436	162.0887299	0.001575638
15/06/2025 0:28	958	mp100r	80	12.6	2	100.411949	-0.090074	0	180.641006	0.147065	0	227.6076676	0.001838313	12.6232054	180.3089314	0.001838313
15/06/2025 0:28	959	mp100r	80	12.6	2	100.154488	-0.090074	0	197.247208	0.168075	0	248.5314821	0.002100938	12.62652755	196.8328039	0.002100938
15/06/2025 0:28	958	mp100r	80	12.6	2	100.240311	-0.090074	0	210.94243	0.189082	0	265.7874618	0.002363525	12.62985097	210.4438623	0.002363525
15/06/2025 0:28	959	mp100r	80	12.6	2	100.240311	-0.090074	0	220.049265	0.210094	0	277.2620739	0.002626175	12.63317693	219.4713771	0.002626175
15/06/2025 0:28	958	mp100r	80	12.6	2	99.982841	-0.090074	0	227.624621	0.231103	0	286.8070225	0.002888788	12.63650418	226.9670618	0.002888788
15/06/2025 0:28	959	mp100r	80	12.6	2	100.240311	-0.090074	0	234.890686	0.252107	0	295.9622644	0.003151338	12.63983238	234.1504662	0.003151338
15/06/2025 0:28	958	mp100r	80	12.6	2	99.982841	-0.090074	0	242.458081	0.273116	0	305.4971821	0.00341395	12.64316313	241.6303412	0.00341395
15/06/2025 0:28	959	mp100r	80	12.6	2	99.982841	-0.090074	0	250.479064	0.29413	0	315.6036206	0.003676625	12.64649642	249.5581464	0.003676625
15/06/2025 0:28	958	mp100r	80	12.6	2	99.982841	-0.090074	0	258.190804	0.315138	0	325.320413	0.003939225	12.64983053	257.1737323	0.003939225
15/06/2025 0:28	959	mp100r	80	12.6	2	99.982841	-0.090074	0	266.050895	0.336147	0	335.2241277	0.004201838	12.65316655	264.9329924	0.004201838
15/06/2025 0:28	958	mp100r	80	12.6	2	99.982841	-0.090074	0	274.21166	0.357152	0	345.5066916	0.0044644	12.6565037	272.9874695	0.0044644

Nota. Se muestra un segmento representativo de las lecturas obtenidas para la muestra de arena retenida ensayada con una carga de confinamiento de 100 kPa. Los datos incluyen deformación axial, esfuerzo aplicado, área corregida y cálculo de esfuerzos diferenciales. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Figura B 3

Fragmento del registro de datos obtenidos en el ensayo triaxial UU – Muestra: Arena retenida, carga de 200 kPa.

MOGS_TIME	MOGS_TIMEMS	Test_No	h0	A	SIndex	σ ₃ _kPa	u0_kPa	u_kPa	σ ₁ - σ ₃ _kPa	A1_mm	Phase	Fuerza (N)	ε (%)	Área corregida Ac (cm ²)	Δσ = σ ₁ -σ ₃	ε (%)
15/06/2025 1:08	959	mp200r	80	12.6	3	200	0.270222	0	1.377973		0	1.73624598	0	12.6	1.377973	0
15/06/2025 1:10	959	mp200r	80	12.6	3	200.394791	0.270222	0	-0.765541		0	-0.96458166	0	12.6	-0.765541	0
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	200.394791	0.270222	0	0.3062	0.004192	0	0.385812	0.0000524	12.60066027	0.306183955	0.0000524
15/06/2025 1:10	959	mp200r	80	12.6	3	200.394791	0.270222	0	0.306119	0.025199	0	0.38570994	0.000314988	12.60397009	0.306022576	0.000314988
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	200.137329	0.270222	0	0.306039	0.046209	0	0.38560914	0.000577613	12.60728212	0.305862228	0.000577613
15/06/2025 1:10	959	mp200r	80	12.6	3	200.137329	0.270222	0	0.305959	0.067217	0	0.38550834	0.000840213	12.61059558	0.305701929	0.000840213
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	200.137329	0.270222	0	-0.152941	0.088222	0	-0.19270566	0.001102775	12.6139103	-0.15277234	0.001102775
15/06/2025 1:10	959	mp200r	80	12.6	3	200.137329	0.270222	0	0.305798	0.109231	0	0.38530548	0.001365388	12.6172274	0.305380467	0.001365388
15/06/2025 1:10	959	mp200r	80	12.6	3	200.137329	0.270222	0	0.152857	0.130235	0	0.19259982	0.001627938	12.62054546	0.152608158	0.001627938
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	200.223145	0.270222	0	0.152817	0.151242	0	0.19254942	0.001890525	12.62386573	0.152528096	0.001890525
15/06/2025 1:10	959	mp200r	80	12.6	3	200.223145	0.270222	0	0.152777	0.172254	0	0.19249902	0.002153175	12.62718855	0.152448044	0.002153175
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	200.223145	0.270222	0	1.832857	0.193261	0	2.30939982	0.002415763	12.63051232	1.828429253	0.002415763
15/06/2025 1:10	959	mp200r	80	12.6	3	200.223145	0.270222	0	3.053957	0.214269	0	3.84798582	0.002678363	12.633838	3.045777396	0.002678363
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	200.223145	0.270222	0	3.511128	0.235276	0	4.42402128	0.00294095	12.63716527	3.500801948	0.00294095
15/06/2025 1:10	959	mp200r	80	12.6	3	200.223145	0.270222	0	4.578527	0.256284	0	5.76894402	0.00320355	12.64049446	4.56385946	0.00320355
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	199.965683	0.270222	0	5.510442	0.021005	0	6.94315692	0.000262563	12.60330916	5.508995165	0.000262563
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	199.965683	0.270222	0	5.968076	0.042015	0	7.51977576	0.000525188	12.60662084	5.964941641	0.000525188
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	199.965683	0.270222	0	6.578457	0.063022	0	8.28885582	0.000787775	12.60993379	6.573274656	0.000787775
15/06/2025 1:10	959	mp200r	80	12.6	3	199.965683	0.270222	0	7.188517	0.08403	0	9.05753142	0.001050375	12.61324864	7.180966361	0.001050375
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	199.965683	0.270222	0	8.715699	0.105039	0	10.98178074	0.001312988	12.61656539	8.704255396	0.001312988
15/06/2025 1:10	959	mp200r	80	12.6	3	199.965683	0.270222	0	10.547808	0.126047	0	13.29023808	0.001575588	12.61988373	10.53118901	0.001575588
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	199.965683	0.270222	0	11.920474	0.147052	0	15.01979724	0.00183815	12.62320334	11.89856238	0.00183815
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	200.051498	0.270222	0	12.375695	0.168064	0	15.5933757	0.0021008	12.62652581	12.34969614	0.0021008
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	200.051498	0.270222	0	12.983426	0.189071	0	16.35911676	0.002363388	12.62984923	12.95274113	0.002363388
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	200.051498	0.270222	0	13.590831	0.210083	0	17.12444706	0.002626038	12.63317519	13.55514097	0.002626038
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	200.051498	0.270222	0	15.266574	0.231088	0	19.23588324	0.0028886	12.6365018	15.22247497	0.0028886
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	200.051498	0.270222	0	17.551938	0.252096	0	22.11544188	0.0031512	12.63983063	17.49662833	0.0031512
15/06/2025 1:10	958	mp200r	80	12.6	3	199.794037	0.270222	0	19.836094	0.273105	0	24.99347844	0.003413813	12.64316138	19.76837729	0.003413813
15/06/2025 1:10	959	mp200r	80	12.6	3	199.794037	0.270222	0	20.135958	0.294111	0	25.37130708	0.003676388	12.64649341	20.06193042	0.003676388

Nota. Se presenta una porción representativa de los datos obtenidos para la muestra de arena retenida bajo una carga de confinamiento de 200 kPa. La información registrada corresponde a los valores de deformación axial, carga aplicada y esfuerzos corregidos durante el desarrollo del ensayo. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 1

Resultados finales del ensayo triaxial UU – Arena retenida N40 ($\sigma_3 = 50, 100$ y 200 kPa)

ENSAYO TRIAXIAL NO CONSOLIDADO NO DRENADO (NORMA ASTM: D2850)			
Datos Iniciales			
Prueba kPa			
N°	1	2	3
σ_1	409.71	649.51	1270.47
σ_3	50	100	200
ϵ	15.06%	15.19%	15.35%
Radio	179.8538871	274.755359	535.234522
Centro	229.8538871	374.755359	735.234522

Nota. La tabla muestra los valores máximos de esfuerzo axial (σ_1), esfuerzo de confinamiento (σ_3), deformación axial (%), y los parámetros geométricos del círculo de Mohr (radio y centro) para cada carga aplicada. Estos valores fueron obtenidos a partir del análisis de los datos recolectados por el equipo triaxial conforme a la norma ASTM D2850. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 2

Esfuerzos normales y cortantes calculados para los tres niveles de carga en el ensayo triaxial

UU– Arena retenida N.º40.

Grados	Radianes	Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3	
		Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)
0	0.00	50.00	0.00	100.00	0.00	200.00	0.00
10	0.17	52.73	31.23	104.17	47.71	208.13	92.94
20	0.35	60.85	61.51	116.57	93.97	232.28	183.06
30	0.52	74.10	89.93	136.81	137.38	271.71	267.62
40	0.70	92.08	115.61	164.28	176.61	325.22	344.04
50	0.87	114.25	137.78	198.15	210.47	391.19	410.01
60	1.05	139.93	155.76	237.38	237.95	467.62	463.53
70	1.22	168.34	169.01	280.78	258.19	552.17	502.96
80	1.40	198.62	177.12	327.04	270.58	642.29	527.10
90	1.57	229.85	179.85	374.76	274.76	735.23	535.23
100	1.75	261.09	177.12	422.47	270.58	828.18	527.10
110	1.92	291.37	169.01	468.73	258.19	918.30	502.96
120	2.09	319.78	155.76	512.13	237.95	1002.85	463.53
130	2.27	345.46	137.78	551.36	210.47	1079.28	410.01
140	2.44	367.63	115.61	585.23	176.61	1145.25	344.04
150	2.62	385.61	89.93	612.70	137.38	1198.76	267.62
160	2.79	398.86	61.51	632.94	93.97	1238.19	183.06
170	2.97	406.98	31.23	645.34	47.71	1262.34	92.94
180	3.14	409.71	0.00	649.51	0.00	1270.47	0.00

Nota. Se muestran los valores de esfuerzo normal y esfuerzo cortante correspondientes a ángulos de 0° a 180°, con sus respectivos radianes, utilizados para la construcción de los círculos de Mohr de cada prueba. Las tres columnas por prueba reflejan los resultados obtenidos para las presiones de confinamiento de 50, 100 y 200 kPa, conforme a la norma ASTM D2850. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 3

Resultados finales del ensayo triaxial UU – Arena que pasa el tamiz N.º 40 ($\sigma_3 = 50, 100$ y 200 kPa).

ENSAYO TRIAXIAL NO CONSOLIDADO NO DRENADO (NORMA ASTM: D2850)			
Datos Iniciales			
Prueba kPa			
Nº	1	2	3
σ_1	411.00	676.02	1289.52
σ_3	50	100	200
ϵ	15.33%	15.40%	15.28%
Radio	180.5013064	288.010207	544.761595
Centro	230.5013064	388.010207	744.761595

Nota. La tabla presenta los valores máximos de esfuerzo axial (σ_1), esfuerzo de confinamiento (σ_3), deformación axial (%), así como los radios y centros de los círculos de Mohr para cada una de las pruebas. Estos datos corresponden a la muestra compuesta por el material que pasa el tamiz N.º 40, analizada conforme a la norma ASTM D2850. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 4

Esfuerzos normales y cortantes calculados – Arena que pasa el tamiz N.º 40 ($\sigma_3 = 50, 100$ y 200 kPa).

		Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3	
Grados	Radianes	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)
0	0.00	50.00	0.00	100.00	0.00	200.00	0.00
10	0.17	52.74	31.34	104.38	50.01	208.28	94.60
20	0.35	60.89	61.74	117.37	98.51	232.85	186.32
30	0.52	74.18	90.25	138.59	144.01	272.98	272.38
40	0.70	92.23	116.02	167.38	185.13	327.45	350.17
50	0.87	114.48	138.27	202.88	220.63	394.60	417.31
60	1.05	140.25	156.32	244.01	249.42	472.38	471.78
70	1.22	168.77	169.62	289.50	270.64	558.44	511.91
80	1.40	199.16	177.76	338.00	283.63	650.16	536.49
90	1.57	230.50	180.50	388.01	288.01	744.76	544.76
100	1.75	261.85	177.76	438.02	283.63	839.36	536.49
110	1.92	292.24	169.62	486.52	270.64	931.08	511.91
120	2.09	320.75	156.32	532.02	249.42	1017.14	471.78
130	2.27	346.53	138.27	573.14	220.63	1094.93	417.31
140	2.44	368.77	116.02	608.64	185.13	1162.07	350.17
150	2.62	386.82	90.25	637.43	144.01	1216.54	272.38
160	2.79	400.12	61.74	658.65	98.51	1256.67	186.32
170	2.97	408.26	31.34	671.64	50.01	1281.25	94.60
180	3.14	411.00	0.00	676.02	0.00	1289.52	0.00

Nota. Se presentan los valores calculados de esfuerzo normal y esfuerzo cortante en función del ángulo de análisis (0° – 180°), utilizados para construir los círculos de Mohr de cada prueba. Los resultados corresponden a la muestra que pasa el tamiz N.º 40, evaluada bajo condiciones de ensayo triaxial no consolidado-no drenado, según norma ASTM D2850. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 5

Resultados finales del ensayo triaxial UU – Muestra 100 % arcilla ($\sigma_3 = 50, 100$ y 200 kPa).

ENSAYO TRIAXIAL NO CONSOLIDADO NO DRENADO			
(NORMA ASTM: D2850)			
Datos Iniciales			
Prueba kPa			
N°	1	2	3
σ_1	138.35	239.43	371.51
σ_3	50	100	200
ϵ	15.17%	15.40%	15.21%
Radio	44.17732616	69.7139766	85.7570621
Centro	94.17732616	169.713977	285.757062

Nota. Se presentan los valores máximos de esfuerzo axial (σ_1), esfuerzo de confinamiento (σ_3), deformación axial (%), y los parámetros geométricos del círculo de Mohr (radio y centro) para cada carga aplicada. Esta muestra representa el comportamiento del suelo cohesivo puro bajo condiciones no drenadas, conforme a la norma ASTM D2850. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 6

Esfuerzos normales y cortantes calculados – Muestra 100 % arcilla ($\sigma_3 = 50, 100$ y 200 kPa).

		Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3	
Grados	Radianes	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)
0	0.00	50.00	0.00	100.00	0.00	200.00	0.00
10	0.17	50.67	7.67	101.06	12.11	201.30	14.89
20	0.35	52.66	15.11	104.20	23.84	205.17	29.33
30	0.52	55.92	22.09	109.34	34.86	211.49	42.88
40	0.70	60.34	28.40	116.31	44.81	220.06	55.12
50	0.87	65.78	33.84	124.90	53.40	230.63	65.69
60	1.05	72.09	38.26	134.86	60.37	242.88	74.27
70	1.22	79.07	41.51	145.87	65.51	256.43	80.59
80	1.40	86.51	43.51	157.61	68.65	270.87	84.45
90	1.57	94.18	44.18	169.71	69.71	285.76	85.76
100	1.75	101.85	43.51	181.82	68.65	300.65	84.45
110	1.92	109.29	41.51	193.56	65.51	315.09	80.59
120	2.09	116.27	38.26	204.57	60.37	328.64	74.27
130	2.27	122.57	33.84	214.53	53.40	340.88	65.69
140	2.44	128.02	28.40	223.12	44.81	351.45	55.12
150	2.62	132.44	22.09	230.09	34.86	360.02	42.88
160	2.79	135.69	15.11	235.22	23.84	366.34	29.33
170	2.97	137.68	7.67	238.37	12.11	370.21	14.89
180	3.14	138.35	0.00	239.43	0.00	371.51	0.00

Nota. Se muestran los valores de esfuerzo normal y esfuerzo cortante obtenidos en función del ángulo (0° – 180°) para cada una de las tres pruebas. Estos datos fueron utilizados para la construcción de los círculos de Mohr y el análisis del comportamiento del suelo cohesivo en condiciones no drenadas, conforme a la norma ASTM D2850. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 7

Resultados finales del ensayo triaxial UU – Mezcla 80 % arcilla y 20 % arena ($\sigma_3 = 50, 100$ y 200 kPa).

ENSAYO TRIAXIAL NO CONSOLIDADO NO DRENADO (NORMA ASTM: D2850)			
Datos Iniciales			
Prueba kPa			
N°	1	2	3
σ_1	106.48	159.99	280.74
σ_3	50	100	200
ϵ	15.02%	14.77%	15.22%
Radio	28.24227384	29.9969176	40.3681738
Centro	78.24227384	129.996918	240.368174

Nota. Se reportan los valores máximos de esfuerzo axial (σ_1), esfuerzo de confinamiento (σ_3), deformación axial (%), así como los parámetros geométricos de los círculos de Mohr (radio y centro) obtenidos en las tres pruebas. Este comportamiento corresponde a un suelo de naturaleza predominantemente cohesiva, evaluado bajo el método triaxial no consolidado no drenado (UU) conforme a la norma ASTM D2850. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 8

Esfuerzos normales y cortantes obtenidos en el ensayo triaxial UU – Mezcla 80 % arcilla y 20 % arena.

		Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3	
Grados	Radianes	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)
0	0.00	50.00	0.00	100.00	0.00	200.00	0.00
10	0.17	50.43	4.90	100.46	5.21	200.61	7.01
20	0.35	51.70	9.66	101.81	10.26	202.43	13.81
30	0.52	53.78	14.12	104.02	15.00	205.41	20.18
40	0.70	56.61	18.15	107.02	19.28	209.44	25.95
50	0.87	60.09	21.63	110.72	22.98	214.42	30.92
60	1.05	64.12	24.46	115.00	25.98	220.18	34.96
70	1.22	68.58	26.54	119.74	28.19	226.56	37.93
80	1.40	73.34	27.81	124.79	29.54	233.36	39.75
90	1.57	78.24	28.24	130.00	30.00	240.37	40.37
100	1.75	83.15	27.81	135.21	29.54	247.38	39.75
110	1.92	87.90	26.54	140.26	28.19	254.17	37.93
120	2.09	92.36	24.46	145.00	25.98	260.55	34.96
130	2.27	96.40	21.63	149.28	22.98	266.32	30.92
140	2.44	99.88	18.15	152.98	19.28	271.29	25.95
150	2.62	102.70	14.12	155.98	15.00	275.33	20.18
160	2.79	104.78	9.66	158.18	10.26	278.30	13.81
170	2.97	106.06	4.90	159.54	5.21	280.12	7.01
180	3.14	106.48	0.00	159.99	0.00	280.74	0.00

Nota. La tabla muestra los valores de esfuerzo normal y esfuerzo cortante en función de ángulos de orientación de plano (0° a 180°), para las tres pruebas realizadas con esfuerzos de confinamiento de 50, 100 y 200 kPa. Los datos permiten construir los círculos de Mohr y determinar los parámetros de resistencia al corte del suelo bajo condiciones no drenadas conforme a la norma ASTM D2850. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 9

Resultados finales obtenidos del ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU) para la mezcla 60 % arcilla – 40 % arena.

ENSAYO TRIAXIAL NO CONSOLIDADO NO DRENADO			
(NORMA ASTM: D2850)			
Datos Iniciales			
Prueba kPa			
N°	1	2	3
σ_1	105.41	168.43	280.27
σ_3	50	100	200
ϵ	15.30%	15.47%	15.33%
Radio	27.70261279	34.2161331	40.1332373
Centro	77.70261279	134.216133	240.133237

Nota. Se detallan los valores de esfuerzo mayor (σ_1), esfuerzo de confinamiento (σ_3), deformación axial (ϵ), radios y centros de los círculos de Mohr correspondientes a cada una de las tres pruebas realizadas, bajo condiciones definidas por la norma ASTM D2850. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 10

Esfuerzos normales y cortantes obtenidos en el ensayo triaxial UU para la mezcla 60 % arcilla – 40 % arena.

		Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3	
Grados	Radianes	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)
0	0.00	50.00	0.00	100.00	0.00	200.00	0.00
10	0.17	50.42	4.81	100.52	5.94	200.61	6.97
20	0.35	51.67	9.47	102.06	11.70	202.42	13.73
30	0.52	53.71	13.85	104.58	17.11	205.38	20.07
40	0.70	56.48	17.81	108.01	21.99	209.39	25.80
50	0.87	59.90	21.22	112.22	26.21	214.34	30.74
60	1.05	63.85	23.99	117.11	29.63	220.07	34.76
70	1.22	68.23	26.03	122.51	32.15	226.41	37.71
80	1.40	72.89	27.28	128.27	33.70	233.16	39.52
90	1.57	77.70	27.70	134.22	34.22	240.13	40.13
100	1.75	82.51	27.28	140.16	33.70	247.10	39.52
110	1.92	87.18	26.03	145.92	32.15	253.86	37.71
120	2.09	91.55	23.99	151.32	29.63	260.20	34.76
130	2.27	95.51	21.22	156.21	26.21	265.93	30.74
140	2.44	98.92	17.81	160.43	21.99	270.88	25.80
150	2.62	101.69	13.85	163.85	17.11	274.89	20.07
160	2.79	103.73	9.47	166.37	11.70	277.85	13.73
170	2.97	104.98	4.81	167.91	5.94	279.66	6.97
180	3.14	105.41	0.00	168.43	0.00	280.27	0.00

Nota. La tabla muestra los valores calculados de esfuerzo normal y esfuerzo cortante (en kPa) para distintos ángulos (grados y radianes), obtenidos a partir de las tres pruebas realizadas bajo las condiciones del ensayo triaxial no consolidado no drenado (ASTM D2850). Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 11

Resultados finales obtenidos del ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU) para la mezcla 50 % arcilla – 50 % arena.

ENSAYO TRIAXIAL NO CONSOLIDADO NO DRENADO			
(NORMA ASTM: D2850)			
Datos Iniciales			
Prueba kPa			
N°	1	2	3
σ_1	106.44	160.18	271.85
σ_3	50	100	200
ϵ	15.36%	15.12%	15.45%
Radio	28.22094425	30.0894303	35.9253106
Centro	78.22094425	130.08943	235.925311

Nota. Se detallan los valores de esfuerzo normal y esfuerzo cortante (kPa) para ángulos comprendidos entre 0° y 180°, calculados a partir de tres pruebas bajo condiciones de ensayo triaxial no consolidado no drenado conforme a la norma ASTM D2850. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 12

Datos iniciales del ensayo triaxial UU para la mezcla 50 % arcilla – 50 % arena.

		Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3	
Grados	Radianes	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)
0	0.00	50.00	0.00	100.00	0.00	200.00	0.00
10	0.17	50.43	4.90	100.46	5.22	200.55	6.24
20	0.35	51.70	9.65	101.81	10.29	202.17	12.29
30	0.52	53.78	14.11	104.03	15.04	204.81	17.96
40	0.70	56.60	18.14	107.04	19.34	208.40	23.09
50	0.87	60.08	21.62	110.75	23.05	212.83	27.52
60	1.05	64.11	24.44	115.04	26.06	217.96	31.11
70	1.22	68.57	26.52	119.80	28.27	223.64	33.76
80	1.40	73.32	27.79	124.86	29.63	229.69	35.38
90	1.57	78.22	28.22	130.09	30.09	235.93	35.93
100	1.75	83.12	27.79	135.31	29.63	242.16	35.38
110	1.92	87.87	26.52	140.38	28.27	248.21	33.76
120	2.09	92.33	24.44	145.13	26.06	253.89	31.11
130	2.27	96.36	21.62	149.43	23.05	259.02	27.52
140	2.44	99.84	18.14	153.14	19.34	263.45	23.09
150	2.62	102.66	14.11	156.15	15.04	267.04	17.96
160	2.79	104.74	9.65	158.36	10.29	269.68	12.29
170	2.97	106.01	4.90	159.72	5.22	271.30	6.24
180	3.14	106.44	0.00	160.18	0.00	271.85	0.00

Nota. Resultados obtenidos a partir de tres pruebas no consolidadas no drenadas bajo la norma ASTM D2850. Se incluyen los esfuerzos principales, deformación unitaria axial, y los valores de radio y centro para cada círculo de Mohr. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 13

Resultados finales obtenidos del ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU) para la mezcla 40 % arcilla – 60 % arena.

ENSAYO TRIAXIAL NO CONSOLIDADO NO DRENADO			
(NORMA ASTM: D2850)			
Datos Iniciales			
Prueba kPa			
N°	1	2	3
σ_1	102.09	152.39	275.90
σ_3	50	100	200
ϵ	15.04%	15.27%	15.03%
Radio	26.04488247	26.196353	37.9523827
Centro	76.04488247	126.196353	237.952383

Nota. Resultados obtenidos mediante ensayos triaxiales no consolidados no drenados según la norma ASTM D2850. Se registran los esfuerzos principales (σ_1 y σ_3), la deformación unitaria axial (ϵ), así como los valores de radio y centro de los círculos de Mohr. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 14

Valores de esfuerzo normal y cortante obtenidos para la mezcla 40 % arcilla – 60 % arena.

		Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3	
Grados	Radianes	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)
0	0.00	50.00	0.00	100.00	0.00	200.00	0.00
10	0.17	50.40	4.52	100.40	4.55	200.58	6.59
20	0.35	51.57	8.91	101.58	8.96	202.29	12.98
30	0.52	53.49	13.02	103.51	13.10	205.08	18.98
40	0.70	56.09	16.74	106.13	16.84	208.88	24.40
50	0.87	59.30	19.95	109.36	20.07	213.56	29.07
60	1.05	63.02	22.56	113.10	22.69	218.98	32.87
70	1.22	67.14	24.47	117.24	24.62	224.97	35.66
80	1.40	71.52	25.65	121.65	25.80	231.36	37.38
90	1.57	76.04	26.04	126.20	26.20	237.95	37.95
100	1.75	80.57	25.65	130.75	25.80	244.54	37.38
110	1.92	84.95	24.47	135.16	24.62	250.93	35.66
120	2.09	89.07	22.56	139.29	22.69	256.93	32.87
130	2.27	92.79	19.95	143.04	20.07	262.35	29.07
140	2.44	96.00	16.74	146.26	16.84	267.03	24.40
150	2.62	98.60	13.02	148.88	13.10	270.82	18.98
160	2.79	100.52	8.91	150.81	8.96	273.62	12.98
170	2.97	101.69	4.52	151.99	4.55	275.33	6.59
180	3.14	102.09	0.00	152.39	0.00	275.90	0.00

Nota. Se presentan los esfuerzos normales y cortantes obtenidos en tres pruebas con diferentes presiones de confinamiento ($\sigma_3 = 50, 100$ y 200 kPa) conforme al ensayo triaxial no consolidado no drenado, según la norma ASTM D2850. Las variaciones se expresan en función del ángulo (grados y radianes) para la construcción de los círculos de Mohr. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 15

Resultados finales obtenidos del ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU) para la mezcla 20 % arcilla – 80 % arena.

ENSAYO TRIAXIAL NO CONSOLIDADO NO DRENADO			
(NORMA ASTM: D2850)			
Datos Iniciales			
Prueba kPa			
N°	1	2	3
σ_1	101.31	158.58	272.04
σ_3	50	100	200
ϵ	15.15%	15.27%	15.38%
Radio	25.6546534	29.2878272	36.0198879
Centro	75.6546534	129.287827	236.019888

Nota. En la tabla se detallan los esfuerzos normales y cortantes resultantes de las tres pruebas con presiones de confinamiento de 50, 100 y 200 kPa, conforme al ensayo triaxial no consolidado no drenado (ASTM D2850). Los datos varían con respecto al ángulo en grados y radianes, permitiendo construir los respectivos círculos de Mohr. Fuente: Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 16

Valores de esfuerzo normal y cortante obtenidos para la mezcla 20 % arcilla – 80 % arena.

		Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3	
Grados	Radianes	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)
0	0.00	50.00	0.00	100.00	0.00	200.00	0.00
10	0.17	50.39	4.45	100.44	5.09	200.55	6.25
20	0.35	51.55	8.77	101.77	10.02	202.17	12.32
30	0.52	53.44	12.83	103.92	14.64	204.83	18.01
40	0.70	56.00	16.49	106.85	18.83	208.43	23.15
50	0.87	59.16	19.65	110.46	22.44	212.87	27.59
60	1.05	62.83	22.22	114.64	25.36	218.01	31.19
70	1.22	66.88	24.11	119.27	27.52	223.70	33.85
80	1.40	71.20	25.26	124.20	28.84	229.77	35.47
90	1.57	75.65	25.65	129.29	29.29	236.02	36.02
100	1.75	80.11	25.26	134.37	28.84	242.27	35.47
110	1.92	84.43	24.11	139.30	27.52	248.34	33.85
120	2.09	88.48	22.22	143.93	25.36	254.03	31.19
130	2.27	92.15	19.65	148.11	22.44	259.17	27.59
140	2.44	95.31	16.49	151.72	18.83	263.61	23.15
150	2.62	97.87	12.83	154.65	14.64	267.21	18.01
160	2.79	99.76	8.77	156.81	10.02	269.87	12.32
170	2.97	100.92	4.45	158.13	5.09	271.49	6.25
180	3.14	101.31	#¡NUM!	158.58	0.00	272.04	0.00

Nota. Se presentan los resultados del ensayo triaxial no consolidado no drenado (U.U.) bajo la norma ASTM D2850. Las tres pruebas corresponden a presiones de confinamiento de 50, 100 y 200 kPa respectivamente. Los datos reflejan el comportamiento de la muestra remoldeada con predominancia de arena, permitiendo la construcción de los círculos de Mohr. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 17

Resultados finales obtenidos del ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU) para la muestra de arena al 100 % con 8 % de humedad.

ENSAYO TRIAXIAL NO CONSOLIDADO NO DRENADO			
(NORMA ASTM: D2850)			
Datos Iniciales			
Prueba kPa			
N°	1	2	3
σ_1	225.62	444.04	766.62
σ_3	50	100	200
ϵ	15.05%	15.27%	15.48%
Radio	87.80761127	172.019564	283.307525
Centro	137.8076113	272.019564	483.307525

Nota. La muestra, conformada únicamente por arena y preparada con un contenido de humedad del 8 %, fue sometida al ensayo triaxial no consolidado no drenado (U.U.) conforme a la norma ASTM D2850. Se aplicaron presiones de confinamiento de 50, 100 y 200 kPa, registrándose esfuerzos principales (σ_1), deformaciones (ϵ), radios y centros de los círculos de Mohr para cada carga. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).

Tabla B 18

Esfuerzos normales y cortantes obtenidos del ensayo triaxial no consolidado no drenado para muestra 100 % arena con 8 % de humedad.

		Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3	
Grados	Radianes	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)	Esfuerzo normal (kPa)	Esfuerzo cortante (kPa)
0	0.00	50.00	0.00	100.00	0.00	200.00	0.00
10	0.17	51.33	15.25	102.61	29.87	204.30	49.20
20	0.35	55.30	30.03	110.37	58.83	217.09	96.90
30	0.52	61.76	43.90	123.05	86.01	237.96	141.65
40	0.70	70.54	56.44	140.24	110.57	266.28	182.11
50	0.87	81.37	67.26	161.45	131.77	301.20	217.03
60	1.05	93.90	76.04	186.01	148.97	341.65	245.35
70	1.22	107.78	82.51	213.19	161.65	386.41	266.22
80	1.40	122.56	86.47	242.15	169.41	434.11	279.00
90	1.57	137.81	87.81	272.02	172.02	483.31	283.31
100	1.75	153.06	86.47	301.89	169.41	532.50	279.00
110	1.92	167.84	82.51	330.85	161.65	580.20	266.22
120	2.09	181.71	76.04	358.03	148.97	624.96	245.35
130	2.27	194.25	67.26	382.59	131.77	665.41	217.03
140	2.44	205.07	56.44	403.79	110.57	700.33	182.11
150	2.62	213.85	43.90	420.99	86.01	728.66	141.65
160	2.79	220.32	30.03	433.67	58.83	749.53	96.90
170	2.97	224.28	15.25	441.43	29.87	762.31	49.20
180	3.14	225.62	0.00	444.04	0.00	766.62	0.00

Nota. Se muestran los valores calculados de esfuerzos normales y cortantes a distintos ángulos (0° – 180°) en función de los resultados del ensayo triaxial U.U., realizado sobre una muestra compuesta únicamente por arena y preparada con un contenido de humedad del 8 %. Las tres pruebas se realizaron aplicando presiones de confinamiento de 50, 100 y 200 kPa, respectivamente. La información sirvió para la construcción de los círculos de Mohr. Fuente: GEO & GEO CIA. Ltda. (2025).