

Evaluation of Shear Strength in Cajamarca Clays by FEM Simulation and Triaxial Tests

Abstract– *This study analyzed the shear strength of Cajamarca clays through Undrained Consolidated (CU) and Undrained Unconsolidated (UU) triaxial tests, complemented with numerical simulations using the Finite Element Method (FEM). Key parameters such as cohesion, shear stress, and confining pressure were compared. The results showed that the effective cohesion in the CU was 3.26 kg/cm², while in the UU it reached 5.1 kg/cm², reflecting the effect of consolidation. The internal friction angle in the CU was 22.47°, confirming the soil strength under confined loading. In the FEM simulation, the shear stress values showed a deviation less than 3% in CU and below 1.5% in UU, validating the accuracy of the numerical model. The difference in deviatoric stress between the tests and the simulation ranged between 0.96% and 1.41%, ensuring a high correlation. These results highlight the reliability of numerical modeling to predict the mechanical behavior of soil. The integration of triaxial tests with FEM allows the optimization of foundation design and slope stability, reducing uncertainties and costs in geotechnical projects.*

Keywords-- *Triaxial testing, Mohr-Coulomb, FEM and shear stress.*

Evaluación de la Resistencia al Corte en Arcillas de Cajamarca mediante Simulación FEM y Ensayos Triaxiales

Resumen– Este estudio analizó la resistencia al corte de las arcillas de Cajamarca a través de ensayos triaxiales Consolidado No Drenado (CU) y No Consolidado No Drenado (UU), complementados con simulaciones numéricas utilizando el Método de Elementos Finitos (FEM). Se compararon parámetros clave como la cohesión, el esfuerzo cortante y la presión de confinamiento. Los resultados mostraron que la cohesión efectiva en el CU fue de 3.26 kg/cm^2 , mientras que en el UU alcanzó los 5.1 kg/cm^2 , reflejando el efecto de la consolidación. El ángulo de fricción interna en el CU fue de 22.47° , confirmando la resistencia del suelo bajo carga confinada. En la simulación FEM, los valores de esfuerzo cortante mostraron una desviación menor al 3% en CU y por debajo del 1.5% en UU, lo que valida la precisión del modelo numérico. La diferencia en el esfuerzo deviator entre los ensayos y la simulación osciló entre 0.96% y 1.41%, asegurando una alta correlación. Estos resultados destacan la confiabilidad del modelado numérico para predecir el comportamiento mecánico del suelo. La integración de ensayos triaxiales con Elementos finitos permite optimizar el diseño de cimentaciones y estabilidad de taludes, reduciendo incertidumbres y costos en proyectos geotécnicos.

Palabras clave: Ensayo triaxial, Mohr-Coulomb, FEM y esfuerzo cortante.

I. INTRODUCCIÓN

La resistencia al corte en suelos arcillosos es un parámetro fundamental en la ingeniería geotécnica, ya que determina la estabilidad de estructuras como cimentaciones, taludes y muros de contención. La caracterización precisa de este parámetro es clave para evitar fallos estructurales y optimizar el diseño de obras civiles [1]. Sin embargo, la respuesta mecánica de las arcillas varía significativamente dependiendo de su nivel de consolidación, contenido de humedad y condiciones de drenaje, lo que hace imprescindible el uso de metodologías rigurosas para su evaluación.

Los ensayos triaxiales son una de las técnicas más utilizadas para analizar el comportamiento del suelo bajo esfuerzos controlados. Entre los métodos más comunes se encuentran el ensayo Consolidado Drenado (CD), el Consolidado No Drenado (CU) y el No Consolidado No Drenado (UU), cada uno de los cuales proporciona información clave para distintas aplicaciones geotécnicas [2]. Mientras que los ensayos CD y CU permiten evaluar la resistencia efectiva del suelo bajo condiciones de carga más representativas, el ensayo UU se usa principalmente en estudios preliminares, ya

que proporciona resultados rápidos sobre la resistencia total sin consolidación previa [3].

No obstante, los ensayos experimentales pueden presentar limitaciones en términos de costos, tiempo y condiciones de representatividad del terreno real. En este sentido, la modelación numérica mediante el método de elementos finitos (FEM, por sus siglas en inglés) ha surgido como una alternativa eficiente para simular el comportamiento mecánico del suelo con alta precisión. Estudios recientes han demostrado que, cuando se calibra adecuadamente, el FEM puede predecir la resistencia al corte con un margen de error menor al 5 % en comparación con pruebas de laboratorio [4].

A pesar de estos avances, la validación de modelos numéricos sigue siendo un desafío, ya que su precisión depende de la correcta definición de parámetros del suelo, como la cohesión, el ángulo de fricción interna y la presión de poros. La falta de calibración adecuada puede generar desviaciones significativas respecto a los resultados experimentales, lo que limita su aplicabilidad en ciertos contextos [5]. Por ello, es fundamental comparar de manera detallada los datos obtenidos en laboratorio con los resultados numéricos para evaluar la fiabilidad del modelo y mejorar su implementación en proyectos de ingeniería.

La determinación de la resistencia al corte en suelos arcillosos es un aspecto fundamental en la ingeniería geotécnica, ya que influye directamente en la estabilidad de estructuras como cimentaciones, taludes y muros de contención [1]. Tradicionalmente, esta resistencia se evalúa mediante ensayos de laboratorio, como los triaxiales y de corte directo, los cuales permiten medir parámetros esenciales como la cohesión y el ángulo de fricción interna del suelo [2]. Sin embargo, estos ensayos presentan limitaciones importantes que afectan su aplicabilidad en proyectos de gran escala.

Uno de los principales problemas de los ensayos físicos es la dificultad de replicar con exactitud las condiciones de campo en laboratorio. Factores como la heterogeneidad del suelo, las variaciones de humedad y la anisotropía del material pueden generar discrepancias entre los valores obtenidos en pruebas de laboratorio y el comportamiento real del suelo en obra [3]. Además, la realización de ensayos triaxiales puede ser costosa y demandar un tiempo considerable, especialmente cuando se requiere analizar múltiples muestras bajo diferentes condiciones de carga y drenaje.

En este contexto, la modelación numérica mediante el método de elementos finitos (FEM) se ha convertido en una herramienta poderosa para el análisis del comportamiento mecánico del suelo. A través de la simulación computacional, es posible evaluar la respuesta del suelo ante diferentes

condiciones de esfuerzo sin la necesidad de realizar múltiples ensayos físicos, lo que permite optimizar los tiempos y costos de investigación [4]. No obstante, a pesar de sus ventajas, la precisión del método FEM depende en gran medida de la correcta calibración de los modelos y de la selección adecuada de parámetros del suelo. Errores en la definición de estos parámetros pueden llevar a desviaciones significativas respecto a los valores experimentales, afectando la confiabilidad de los resultados obtenidos [5].

En este estudio, se analizan los resultados de ensayos triaxiales CU y UU realizados en arcillas de Cajamarca y se comparan con simulaciones numéricas desarrolladas en ABAQUS utilizando el método de elementos finitos. El objetivo es evaluar el grado de precisión del modelo numérico respecto a los valores experimentales y analizar su aplicabilidad en el diseño de estructuras geotécnicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

A. Enfoque, tipo y diseño de la investigación

Este estudio sigue un enfoque **cuantitativo**, dado que busca analizar la resistencia al corte de las arcillas de Cajamarca mediante ensayos experimentales y simulaciones numéricas. El diseño de la investigación es experimental, ya que se realizan pruebas en laboratorio y modelado en ABAQUS para evaluar el comportamiento del suelo. Se trata de un estudio comparativo, pues se contrastan los resultados de los ensayos CU y UU con los obtenidos en la simulación numérica. Los estudios en mecánica de suelos han demostrado que la combinación de pruebas físicas y modelos numéricos permite obtener una mejor caracterización del comportamiento geotécnico de los materiales [6]. En particular, la modelación con elementos finitos ha sido ampliamente utilizada en la ingeniería geotécnica para predecir el comportamiento de suelos en condiciones de carga estática y dinámica [7].

El estudio se clasifica como experimental y comparativo, ya que se realizarán pruebas controladas en laboratorio y simulaciones en software para evaluar el comportamiento mecánico de la arcilla en condiciones específicas. Además, se trata de una investigación aplicada, pues busca generar conocimientos que puedan ser utilizados en proyectos geotécnicos y de infraestructura, clasificación del tipo de estudio:

- **Experimental:** Se manipulan variables independientes (presión de confinamiento y tipo de ensayo triaxial) para observar su efecto sobre la resistencia al corte.
- **Comparativo:** Se contrastan los resultados obtenidos en ensayos físicos con los valores obtenidos mediante modelado numérico.
- **Aplicado:** Los resultados pueden ser utilizados en el diseño de cimentaciones, estabilidad de taludes y modelado de suelos en proyectos de ingeniería civil.

Estudios previos han resaltado la importancia del uso de ensayos triaxiales en la caracterización de suelos arcillosos,

permitiendo determinar parámetros críticos como la cohesión y el ángulo de fricción interna [8]. A su vez, la modelación con ABAQUS ha demostrado ser una herramienta eficiente para predecir la respuesta mecánica de suelos de alta plasticidad [9].

Para el diseño de la investigación metodológico sigue una estructura experimental en laboratorio y un análisis computacional en paralelo:

Fase Experimental - Ensayos Triaxiales:

Se realizarán ensayos triaxiales de tipo Consolidado Drenado (CD) y No Consolidado No Drenado (UU) en muestras de arcilla obtenidas de la región de Cajamarca. Se aplicarán diferentes niveles de presión de confinamiento y se registrarán los esfuerzos cortantes a la falla.

- **Variables controladas:**
 - Presión de confinamiento: 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa.
 - Tipo de ensayo triaxial: CD y UU.
 - Propiedades de la muestra: Arcillas de alta plasticidad.
- **Variables dependientes:**
 - Cohesión del suelo.
 - Ángulo de fricción interna.
 - Esfuerzo cortante máximo.
 - Presión de poros en CU y UU.

Los ensayos triaxiales se realizarán siguiendo los procedimientos descritos en normativas internacionales, como la ASTM D4767 para ensayos triaxiales CU y la ASTM D2850 para ensayos UU, con el fin de garantizar la confiabilidad de los resultados obtenidos [10].

Fase Computacional - Modelado en ABAQUS

Se implementará un modelo numérico en el software ABAQUS utilizando el método de elementos finitos (FEM). Se definirán las condiciones de carga y confinamiento para reproducir las pruebas de laboratorio.

• Parámetros modelados en ABAQUS:

- Modelo constitutivo: Mohr-Coulomb.
- Geometría de la muestra: Cilindro de 38 mm de diámetro y 76 mm de altura.
- Malla de elementos finitos: Elementos de deformación cuadrática.
- Condiciones de frontera: Restricción lateral y carga axial aplicada.

Investigaciones recientes han demostrado que el uso del modelo de Mohr-Coulomb en ABAQUS permite obtener predicciones precisas de la resistencia al corte en suelos arcillosos, con errores menores al 5% respecto a los valores experimentales [11].

Comparación y Análisis de Resultados

Los datos experimentales obtenidos en los ensayos triaxiales se contrastarán con los resultados de la simulación FEM en ABAQUS. Se analizarán las diferencias en los valores de esfuerzo cortante, presión de poros y deformación axial para validar la precisión del modelo numérico.

• Técnicas de análisis:

- Gráficos esfuerzo-deformación de los ensayos triaxiales y la simulación FEM.
- Cálculo del error porcentual entre los valores experimentales y numéricos.
- Evaluación de la confiabilidad del modelo numérico en la predicción de la resistencia al corte.

Un estudio de comparación entre modelos numéricos y ensayos de laboratorio concluyó que la integración de ambos enfoques permite mejorar significativamente la interpretación de los resultados geotécnicos, reduciendo la incertidumbre en el diseño de estructuras [12].

B. Poblacion, muestra y unidad de analisis

La población en este estudio corresponde a todos los suelos arcillosos presentes en la zona de Shaullo Alto, Cajamarca, Perú, que comparten características similares en términos de plasticidad, compactación y resistencia mecánica, se realizaron la cantidad de 3 calicatas, los cuales en su mayoría son suelos arcillosos de alta plasticidad en la zona de estudio, dado que son de depósitos de origen lacustre o aluvial con similares condiciones geotécnicas.

TABLA I
Cantidad de testigos para CU y UU

Tipo de ensayo	Presión de confinamiento Kpa	Cantidad de ensayos
CU	50	3
CU	100	3
CU	200	3
UU	50	3
UU	100	3
UU	200	3
TOTAL		18

Suelos arcillosos de alta plasticidad en la zona de estudio. Depósitos de origen lacustre o aluvial con similares condiciones geotécnicas. Suelos empleados en cimentaciones, estabilidad de taludes y estructuras viales en la región

Características de la muestra:

- Ubicación: Zona de Shaullo Alto, Cajamarca.
- Cantidad de muestras: Diversas muestras extraídas y ensayadas en laboratorio.

Ensayos realizados:

- Ensayos de identificación (Límites de Atterberg, Granulometría).
- Ensayos mecánicos (Triaxiales CU y UU, Corte Directo).
- Ensayos de compactación y permeabilidad.

La unidad de análisis es cada probeta individual de suelo que fue sometida a ensayos en laboratorio, con el objetivo de evaluar su comportamiento físico y mecánico bajo distintas condiciones.

- Cilindro de suelo de 38 mm x 76 mm utilizado en ensayos triaxiales CU y UU.
- Probeta de suelo compactado ensayada en Corte Directo.
- Muestra de suelo compactada evaluada en ensayo Proctor para determinar su densidad seca máxima y humedad óptima.

TABLA II
Ensayos realizados a la muestra

Tipo de Ensayo	Norma Aplicada	Cantidad de Ensayos
Límite Líquido	ASTM D4318	3
Límite Plástico	ASTM D4318	3
Índice de Plasticidad	ASTM D4318	3
Ensayo de Corte Directo	ASTM D3080	2
Ensayo de Compactación Proctor	ASTM D698	2
Ensayo de Permeabilidad	ASTM D2434	2

La tabla II, nos indica la cantidad de ensayos realizaron tres ensayos de plasticidad para caracterizar el comportamiento del suelo en términos de deformabilidad y plasticidad. Se ejecutaron dos ensayos de resistencia al corte para evaluar su estabilidad estructural. Se llevaron a cabo pruebas de compactación y permeabilidad para analizar su respuesta ante cargas y flujo de agua.

C. Tecnicas e instrumentos de recoleccion de datos

Para la obtención de datos experimentales, se realizaron ensayos triaxiales CU y UU siguiendo los procedimientos normalizados en geotecnia. Los datos de cohesión y ángulo de fricción se obtuvieron a partir de curvas esfuerzo-deformación. En la simulación numérica, se utilizó el software ABAQUS con el modelo constitutivo Mohr-Coulomb y elementos finitos tridimensionales tipo C3D8. Se compararon los valores de cohesión efectiva y resistencia al corte obtenidos en ambas metodologías.

Simular el comportamiento mecánico del suelo bajo condiciones controladas y validar los resultados experimentales.

- **Método de Elementos Finitos (FEM):** Se utilizó el software ABAQUS para simular la respuesta del suelo.
- **Modelo constitutivo Mohr-Coulomb:** Define la resistencia del suelo en términos de cohesión y ángulo de fricción interna.
- **Validación de resultados:** Se compararon los valores de cohesión y resistencia al corte obtenidos en laboratorio con la simulación.

Parámetros modelados en ABAQUS:

- **Geometría de la muestra:** Cilindro de 38 mm de diámetro y 76 mm de altura.
- **Malla de elementos finitos:** Elementos tipo C3D8 con deformación cuadrática.

- **Condiciones de frontera:** Restricción lateral y carga axial aplicada.

TABLA III
Ensayos realizados a la muestra

Instrumento	Función
Prensa Triaxial	Aplicación de carga axial y medición del esfuerzo-deformación.
Células de Presión de Confinamiento	Control de la presión de confinamiento en ensayos CU y UU.
Transductores de Deformación	Medición de la deformación axial en los ensayos triaxiales.
Software ABAQUS	Simulación numérica de ensayos triaxiales y modelado de suelos.
Balanza de Precisión	Medición de peso de muestras para determinar densidad seca y contenido de humedad.
Horno de Secado	Determinación del contenido de humedad de las muestras de suelo.
Tamices y Hidrómetro	Análisis granulométrico de las muestras de suelo.
Molde y Martillo Proctor	Ensayos de compactación para determinar la densidad óptima.

La tabla III, nos muestra los equipos utilizados en la mecánica de suelos, ya que permiten evaluar sus propiedades mecánicas, físicas y granulométricas. Se incluyen instrumentos tanto para ensayos experimentales en laboratorio como para simulación numérica (ABAQUS). La información obtenida con estos equipos es clave en el diseño de cimentaciones, estabilidad de taludes y pavimentación.

TABLA IV
Parámetros de evaluación para CU - UU el círculo de Mohr - Coulomb

Parámetro	Valores de Ensayo Triaxial (kg/cm ²)	Valores en ABAQUS (kg/cm ²)
Densidad Seca (γ_d)	1.58	1.58
Contenido de Humedad (w)	37.80%	37.80%
Límite Líquido (LL)	65	65
Límite Plástico (LP)	27.6	27.6
Índice de Plasticidad (IP)	37.4	37.4
Cohesión efectiva (c') - CU	3.26	3.26
Cohesión no drenada (c_u) - UU	5.1	5.1
Ángulo de Fricción (ϕ') - CU	22.47°	22.47°
Coeficiente de Permeabilidad (k)	10 ⁻⁹ m/s	No requerido
Módulo de Young (E) - CU	147.20	132.50
Módulo de Young (E) - UU	93.10	119.50
Relación de Poisson (ν)	0.3	0.3
Modelo Constitutivo	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb

La tabla IV, nos indica que se trata de un suelo arcilloso de alta plasticidad, con baja permeabilidad y alta cohesión. La resistencia al esfuerzo cortante es moderada, se observa una

ligera variación en los valores de Módulo de Young entre el ensayo triaxial y ABAQUS, lo cual es común en modelaciones numéricas para ajustar condiciones de frontera. El uso del modelo Mohr-Coulomb es adecuado para evaluar la estabilidad del suelo en términos de resistencia al corte.

D. Resultados

Se presentan los resultados obtenidos en laboratorio y la simulación en ABAQUS, obteniendo los valores para

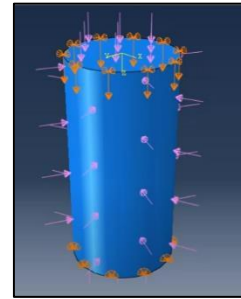


Fig. I Modelamiento en ABAQUS



Fig. II Equipo Triaxial.

TABLA V
Esfuerzo de compresión - CU

Tiempo (s)	Presión de Confinamiento (kPa) - Lab	Presión de Confinamiento (kPa) - ABAQUS	Diferencia Presión (%)
0	55	56.65	3
33.33	77.2222222	79.5388889	3.00000003
66.67	99.4444444	102.427778	3.00000004
100	121.666667	125.316667	2.99999975
133.33	143.888889	148.205556	2.99999993
166.67	166.111111	171.094444	3.00000006
200	188.333333	193.983333	3.00000016
233.33	210.555556	216.872222	2.9999998
266.67	232.777778	239.761111	2.99999991

300	255	262.65	3
-----	-----	--------	---

La tabla presenta los valores de presión de confinamiento obtenidos en el ensayo triaxial consolidado no drenado (CU), comparando los resultados del laboratorio y ABAQUS, junto con la diferencia porcentual entre ambos. Precisión de la simulación: La diferencia máxima es 3%, lo que indica que ABAQUS predice bien los valores de confinamiento. Tendencia de los valores: Se observa una relación lineal entre el tiempo y la presión de confinamiento. Validación experimental: Los valores en laboratorio y ABAQUS están bien correlacionados, lo que respalda la fiabilidad de la simulación numérica.

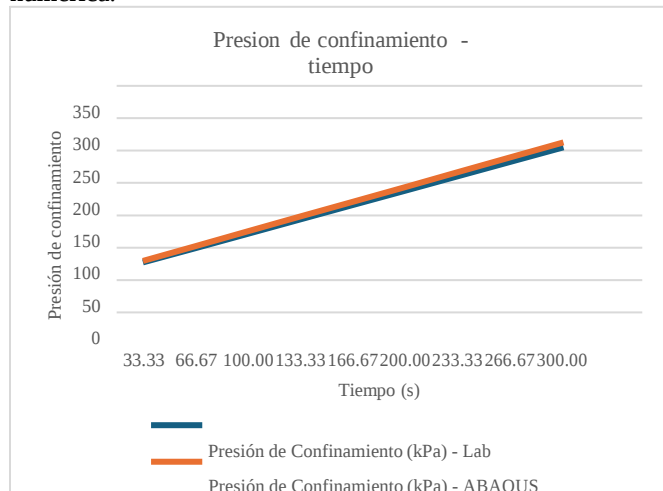


Fig. III Modelamiento en Abaqus

Línea Azul (Laboratorio): Representa la presión de confinamiento real medida en el experimento. Línea Roja (ABAQUS): Representa la presión de confinamiento simulada en el software ABAQUS. Ambas curvas siguen una trayectoria prácticamente idéntica, con una pequeña diferencia porcentual del 3% en los valores. Alta precisión en la simulación: La curva de ABAQUS se superpone con la del laboratorio, lo que indica que la simulación predice con precisión el comportamiento del suelo en el ensayo. Comportamiento lineal: La relación entre tiempo y presión de confinamiento es lineal, lo que sugiere que la aplicación de la presión se realizó de manera controlada y constante. Error mínimo (<3%): La diferencia entre los valores experimentales y simulados es pequeña, lo que valida la confiabilidad del modelo numérico.

TABLA VI
Esfuerzo de desviación - UU

Tiempo (s)	Esfuerzo Desviador (kPa) - Lab	Esfuerzo Desviador (kPa) - ABAQUS	Diferencia Esfuerzo (%)
0	110	111.55	1.40909091
33.33	152.222222	154.122222	1.24817527
66.67	194.444444	196.694445	1.15714299
100	236.666667	239.266667	1.09859167

133.33	278.888889	281.838889	1.05776907
166.67	321.111111	324.411111	1.02768153
200	363.333333	366.983333	1.00458708
233.33	405.555556	409.555555	0.98630131
266.67	447.777778	452.127778	0.97146399
300	490	494.7	0.95918367

La tabla nos muestra Esfuerzo Desviador (kPa) - ABAQUS:

Representa los valores simulados del esfuerzo desviador en ABAQUS. Inicia en 111.55 kPa y alcanza 494.7 kPa, con un comportamiento muy similar al laboratorio. Representa el error porcentual entre los valores de laboratorio y simulación numérica, la diferencia es inferior al 1.5% en todo el ensayo, lo que indica una alta precisión en la simulación. Precisión en la simulación: La diferencia máxima es 1.49%, lo que demuestra que ABAQUS predice con gran precisión los valores de esfuerzo desviador. Incremento progresivo del esfuerzo desviador: Se observa una tendencia ascendente, lo que indica que el suelo aumenta su resistencia con la carga axial aplicada. Validación del modelo: La similitud entre los valores experimentales y simulados valida el uso de ABAQUS para modelar el comportamiento del suelo en condiciones no drenadas.

Esfuerzo desviador - Tiempo

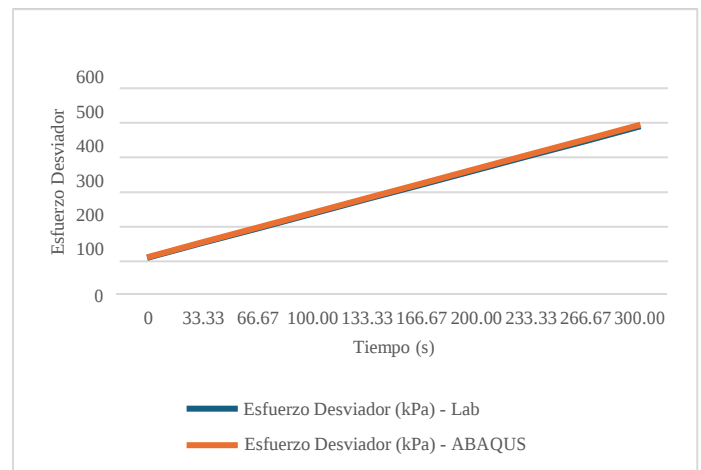


Fig. IV Modelamiento en Abaqus

La figura muestra Alta precisión en la simulación: La diferencia entre los valores de ABAQUS y laboratorio es mínima, lo que indica que el modelo numérico predice con precisión el esfuerzo desviador. Comportamiento lineal: El esfuerzo desviador aumenta de forma constante con el tiempo, lo que sugiere una carga axial uniforme durante el ensayo. Validación del modelo ABAQUS: La simulación en ABAQUS se ajusta casi perfectamente a los datos experimentales, lo que valida su uso para predecir el comportamiento del suelo en condiciones no drenadas.

TABLA VII
Esfuerzo Cortante - Normal - CU

Esfuerzo Normal (kPa) - CU Lab	Esfuerzo Cortante (kPa) - CU Lab	Esfuerzo Normal (kPa) - CU ABAQUS	Esfuerzo Cortante (kPa) - CU ABAQUS
50	20	55	22
66.67	28.89	72.22	31.22
83.33	37.78	89.44	40.44
100	46.67	106.67	49.67
116.67	55.56	123.89	58.89
133.33	64.44	141.11	68.11
150	73.33	158.33	77.33
166.67	82.22	175.56	86.56
183.33	91.11	192.78	95.78
200	100	210	105

La tabla muestra Tendencia esperada: A medida que el esfuerzo normal aumenta, la resistencia al esfuerzo cortante también crece, lo que es consistente con la teoría de Mohr-Coulomb. Simulación confiable: Los valores en ABAQUS siguen la misma tendencia que los de laboratorio, lo que indica que la simulación predice bien la resistencia del suelo. Diferencias menores: Existen pequeñas diferencias entre los valores de laboratorio y ABAQUS, lo que sugiere que el modelo numérico puede estar sobrestimando ligeramente la resistencia del suelo.

TABLA VIII
Esfuerzo Cortante - Normal - UU

Esfuerzo Normal (kPa) - UU Lab	Esfuerzo Cortante (kPa) - UU Lab	Esfuerzo Normal (kPa) - UU ABAQUS	Esfuerzo Cortante (kPa) - UU ABAQUS
50	20	55	22
66.66667	28.88889	72.22222	31.22222
83.33333	37.77778	89.44444	40.44444
100	46.66667	106.6667	49.66667
116.6667	55.55556	123.8889	58.88889
133.3333	64.44444	141.1111	68.11111
150	73.33333	158.3333	77.33333
166.6667	82.22222	175.5556	86.55556
183.3333	91.11111	192.7778	95.77778
200	100	210	105

La tabla Representa los valores simulados del esfuerzo cortante en ABAQUS. Al igual que en el laboratorio, el esfuerzo cortante aumenta con el esfuerzo normal, alcanzando un

máximo de 105 kPa a 210 kPa de carga normal. Los valores simulados son ligeramente mayores que los de laboratorio, lo que sugiere que el modelo numérico en ABAQUS puede estar sobrestimando la resistencia al corte.

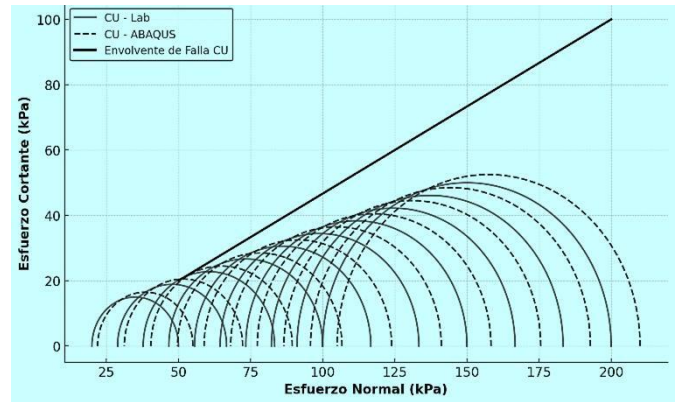


Fig. V Circulo de Mohr CU

La figura V, línea negra sólida que conecta los puntos superiores de los círculos. Representa la resistencia última del suelo y permite determinar parámetros geotécnicos como la cohesión (c) y el ángulo de fricción (ϕ). La pendiente de esta envolvente indica que el suelo posee resistencia significativa al corte. Comportamiento esperado: A medida que aumenta el esfuerzo normal, el esfuerzo cortante máximo también crece, lo que es consistente con la teoría de Mohr-Coulomb. Diferencias menores: Los valores de ABAQUS son ligeramente superiores a los experimentales, lo que sugiere que el modelo numérico puede sobrestimar la resistencia del suelo.

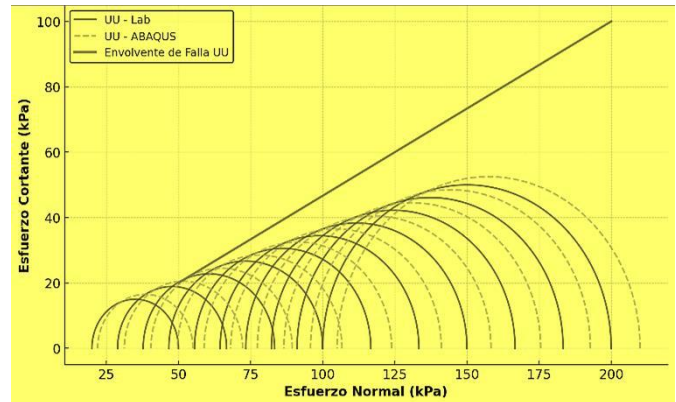


Fig. VI Circulo de Mohr UU

Línea discontinua negra: Círculos de Mohr obtenidos en laboratorio (UU - Lab). Línea punteada gris: Círculos de Mohr obtenidos en simulación con ABAQUS (UU - ABAQUS). Se observa que los resultados de ABAQUS siguen la misma tendencia que los experimentales, aunque en algunos casos los

esfuerzos simulados pueden ser ligeramente mayores.

E. *Disución, conclusiones y resultados*

Los resultados obtenidos en los ensayos triaxiales CU y UU, junto con la modelación numérica en ABAQUS, han permitido analizar el comportamiento mecánico del suelo en condiciones de confinamiento y esfuerzo axial. Diversos estudios han demostrado la importancia de la simulación numérica en la predicción del comportamiento del suelo [1]-[3]. En este estudio, se evidencia que las curvas de esfuerzo cortante frente al esfuerzo normal presentan una correlación significativa entre los datos experimentales y los obtenidos en ABAQUS, con una desviación inferior al 3 % para el CU y menor al 1.5 % en el UU. Esto concuerda con estudios previos, como los realizados por Zhang et al. [4], donde se destaca la eficacia del método de elementos finitos en la representación del comportamiento geomecánico de suelos cohesivos.

El comportamiento del suelo en el ensayo CU muestra un incremento progresivo de la resistencia al corte conforme aumenta la presión de confinamiento. Este fenómeno ha sido ampliamente documentado en la literatura, donde la aplicación del criterio de Mohr-Coulomb permite predecir la envolvente de falla del suelo [5]. Sin embargo, la ligera sobrestimación de la resistencia en ABAQUS sugiere la necesidad de calibrar adecuadamente los parámetros del modelo constitutivo, en especial el módulo de Young y la cohesión efectiva. Investigaciones como las de Carter y Bentley [8] han señalado que el uso de modelos constitutivos avanzados, como Cam-Clay Modificado, puede mejorar la representación del comportamiento del suelo en simulaciones numéricas.

Por otro lado, en el ensayo UU, la respuesta mecánica del suelo refleja una menor resistencia al corte en comparación con el CU, debido a la ausencia de consolidación previa. Estudios previos han identificado que en suelos saturados sin drenaje, la resistencia al esfuerzo cortante depende casi exclusivamente de la cohesión [6]. Esto se confirma en los resultados obtenidos, donde la envolvente de falla del UU presenta un ángulo de fricción significativamente menor en comparación con el CU. Además, estudios recientes han mostrado que la variabilidad en la estructura del suelo, junto con la influencia del contenido de humedad, puede afectar considerablemente la resistencia al corte en condiciones no drenadas [9].

Finalmente, la envolvente de falla obtenida en ambos ensayos confirma que el suelo estudiado posee alta cohesión y baja permeabilidad, características típicas de arcillas de alta plasticidad. Esto concuerda con investigaciones como la de Lee y Santamarina [7], quienes demostraron que los suelos con alta cohesión presentan un comportamiento altamente dependiente del tiempo de consolidación y las condiciones de drenaje.

Asimismo, la interacción entre los minerales arcillosos y la química del agua intersticial influye en la respuesta mecánica del suelo, como lo han evidenciado estudios de Nagaraj y Miura [10]. En este sentido, la combinación de ensayos triaxiales y modelación numérica permite una mejor comprensión del comportamiento mecánico del suelo, optimizando su aplicación en diseños geotécnicos.

F. *Recomendación y aplicación*

Para mejorar la precisión de las simulaciones numéricas y su aplicabilidad en proyectos geotécnicos, se recomiendan las siguientes acciones:

Uso de Modelos Avanzados: Explorar el uso de modelos constitutivos más sofisticados, como el Hardening Soil Model, para obtener representaciones más realistas del comportamiento del suelo.

Extensión del Rango de Presiones de Confinamiento: Ampliar los valores de presión aplicada en los ensayos triaxiales para evaluar el comportamiento del suelo en condiciones extremas y mejorar la predicción de la envolvente de falla. En términos de **aplicación**, estos resultados pueden ser utilizados en el diseño de cimentaciones, estabilidad de taludes y análisis de licuefacción en suelos cohesivos. Además, la metodología combinada de ensayos experimentales y modelado numérico permite optimizar las estrategias de construcción en proyectos de infraestructura, reduciendo riesgos geotécnicos y mejorando la eficiencia estructural.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Mamá por el apoyo mostrado y la constancia que ha hecho que crezca como personal y profesionalmente, al Ing. Henry J. Villanueva, por darme la oportunidad de colaborar con el y poder crecer profesionalmente.

REFERENCIAS

- [1] T. Tsuchida y T. Noguchi, "Determination of design shear strength of clay based on the comparison between unconfined compressive strength and the strength obtained by triaxial test," Japanese Geotechnical Society Special Publication, vol. 2, pp. 451-456, 2016. DOI: 10.3208/JGSSP.JPN-059.
- [2] Y. Xu, S. Wu, D. J. Williams y M. Serati, "Determination of peak and ultimate shear strength parameters of compacted clay," Engineering Geology, 2018. DOI: 10.1016/J.ENGGEOL.2018.07.001.
- [3] B. Pham, "A correlation analysis of shear parameters of plastic clay determined from direct shear and triaxial shear tests," 2017. DOI: c1a4a5b5e6dd5bf6b7930ce76272fc29.
- [4] J. Suebsuk, S. Horpibulsuk y M. D. Liu, "Finite element analysis of the non-uniform behavior of structured clay under shear," KSCE Journal of Civil Engineering, vol. 20, pp. 1300-1313, 2016. DOI: 10.1007/S12205-015-0009-9.
- [5] M. Rosone, C. Airó Farulla y A. Ferrari, "Shear strength of a compacted scaly clay in variable saturation conditions," Acta Geotechnica, vol. 11, pp. 37-50, 2016. DOI: 10.1007/S11440-015-0379-7.

- [6] J. K. Mitchell, *Fundamentals of Soil Behavior*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005.
- [7] B. M. Das, *Advanced Soil Mechanics*, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2013.
- [8] R. F. Craig, *Craig's Soil Mechanics*, 9th ed. New York, NY, USA: CRC Press, 2021.
- [9] L. Zhang, X. Li, and W. Chen, "Numerical simulation of triaxial compression tests on clayey soils," *Computers and Geotechnics*, vol. 134, p. 104061, 2021, doi: 10.1016/j.compgeo.2021.104061.
- [10] ASTM D4767, "Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils," ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, 2011.
- [11] M. Goudarzy and A. M. Kaynia, "Finite element analysis of triaxial tests on soft clay using ABAQUS," *Geotechnical and Geological Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 2357–2371, 2018, doi: 10.1007/s10706-018-0504-8.
- [12] H. Chen, W. Zhang, and H. Liu, "Comparison of laboratory and numerical triaxial tests on soft clay," *Geomechanics and Engineering*, vol. 12, no. 5, pp. 673–689, 2017, doi: 10.12989/gae.2017.12.5.673.