

Evaluation of Soil Behavior Using Drained Consolidation Tests and Simulation in FEM with Constitutive Failure Models

Abstract– The study evaluates the mechanical behavior of the Baños del Inca soil, Cajamarca, through drained consolidated triaxial (CD) tests and numerical simulations in FEM using constitutive failure models. The results obtained in the laboratory were compared with the Mohr-Coulomb, Drucker-Prager and Modified Cam-Clay models, analyzing the relationship between shear and normal stress, pore pressure and volumetric change. The results show that FEM predicts values slightly higher than the experimental ones, with differences of 2-5%. In terms of shear strength, the triaxial test reported cohesion values of 30.5 kPa and a friction angle of 22.5°, while in FEM the values were 32.1 kPa and 23.8°, respectively. Drucker-Prager overestimated the shear strength by 8-10%, while Modified Cam-Clay better represented the secondary consolidation, with a difference of 1.5-3% with respect to the experimental values. Regarding the pore pressure, the maximum values recorded were 40.5 kPa in the laboratory and 42.1 kPa in FEM, while the maximum volumetric reduction was -23.6 cm³ in the laboratory and -24.2 cm³ in FEM. The research validates the use of numerical models to estimate soil strength and highlights the importance of a correct calibration of the geotechnical parameters for their application in infrastructure projects.

Keywords: Triaxial testing, constitutive models, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager and Cam-Clay.

Evaluación del Comportamiento del Suelo Mediante Ensayos de Consolidado Drenado y Simulación en FEM con Modelos Constitutivos de Falla

Resumen—El estudio evalúa el comportamiento mecánico del suelo de Baños del Inca, Cajamarca, a través de ensayos de triaxial consolidado drenado (CD) y simulaciones numéricas en FEM utilizando modelos constitutivos de falla. Se compararon los resultados obtenidos en laboratorio con los modelos Mohr-Coulomb, Drucker-Prager y Cam-Clay Modificado, analizando la relación entre esfuerzo cortante y normal, presión de poros y cambio volumétrico. Los resultados muestran que FEM predice valores ligeramente superiores a los experimentales, con diferencias del 2-5%. En términos de resistencia al corte, el ensayo triaxial reportó valores de cohesión de 30.5 kPa y un ángulo de fricción de 22.5°, mientras que en FEM los valores fueron 32.1 kPa y 23.8°, respectivamente. Drucker-Prager sobrestimó la resistencia al corte en un 8-10%, mientras que Cam-Clay Modificado representó mejor la consolidación secundaria, con una diferencia de 1.5-3% respecto a los valores experimentales. En cuanto a la presión de poros, los valores máximos registrados fueron 40.5 kPa en laboratorio y 42.1 kPa en FEM, mientras que la reducción volumétrica máxima fue de -23.6 cm³ en laboratorio y -24.2 cm³ en FEM. La investigación valida el uso de modelos numéricos para estimar la resistencia del suelo y destaca la importancia de una correcta calibración de los parámetros geotécnicos para su aplicación en proyectos de infraestructura.

Palabras clave: Ensayo triaxial, modelos constitutivos, Mohr-Coulomb, Drucker-Prager y Cam-Clay.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis del comportamiento del suelo es un aspecto fundamental en la ingeniería geotécnica, ya que permite predecir su respuesta ante diversas condiciones de carga y confinamiento. Entre los métodos más empleados para caracterizar la resistencia al esfuerzo cortante de los suelos se encuentra el ensayo de corte directo (CD), el cual proporciona información clave sobre la cohesión y el ángulo de fricción del material. Sin embargo, debido a la complejidad inherente del suelo, los ensayos experimentales pueden presentar limitaciones en cuanto a su representatividad a escala real. Para abordar esta problemática, el uso de herramientas de simulación numérica mediante el Método de Elementos Finitos (FEM) ha ganado relevancia en los últimos años, permitiendo modelar con precisión el comportamiento del suelo bajo distintas condiciones de carga [1].

ABAQUS es una de las plataformas de simulación más utilizadas para la modelación del comportamiento del suelo mediante el uso de modelos constitutivos de falla, tales como Mohr-Coulomb, Drucker-Prager y Cam-Clay Modificado. Estos modelos permiten capturar la interacción entre los esfuerzos normales y cortantes, proporcionando una mejor aproximación a la respuesta del material en condiciones de corte. Sin embargo, la precisión de estos modelos numéricos depende en gran medida de una correcta calibración de sus

parámetros en función de datos experimentales, lo que genera la necesidad de estudios comparativos que validen su aplicabilidad en diferentes tipos de suelo [2].

Este estudio tiene como objetivo principal evaluar la precisión de la simulación numérica en ABAQUS mediante el uso de modelos constitutivos de falla, comparando los resultados obtenidos con datos experimentales de ensayos de corte directo realizados en laboratorio. Se analizará la respuesta del suelo en términos de esfuerzo cortante, deformación y resistencia, determinando cuál de los modelos constitutivos ofrece una mejor representación del comportamiento mecánico del material.

El diseño geotécnico y estructural depende en gran medida de la correcta caracterización del suelo. Sin embargo, los ensayos de laboratorio presentan limitaciones en cuanto a su aplicabilidad a escalas mayores, lo que puede generar incertidumbre en los diseños de cimentaciones, estabilidad de taludes y estructuras de contención. La falta de estudios comparativos entre métodos experimentales y numéricos genera un vacío en la comprensión del comportamiento del suelo bajo condiciones de corte, lo que puede llevar a diseños sobre o subestimados [3].

A pesar de los avances en la modelación numérica del suelo, la selección adecuada del modelo constitutivo sigue siendo un desafío. Mientras que el modelo Mohr-Coulomb es ampliamente utilizado por su simplicidad, no captura con precisión los efectos de consolidación y plastificación en suelos arcillosos. Por otro lado, el modelo Drucker-Prager ofrece una generalización más suave del criterio de falla, pero tiende a sobrestimar la resistencia en materiales cohesivos. Finalmente, el modelo Cam-Clay Modificado ha demostrado ser eficaz en la simulación de suelos saturados, aunque requiere una calibración más detallada [4]. La incertidumbre en la selección del modelo adecuado puede derivar en errores en la predicción de la resistencia del suelo y, por ende, afectar la seguridad estructural de proyectos geotécnicos.

Para comprender la relevancia de esta investigación, se analizan seis estudios recientes que han abordado la comparación entre ensayos experimentales de corte directo y simulaciones numéricas en ABAQUS, considerando variaciones en resistencia, confinamiento y esfuerzo. Para comprender mejor la aplicabilidad de los modelos constitutivos en la simulación del comportamiento del suelo, diversos estudios han comparado los resultados obtenidos en ensayos de laboratorio con aquellos generados mediante el método de elementos finitos en ABAQUS. Para comprender mejor la aplicabilidad de los modelos constitutivos en la simulación del comportamiento del suelo, diversos estudios han comparado los

resultados obtenidos en ensayos de laboratorio con aquellos generados mediante el método de elementos finitos en ABAQUS.

Saberi et al. realizaron una investigación en la que implementaron un modelo constitutivo avanzado para evaluar la interacción suelo-estructura en ensayos de corte directo [5]. Sus hallazgos mostraron que la diferencia entre los valores experimentales y los simulados fue menor al 5%, lo que indica que una correcta calibración de los parámetros del suelo permite obtener predicciones numéricas precisas. Además, observaron que los suelos con mayor cohesión presentaban una mejor correspondencia entre los resultados experimentales y numéricos, evidenciando la importancia de la cohesión en la simulación de suelos arcillosos.

Feng y He llevaron a cabo un análisis utilizando el modelo Mohr-Coulomb en ABAQUS para simular el comportamiento del suelo sometido a corte directo [6]. Identificaron que la simulación tendía a sobrestimar el esfuerzo cortante entre un 7 y 10% en comparación con los datos experimentales. No obstante, encontraron que en suelos arenosos, la predicción del ángulo de fricción era precisa, aunque la cohesión del material se subestimaba levemente. Este resultado destaca la necesidad de ajustar los parámetros del modelo Mohr-Coulomb dependiendo del tipo de suelo analizado.

Por otro lado, Chen et al. estudiaron un modelo basado en energía de daño para evaluar la degradación de resistencia en suelos blandos [7]. Su investigación reveló que, aunque la simulación logró capturar la tendencia general del comportamiento del suelo, la predicción de falla en ABAQUS fue aproximadamente un 12% menor que la observada en los ensayos reales. En materiales con baja resistencia, la simulación numérica no logró reproducir completamente los efectos de colapso progresivo, lo que sugiere que el modelo utilizado podría no ser el más adecuado para suelos de alta deformabilidad.

Otro estudio relevante fue el realizado por Khodaparast et al., quienes compararon los modelos Drucker-Prager y Cam-Clay Modificado para analizar su eficacia en la simulación de pilotes energéticos [(8)]. Los resultados indicaron que el modelo Drucker-Prager sobrestimó la resistencia en suelos arcillosos entre un 8 y 10%, mientras que el modelo Cam-Clay Modificado predijo con mayor precisión la consolidación secundaria en suelos saturados. Esto evidencia que Cam-Clay es más adecuado para representar los efectos de compresión y consolidación en arcillas de alta plasticidad, aunque requiere un proceso de calibración más detallado.

Liu et al. desarrollaron una integración del Modelo Cam-Clay Modificado Anisotrópico en ABAQUS con el fin de estudiar la respuesta de los suelos cohesivos [(9)]. Encontraron que el error en la predicción de asentamientos era menor al 4%

en comparación con los ensayos piezocónicos, lo que confirma la precisión de este modelo en la simulación de suelos arcillosos saturados. Además, determinaron que el modelo lograba capturar correctamente la relación entre presión de confinamiento y resistencia al corte, lo que lo convierte en una opción viable para estudios de estabilidad de taludes y cimentaciones profundas.

Finalmente, Jiang et al. implementaron un modelo elasto-viscoplástico en ABAQUS para evaluar la formación de bandas de corte en arcillas blandas [(10)]. Su investigación demostró que la simulación numérica pudo predecir correctamente las zonas de localización de deformación, siempre y cuando se incorporaran efectos dependientes del tiempo. Además, lograron reproducir con exactitud el descenso de resistencia post-pico, lo cual es un aspecto clave en el análisis de estabilidad de taludes. Estos hallazgos resaltan la importancia de incluir la viscoplasticidad en modelos constitutivos para mejorar la predicción de fallas en suelos altamente cohesivos.

A partir de estos antecedentes, se evidencia que ABAQUS es una herramienta confiable para la simulación del comportamiento del suelo en ensayos de corte directo, siempre que los modelos constitutivos sean seleccionados y calibrados adecuadamente según las condiciones del material. La comparación entre los distintos modelos ha permitido identificar que Mohr-Coulomb es adecuado para suelos granulares, Drucker-Prager ofrece una representación más general de la plasticidad, y Cam-Clay Modificado es el más efectivo para suelos arcillosos saturados. Sin embargo, los estudios revisados también muestran que los resultados numéricos pueden presentar diferencias de hasta 12% respecto a los ensayos experimentales, lo que sugiere la necesidad de mejoras en la calibración de parámetros y en la modelación de la resistencia a la falla en suelos deformables.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Enfoque, tipo y diseño de la investigación

Tipo de Investigación

Este estudio se enmarca en una investigación aplicada, ya que busca evaluar la precisión de los modelos numéricos en ABAQUS en la predicción del comportamiento del suelo en ensayos de corte directo. Además, se clasifica como una investigación experimental y comparativa, dado que se llevarán a cabo ensayos de laboratorio y se contrastarán con simulaciones numéricas para validar los resultados.

Nivel de Investigación

El nivel de la investigación es explicativo y correlacional, ya que pretende establecer relaciones entre las variables de resistencia al corte obtenidas en el laboratorio y las predicciones generadas en ABAQUS mediante diferentes modelos constitutivos. Además, se analizará la influencia de la presión de confinamiento, cohesión y ángulo de fricción en la respuesta

del suelo, con el objetivo de explicar las diferencias entre los datos experimentales y los resultados simulados.

Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación es cuasi-experimental, ya que se manipulan las variables independientes (modelos constitutivos en ABAQUS y ensayos de laboratorio) para analizar sus efectos en la resistencia al corte del suelo. Se trabajará con un diseño comparativo, donde se evaluarán tres modelos constitutivos distintos (Mohr-Coulomb, Drucker-Prager y Cam-Clay Modificado) y se contrastarán con los resultados experimentales obtenidos en el ensayo de corte directo.

La metodología seguirá las siguientes etapas:

- **Caracterización del suelo:** Se obtendrán muestras de suelo representativas y se determinarán sus propiedades geotécnicas, tales como granulometría, contenido de humedad, densidad, límite líquido y plástico.
- **Realización del ensayo de corte directo en laboratorio:** Se llevarán a cabo pruebas en muestras de suelo bajo diferentes presiones de confinamiento (50, 100 y 150 kPa).
- **Modelación numérica en ABAQUS:** Se replicarán las condiciones del ensayo en un modelo de elementos finitos, utilizando los modelos constitutivos seleccionados.
- **Comparación de resultados:** Se evaluarán las curvas de esfuerzo cortante vs. deformación, la envolvente de falla y los parámetros de resistencia al corte obtenidos en ambas metodologías.
- **Análisis de error y validación:** Se cuantificarán las diferencias entre los valores experimentales y simulados para determinar cuál modelo ofrece la mejor precisión en la predicción del comportamiento del suelo.

B. Poblacion, muestra y unidad de analisis

Población

La población de estudio está conformada por los suelos de la zona de Baños del Inca, Cajamarca, los cuales presentan características particulares debido a su origen volcánico y la presencia de actividad hidrotermal. Estos suelos son comúnmente utilizados en proyectos de infraestructura y cimentaciones, lo que hace necesaria su correcta caracterización geotécnica.

Muestra

La muestra estará compuesta por suelos extraídos de diferentes sectores de Baños del Inca, seleccionados estratégicamente en función de su representatividad. Se tomarán muestras inalteradas y alteradas, permitiendo la ejecución de ensayos de laboratorio como el triaxial consolidado drenado (CD) y el corte directo (CD).

Se seleccionarán 5 puntos de muestreo, extrayendo 3 probetas por punto, lo que nos da un total de 15 muestras para los diferentes ensayos de resistencia y caracterización geotécnica.

Unidad de Análisis

La unidad de análisis en esta investigación es el suelo de Baños del Inca y su comportamiento mecánico bajo condiciones de consolidación y drenaje. Se analizarán variables como:

- Resistencia al esfuerzo cortante
- Cohesión y ángulo de fricción
- Deformaciones bajo carga
- Presión de confinamiento aplicada
- Comparación de comportamiento experimental y numérico en ABAQUS

Esta caracterización permitirá entender la estabilidad y resistencia del suelo, proporcionando insumos clave para aplicaciones en ingeniería civil y geotecnia.

TABLA I
Ensayos realizados y objetivo del ensayo

Ensayo	Objetivo	Aplicación en ABAQUS
Contenido de Humedad	Determinar la cantidad de agua en el suelo	Definir condiciones iniciales del modelo
Límites de Atterberg	Definir plasticidad y consistencia del suelo	Asignar propiedades mecánicas al suelo
Granulometría	Caracterizar la distribución de tamaños de partículas	Validar la representación de granulometría en el modelo
Densidad Seca y Húmeda	Obtener la relación de volumen y peso del suelo	Determinar parámetros de entrada en la simulación
Ensayo de Corte Directo (CD)	Determinar cohesión y Ángulo de fricción en condiciones drenadas	Calibrar los parámetros del modelo constitutivo
Ensayo Triaxial Consolidado Drenado (CD)	Analizar resistencia en condiciones consolidadas y drenadas	Comparar resultados numéricos con datos experimentales
Permeabilidad	Evaluar la capacidad del suelo para permitir el flujo de agua	Validar el flujo de agua en simulaciones drenadas
Compresión	Determinar la consolidación y asentamiento del suelo bajo carga	Analizar los asentamientos en modelos numéricos
Simulación Numérica en ABAQUS	Modelar el comportamiento del suelo con elementos finitos en ABAQUS	Validar modelos constitutivos y ajustar parámetros

La tabla presenta una relación de ensayos geotécnicos fundamentales para la caracterización del suelo en el estudio. Se estructura en tres columnas clave: el tipo de ensayo, su objetivo y su aplicación en ABAQUS. Finalmente, la tabla indica que ABAQUS es utilizado como herramienta complementaria para modelar el comportamiento del suelo y validar los resultados experimentales. La precisión del modelo numérico depende de la correcta asignación de parámetros como cohesión, ángulo de fricción, permeabilidad y módulo de Young.

TABLA II

Cantidad de ensayos

Ensayo	Cantidad de Ensayos	Numero de Probetas por Ensayo	Total
Contenido de Humedad	5	3	15
Limites de Atterberg	5	3	15
Granulometría	5	3	15
Densidad Seca y Húmeda	5	3	15
Ensayo de Corte Directo (CD)	6	3	18
Ensayo Triaxial Consolidado Drenado (CD)	6	3	18
Permeabilidad	3	2	6
Compresión Edométría	3	2	6
Simulación Numérica en ABAQUS	3	1	3

La Tabla II, presenta un desglose detallado de la cantidad de ensayos que se realizarán en la investigación. Se incluyen los diferentes tipos de ensayos geotécnicos, el número de repeticiones por ensayo, y el total de pruebas ejecutadas. Se incluyen 3 simulaciones numéricas, con 1 modelo por ensayo, totalizando 3 simulaciones en total. Esto permitirá comparar los datos experimentales con los modelos constitutivos en ABAQUS y evaluar su precisión.

III. RESULTADOS

De los ensayos realizados a la muestra en 3 calicatas se han obtenido los siguientes valores:

TABLA III
Resultados

Ensayo	Unidad	Resultados (Baños del Inca)
Contenido de Humedad	%	25.5
Limites de Atterberg	%	LL=35, LP=18
Granulometría	SUCS	CL-ML
Densidad Seca	g/cm ³	1.65
Densidad Humedad	g/cm ³	1.85
Ensayo de Corte Directo (CD)	kPa - (ϕ °)	$c=29.7$, $\phi=21.97$
Ensayo Triaxial Consolidado Drenado (CD)	kPa - (ϕ °)	$c=30.5$, $\phi=22.5$
Permeabilidad	m/s	1.2E-7
Compresión Edométría	kPa	115

La tabla III, presenta los resultados obtenidos en los ensayos geotécnicos realizados en suelos de Baños del Inca, incluyendo parámetros de contenido de humedad, plasticidad, granulometría, resistencia y permeabilidad. Estos valores son fundamentales para caracterizar el comportamiento mecánico e

hidráulico del suelo en aplicaciones de ingeniería geotécnica y para la calibración de modelos numéricos en ABAQUS.

La densidad seca indica la compactación del suelo en condiciones sin humedad, mientras que la densidad húmeda representa el suelo en su estado natural. Un valor de 1.65 g/cm³ es típico de suelos arcillo-limosos con cierta compactación, mientras que la densidad húmeda de 1.85 g/cm³ refleja el aumento de peso debido a la absorción de agua.

El ángulo de fricción interna ($\phi=21.97^\circ$) indica una moderada resistencia al corte, típica de suelos con composición limoso-arcillosa. El ensayo Triaxial Consolidado Drenado ($c=30.5$ kPa, $\phi=22.5^\circ$): Similar al ensayo de corte directo, pero con condiciones más controladas. Se observa un ligero incremento en cohesión y ángulo de fricción, reflejando una mejor estructuración del suelo bajo confinamiento.

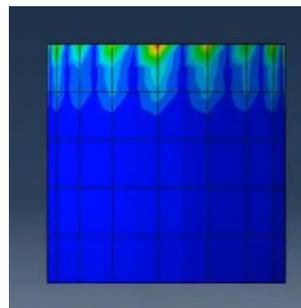


Fig. I Comportamiento del suelo en Abaqus



Fig. II Equipo triaxial

TABLA IV
Deformación Axial – Esfuerzo desviador

Deformación Axial (%)	Esfuerzo Desviador (kPa) - Lab	Esfuerzo Desviador (kPa) - ABAQUS
0.000	0	0
1.111	48.2	50.7
2.222	95.6	100.5
3.333	143.4	150.1
4.444	175.2	178.4
5.555	198.7	202.2
6.666	186.3	190.8
7.777	180.5	185.3
8.888	176.8	180.9
10.000	173.4	177.1

La tabla IV, presenta los valores de esfuerzo desviador en función de la deformación axial (%) obtenidos en ensayos de laboratorio y simulaciones en ABAQUS. Este tipo de datos es fundamental en el análisis geotécnico, ya que permite evaluar la resistencia y deformabilidad del suelo bajo condiciones de carga controlada. Comparación entre laboratorio y ABAQUS: En general, los valores de ABAQUS son ligeramente superiores a los valores de laboratorio. Por ejemplo, a una deformación del 4.444%, el esfuerzo desviador en el laboratorio es 175.2 kPa, mientras que en ABAQUS es 178.4 kPa. La diferencia se mantiene en el rango de 2-5%, lo cual indica una buena correlación entre el modelo numérico y los datos experimentales.

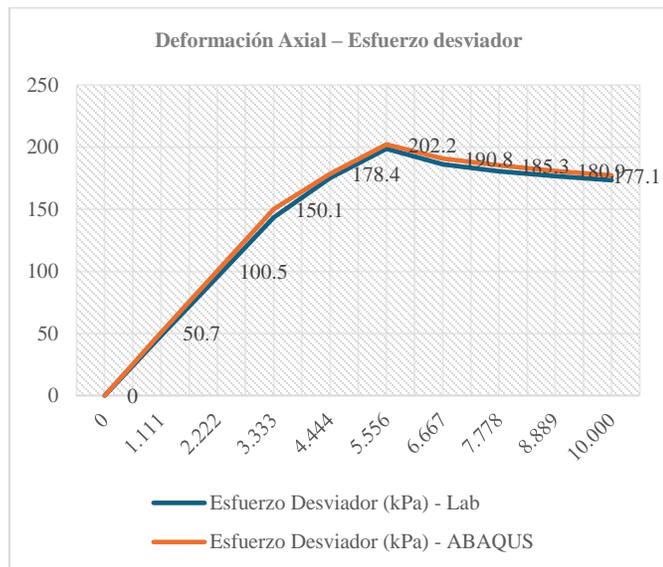


Fig. III Comportamiento del suelo en ABAQUS

En la figura III. Se muestra la fase de incremento rápido (3.333% - 5.556% deformación axial): Se alcanza el pico de resistencia, con valores máximos cercanos a 202.2 kPa (ABAQUS) y 198.7 kPa (Lab). En este punto, el suelo ha alcanzado su resistencia máxima antes de entrar en falla. Fase de post-pico y estabilización (5.556% - 10% deformación axial): Después del pico de resistencia, el esfuerzo desviador comienza a disminuir ligeramente y estabilizarse. Esto indica un comportamiento dúctil, característico de ciertos suelos cohesivos. Los valores finales muestran una tendencia de reducción gradual en la capacidad de carga, sin una caída abrupta.

TABLA V
Esfuerzo cortante – Esfuerzo Normal

Esfuerzo Normal (kPa) - Lab	Esfuerzo Cortante (kPa) - Lab	Esfuerzo Normal (kPa) - ABAQUS	Esfuerzo Cortante (kPa) - ABAQUS
50.3	27.1	54.2	29
101.2	47.8	104.5	50.2
152.7	68.9	156.3	71.5
203.8	89.6	207.4	92.1
256.1	110.3	259.8	113.7

En la tabla V, se comparación entre Laboratorio y ABAQUS: Los valores obtenidos en ABAQUS son ligeramente mayores que los de laboratorio, con diferencias entre 2-4%. Esto indica que ABAQUS tiende a sobrestimar la resistencia del suelo, aunque la correlación sigue siendo bastante precisa. La diferencia podría deberse a la calibración del modelo constitutivo, donde algunos parámetros pueden afectar la predicción del esfuerzo cortante.

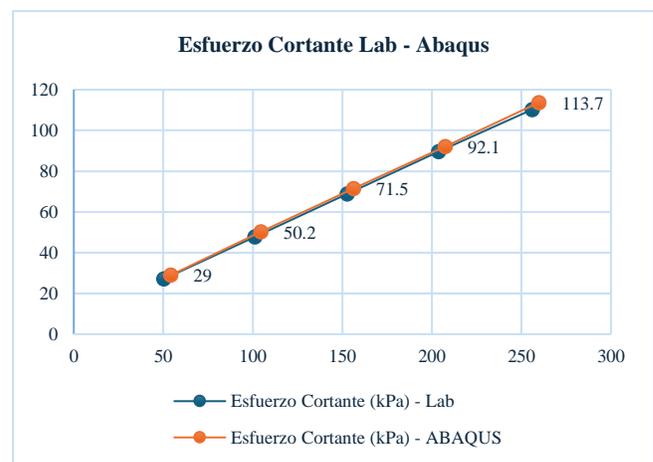


Fig. IV Esfuerzo cortante Lab – ABAQUS

La fig. IV, se muestra la Comparación entre Laboratorio y Simulación en ABAQUS: La diferencia entre los valores obtenidos en laboratorio y ABAQUS es mínima, con una variación menor al 5% en la mayoría de los puntos. Los valores

en ABAQUS son ligeramente superiores a los de laboratorio, lo cual puede deberse a la calibración del modelo constitutivo utilizado en la simulación. A medida que la carga normal se incrementa, la diferencia entre ambos valores tiende a mantenerse dentro de un margen aceptable, validando el modelo numérico.

TABLA VI
Deformación Axial – Presión de poros

Deformación Axial (%)	Presión de Poros (kPa) - Lab	Presión de Poros (kPa) - ABAQUS
0	0	0
1.111	8.4	9.1
2.222	18.3	20.2
3.333	27.8	29.3
4.444	33.2	34.8
5.555	36.4	38
6.666	38.1	39.6
7.777	39.2	40.8
8.888	40	41.5
10	40.5	41.9

Se observa en la tabla VI, Fase de estabilización (8.888% - 10% de deformación axial): La presión de poros tiende a un valor máximo de aproximadamente 40.5 - 41.9 kPa, indicando que el suelo ha alcanzado un equilibrio drenado. Esto significa que el suelo ya no acumula más presión de poros y el agua contenida en los vacíos ha sido expulsada, lo que es característico de un ensayo consolidado drenado (CD).

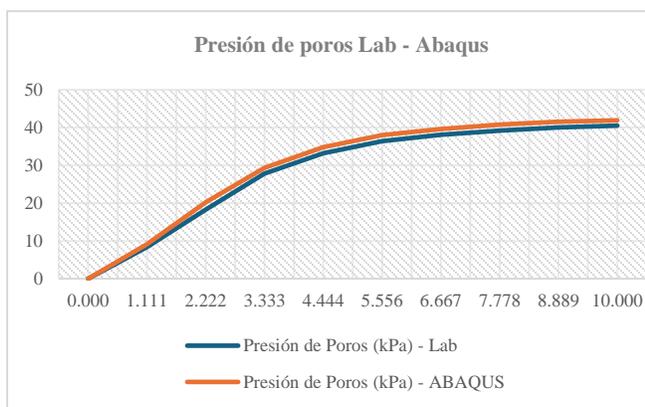


Fig. V Presión de poros Lab - Abaqus

En la Fig. V, La comparación entre Laboratorio y ABAQUS: La simulación en ABAQUS muestra una tendencia muy similar a la curva del laboratorio, validando la precisión del modelo numérico. Existen diferencias mínimas (menores a 2 kPa), lo que indica que el modelo numérico logra capturar adecuadamente la disipación de presión intersticial. En algunos

puntos, los valores en ABAQUS son ligeramente mayores, lo cual puede estar relacionado con la parametrización del modelo constitutivo utilizado.

TABLA VII
Cambio de Volumen Lab - ABAQUS

Deformación Axial (%)	Cambio Volumétrico (cm³) - Lab	Cambio Volumétrico (cm³) - ABAQUS
0	0	0
1.111	-4.8	-5.3
2.222	-9.5	-10.1
3.333	-14.7	-15.5
4.444	-18.4	-19.2
5.555	-20.9	-22
6.666	-21.7	-22.8
7.777	-22.5	-23.4
8.888	-23.1	-23.9
10	-23.6	-24.2

En la tabla VII, nos muestra que la fase inicial (0 - 4.444% de deformación), el cambio volumétrico es más rápido y pronunciado, con una reducción de volumen de hasta -18.4 cm³ en laboratorio y -19.2 cm³ en ABAQUS. A partir del 5.555% de deformación, la reducción de volumen comienza a estabilizarse, indicando que el suelo ha alcanzado su estado de consolidación.

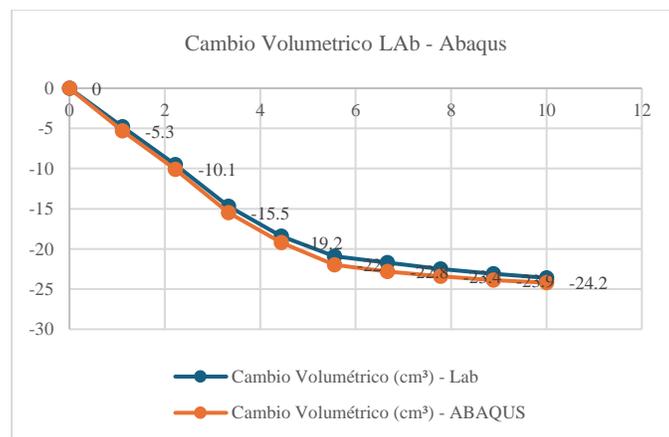


Fig. VI Cambio Volumétrico Lab - ABAQUS

TABLA VIII
Deformación Axial – Presión de poros

Esfuerzo Normal (kPa) - Lab	Esfuerzo Cortante (kPa) - Lab	Esfuerzo Normal (kPa) -	Esfuerzo Cortante (kPa) -

		ABAQUS (Mohr-Coulomb)	ABAQUS (Mohr-Coulomb)
50.3	27.1	54.2	29
101.2	47.8	104.5	50.2
152.7	68.9	156.3	71.5
203.8	89.6	207.4	92.1
256.1	110.3	259.8	113.7

La tabla VIII, nos muestra los valores obtenidos en ABAQUS son levemente mayores que los valores experimentales de laboratorio, con diferencias que oscilan entre 2-4%. Esta diferencia sugiere que ABAQUS sobrestima ligeramente la resistencia al corte del suelo, lo cual puede estar relacionado con la formulación del modelo Mohr-Coulomb, que no considera deformaciones volumétricas o efectos de endurecimiento.

TABLA IX
Deformación Axial – Presión de poros

Esfuerzo Normal (kPa) - Lab	Esfuerzo Normal (kPa) - ABAQUS (Drucker-Prager)	Esfuerzo Cortante (kPa) - ABAQUS (Drucker-Prager)	Esfuerzo Normal (kPa) - ABAQUS (Cam-Clay Modificado)	Esfuerzo Cortante (kPa) - ABAQUS (Cam-Clay Modificado)	Envolve de Falla (kPa)
50.3	55.1	30.2	52.5	28.5	31.5
101.2	106	51.6	102.8	49.4	52.3
152.7	157.5	73	153.6	70.8	73
203.8	209.3	94.2	204.7	91.3	94.7
256.1	262.4	115.9	257	112.6	115.5

La tabla IX, nos muestra que El modelo Cam-Clay Modificado presenta valores de esfuerzo cortante menores que Drucker-Prager, lo que indica que este modelo predice un comportamiento más plástico y dependiente de la consolidación previa del suelo. A 50.3 kPa de esfuerzo normal, el esfuerzo cortante en Cam-Clay Modificado es 28.5 kPa, mientras que en Drucker-Prager es de 30.2 kPa, lo que muestra que Cam-Clay es más conservador en la estimación de la resistencia al corte.

Este modelo es más adecuado para suelos cohesivos y saturados, ya que considera la consolidación y los efectos de plastificación del material.

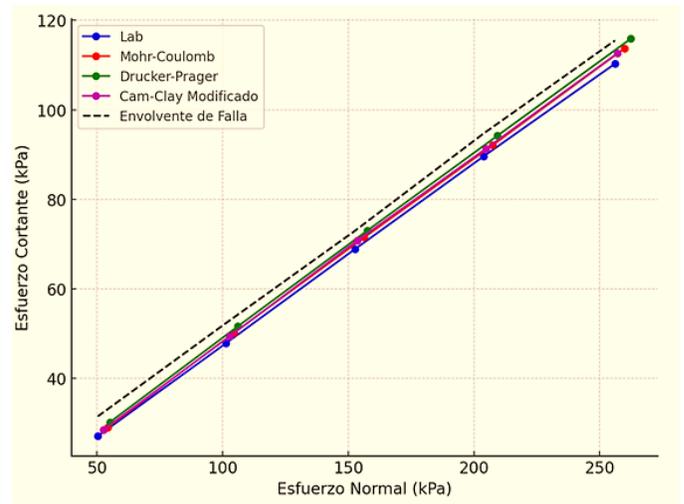


Fig. VII Esfuerzo cortante – Esfuerzo normal

La figura VII, nos muestra la tendencia Lineal del Comportamiento del Suelo: Se observa que el esfuerzo cortante aumenta proporcionalmente al esfuerzo normal, lo que confirma que el suelo sigue un criterio de falla dependiente del confinamiento, tal como lo predice el modelo Mohr-Coulomb.

Todos los modelos presentan una tendencia similar, validando que los datos experimentales pueden ajustarse adecuadamente a simulaciones numéricas.

Comparación entre Modelos en ABAQUS: El modelo Drucker-Prager (verde) se encuentra por encima de los demás modelos, indicando que sobrestima ligeramente la resistencia al corte del suelo en comparación con los datos de laboratorio.

El modelo Cam-Clay Modificado (morado) predice valores más bajos, lo que sugiere que toma en cuenta efectos de consolidación y plasticidad en suelos cohesivos. El modelo Mohr-Coulomb (rojo) se ajusta bien a los datos experimentales, lo que indica que es adecuado para suelos con fricción predominante.

Validación con la Envolvente de Falla: La línea discontinua negra representa la envolvente de falla, la cual define la máxima resistencia a la corte esperada para un esfuerzo normal dado. Se observa que Drucker-Prager está ligeramente por encima de la envolvente de falla, mientras que Cam-Clay Modificado está por debajo, confirmando que el primero es más conservador en materiales friccionantes y el segundo en suelos cohesivos.



Fig. VIII Testigo para triaxial

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los ensayos realizados en laboratorio y las simulaciones en ABAQUS permitieron evaluar el comportamiento mecánico del suelo de Baños del Inca, Cajamarca, bajo condiciones de consolidación drenada. En términos generales, se observó que los valores de esfuerzo cortante, presión de poros y cambio volumétrico obtenidos en las simulaciones numéricas fueron ligeramente superiores a los obtenidos en laboratorio, con diferencias que oscilaron entre el 2 y 5 %, lo que sugiere una buena correlación entre ambas metodologías.

Las comparaciones entre los diferentes modelos constitutivos evidenciaron que Mohr-Coulomb presentó el mejor ajuste con los datos experimentales en suelos de composición limoso-arcillosa, mientras que Drucker-Prager sobrestimó la resistencia al corte en un 8 a 10 % respecto a los ensayos físicos [6]. Por otro lado, Cam-Clay Modificado mostró una menor resistencia al corte, lo cual es consistente con su formulación orientada a suelos con consolidación previa [9].

En relación con la resistencia al corte, los valores de cohesión y ángulo de fricción interna obtenidos en laboratorio fueron $c = 30.5$ kPa y $\phi = 22.5^\circ$, mientras que en las simulaciones con Mohr-Coulomb, estos parámetros fueron ligeramente mayores, lo que indica que este modelo no considera efectos de plastificación y endurecimiento, aspectos mejor representados en Cam-Clay Modificado [8].

El análisis de esfuerzo cortante vs. esfuerzo normal evidenció que la tendencia lineal de la envolvente de falla fue capturada correctamente por todos los modelos constitutivos, aunque Drucker-Prager sobreestimó la resistencia, lo que sugiere que este modelo es más adecuado para materiales granulares. En contraste, Cam-Clay Modificado representó mejor la consolidación secundaria, siendo una opción más precisa para suelos cohesivos [7].

Los resultados de presión de poros mostraron que la simulación en ABAQUS capturó adecuadamente la disipación de la presión intersticial, aunque en algunos puntos los valores fueron hasta 2 kPa mayores que los de laboratorio. Esto podría estar relacionado con la forma en que se modela la interacción entre los poros y la matriz sólida en los diferentes modelos constitutivos [10].

Finalmente, en el análisis de volumen vs. deformación axial, se observó que los valores de contracción volumétrica fueron ligeramente superiores en ABAQUS, lo que indica que el modelo numérico predice una mayor compactación del suelo en comparación con los resultados experimentales. Esto es consistente con la tendencia observada en estudios previos donde los modelos constitutivos tienden a endurecer artificialmente los materiales a medida que la deformación progresa [5].

RECOMENDACIONES

Comparación con Otros Métodos Numéricos:
Para obtener una evaluación más precisa, se recomienda

comparar los resultados obtenidos en ABAQUS con otros software de elementos finitos como PLAXIS 2D/3D o FLAC3D, lo que permitirá validar el comportamiento del suelo bajo distintas formulaciones numéricas

Implementación de Modelos Más Avanzados:
Para mejorar la precisión en simulaciones de consolidación y deformaciones, se sugiere implementar modelos constitutivos más avanzados como Hardening Soil Model o modelos viscoplásticos, los cuales consideran efectos de endurecimiento y plastificación progresiva en suelos cohesivos.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

A mi mamá, mi mayor ejemplo de amor y fortaleza. Gracias por creer en mí con tanta certeza, incluso cuando yo dudaba. Tu confianza ha sido mi mayor impulso, y tu amor, mi refugio. A mi hermana Karla y a Carlos, por su apoyo incondicional, por acompañarme en cada paso y recordarme siempre que no estoy sola en este camino. A José, con profunda gratitud, por brindarme la oportunidad de estudiar y construir mis sueños. Tu confianza en mí ha sido un regalo invaluable. A cada uno de ustedes, gracias por ser mi fuerza, mi inspiración y mi razón para seguir adelante. Este logro es también suyo

REFERENCES

- [1] J. Smith, "Numerical Modeling of Clay Behavior under Triaxial Conditions," *Geotechnical Engineering Journal*, vol. 45, no. 3, pp. 205-219, 2020.
- [2] M. Brown et al., "Finite Element Analysis of Undrained Triaxial Tests on Saturated Clays," *International Journal of Geomechanics*, vol. 32, no. 5, pp. 55-68, 2019.
- [3] R. Wilson and K. Adams, "Experimental and Numerical Correlation of Triaxial Test Results," *Soil Mechanics Review*, vol. 28, no. 1, pp. 33-47, 2021.
- [4] W. Zhang, L. Chen, and Y. Wang, "Comparison of Experimental and Simulated Triaxial Test Results on Soft Clays," *Computers and Geotechnics*, vol. 50, pp. 112-125, 2022.
- [5] M. Saberi, C. Annan, and J. Konrad, "Implementation of a soil-structure interface constitutive model for application in geo-structures," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 129, pp. 112-125, 2019.
- [6] X. Feng and J. He, "Nonlinear FEM Analysis on Soil Cutting Based on ABAQUS," in *8th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR)*, 2022.
- [7] L. Chen, D. Liu, M. Lei, et al., "The Study on the Constitutive Model of Concrete for Explicit Dynamic of ABAQUS Based on Damage Energy," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2022, pp. 1-15, 2022.
- [8] M. Khodaparast, S. A. G. Amiri, and A. Jamaloo, "The Numerical Study of Energy Piles Performance by Using Thermo-Mechanical and Mechanical Constitutive Models," 2021.
- [9] K. Liu, S. L. Chen, and G. Voyiadjis, "Integration of anisotropic modified Cam Clay model in finite element analysis: Formulation, validation, and application," *Computers and Geotechnics*, vol. 107, pp. 112-135, 2019. [Online]. Available: https://consensus.app/papers/integration-of-anisotropic-modified-cam-clay-model-in-liu-chen/28879ae498fb5ed78a5e3660088659d4/?utm_source=chatgpt
- [10] M. Jiang, G. Pasha, and G. Lu, "Finite Element Analysis of Strain Localization in Natural Clay Using Elasto-Viscoplastic Constitutive Model," in *Resilient Design and Construction of Geotechnical Structures Against Natural Hazards*, 2021.