

Influencia de la velocidad de corte en el comportamiento de geomateriales y la estimación de sus parámetros geotécnicos

Rubén Alejandro Quiñonez Samaniego

Profesor Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, rquinonez@ing.una.py

Miguel Enrique Paats Nicora

Candidato a Máster en Ciencias de la Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, Asunción, Paraguay, mpaats@fiuna.edu.py

Débora Aurora Godoy

Ingeniera Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, debgodoy@fiuna.edu.py

Matias Alejandro Paiva Martinez

Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, mpaiva@fiuna.edu.py

Eduardo Bittar Marin

Profesor Investigador Asociado, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, ebittar@ing.una.py

RESUMEN: El propósito de la investigación es evaluar el grado de influencia que tiene la velocidad de corte en la determinación de los parámetros geotécnicos en los geomateriales mediante los ensayos de Corte Directo y Triaxial Estático para un suelo del grupo A-6 cuya muestra se obtuvo de la ciudad de Asunción. La clasificación y caracterización de la muestra de suelo se realizó través de ensayos de Granulometría y Límites de Atterberg. Las muestras fueron ensayadas a una humedad constante, cuyo valor representa la humedad media en campo donde las muestras fueron tomadas. Las presiones confinantes a las que fueron sometidas las probetas fueron de 50 kPa, 100 kPa y 200 kPa, las cuales representan la carga de asiento confinantes a las profundidades de la toma de muestra. En el ensayo de Corte Directo las probetas fueron ensayadas a las velocidades de 0,024 mm/min, 0,01 mm/min, 0,02 mm/min y a 0,00685 mm/min. Este ensayo es una de las formas más antiguas y simples para la determinación de la capacidad de resistencia al corte del suelo de forma inmediata o a corto plazo de los suelos en termino de esfuerzos totales. Sin embargo, en el ensayo Triaxial Estático las probetas fueron ensayadas a las velocidades de 0,01 mm/min y 0,00685 mm/min. En esta prueba puede ser medida la presión del agua intersticial, así como puede ser controlada la condición de drenaje, por ejemplo, permite consolidar suelos saturados de baja permeabilidad. Los parámetros geotécnicos que fueron estudiados son la Cohesión c , que es un parámetro de resistencia cortante del suelo en relación con la tensión total, y el Angulo de Fricción Interna ϕ que es el máximo ángulo posible que tiene un material de sostenerse en pendiente. Finalmente, fue estudiada la incidencia de la Viscosidad en la determinación de estos parámetros geotécnicos.

PALABRAS-CLAVES: Velocidad de corte, cohesion, fricción, corte directo, triaxial, viscosidad.

ABSTRACT: The objective of this research is to assess the impact of shear velocity on determining geotechnical parameters in geomaterials, with a particular emphasis on soil of group A-6 sourced from Asuncion. The characterization of the soil sample involved comprehensive Granulometry and Atterberg Limits tests. All tests were conducted under constant humidity conditions, reflecting the average field humidity during sample collection. The specimens underwent testing under varying confining pressures of 50 kPa, 100 kPa, and 200 kPa, corresponding to the depths of sampling. In the Direct Shear test, velocities of 0.024 mm/min, 0.01 mm/min, 0.02 mm/min, and 0.00685 mm/min were applied. This classic test method provides insights into the immediate or short-term shear strength capacity of soils in terms of total stress, offering valuable data for geotechnical analysis. In contrast, during the Static Triaxial test, specimens were subjected to velocities of 0.01 mm/min and 0.00685 mm/min. This test offers the advantage of measuring interstitial water pressure and

controlling drainage conditions. Notably, it facilitates the consolidation of saturated soils with low permeability, enhancing our understanding of their behavior under various loading conditions. The geotechnical parameters under study are Cohesion (c), reflecting the shear strength of the soil concerning total stress, and the Internal Friction Angle (ϕ), denoting the maximum angle at which a material can maintain stability on a slope. Additionally, we investigated the influence of viscosity on determining these crucial geotechnical parameters.

KEYWORDS: Direct Shear Test, Static triaxial Test, Cohesion, Internal Friction Angle, Viscosity.

1 INTRODUCCIÓN

En la ingeniería, como en cualquier otra área, el desarrollo de nuevas técnicas y con planteamiento de ventajas siempre será de un importante aporte al estudio. Para el campo de la geotecnia existen una serie de parámetros referentes al terreno que son indispensables determinarlas para la realización de cualquier construcción ya sea obras civiles, viales, obras hidráulicas. Específicamente en la mecánica de suelos, determinar la resistencia a esfuerzo cortante de los suelos es uno de los puntos más importantes, para lo cual existen varios métodos de cálculo que nos permiten determinarlos, que podrían ser por ejemplo el ensayo de corte directo (manual o digital), ensayo de compresión triaxial, ensayo de corte con veleta, entre otros. La determinación del esfuerzo cortante de una muestra de suelo nos ayuda a determinar la capacidad de soporte de un suelo, estabilidad de terraplenes y la presión contra muros de contención.

Mediante esta investigación se busca determinar, la variabilidad entre los valores de los parámetros, ángulo de fricción (ϕ) y la cohesión (c) obtenidos en dos tipos de ensayos, corte directo y el de compresión triaxial estático, realizados a distintas velocidades de aplicación de carga, para un suelo Arcilloso tipo A-6 (5). La muestra fue obtenida en la ciudad de Asunción, a unas profundidades de 20m, mediante muestreadores de SPT.

2. MARCO TEÓRICO

Al hablar sobre los efectos de la velocidad de deformación sobre la resistencia no drenada de los suelos plásticos muchas veces se recorre al uso del término "viscosidad" de un suelo, lo cual se usa de manera genérica. El efecto de agua adsorbida en el comportamiento de la arcilla. Teniendo como base las descripciones hechas por Terzaghi (1941) las partículas de arcillas están envuelta por una capa de agua adsorbida viscosa. Entre dos granos de suelo contiguos el agua absorbida se encuentra en el estado sólido y fuertemente adherida a la superficie de los granos. A medida que estos granos de suelo se van alejando la viscosidad del agua absorbida va disminuyendo hasta que a partir de la distancia "d", el agua se convierte en agua libre.

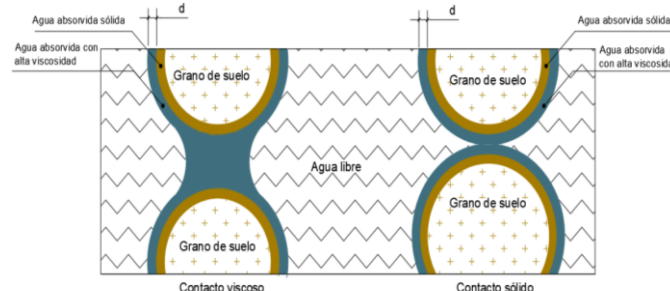


Figura 1. Tipos de contactos entre granos de arcillas. Fuente: Adaptación de Terzaghi 1941.

Los contactos entre granos de arcilla se hacen a través de agua absorbida y pueden darse a través de agua adsorbida sólida (contacto sólido) o de agua adsorbida viscosa. Ambos tipos de contactos transmiten tensiones efectivas. Una parte de la tensión de corte τ es resistida por una fracción de fricción (τ_f): $\tau_f = \sigma' \tan \phi_{mob}$. Y por una parte viscosa (τ_v): $\tau_v = \eta(e) \frac{d\epsilon_s}{dt}$. La expresión para la tensión cortante para un suelo viscoso es:

$$\tau = \sigma' \tan \phi_{mob} + \eta(e) \frac{d\epsilon_s}{dt}$$

Esta expresión fue deducida admitiéndose una resistencia viscosa movilizada en el agua absorbida, tanto en los contactos viscoso, como en los contactos sólidos. (Schnaid et al., 2021). Para determinar la parte viscosa (τ_v) se recurre al estado de deformaciones para cualquier plano, donde:

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2} * \text{Sen}2\alpha$$

Por lo tanto,

$$\tau_v = \frac{1}{2} \eta(e) \frac{d(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)}{dt} * \text{Sen}2\alpha$$

Como en un ensayo Triaxial Consolidado No Drenado se tiene $\varepsilon_v = 0$, $\varepsilon_3 = -\frac{1}{2}\varepsilon_1$, así:

$$\tau_v = \frac{3}{4} \eta(e) \frac{d\varepsilon_1}{dt} * \text{Sen}2\alpha = \mathcal{V} * \text{Sen}2\alpha$$

Esta expresión representa la ecuación paramétrica de una elipse, que recibe el nombre de Elipse de Viscosidad o Elipse de Taylor, en la cual el valor de \mathcal{V} , es el valor del semi eje menor, la elipse de tensión de corte de la parte viscosa se escribe de la siguiente forma;

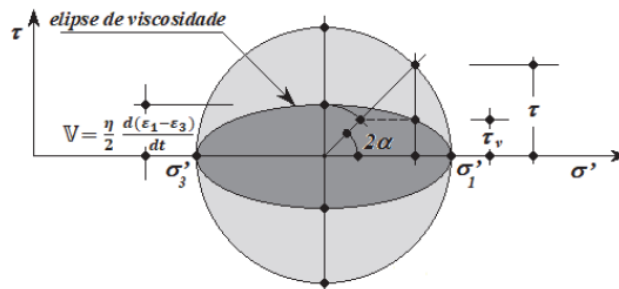


Figura 2. Elipse de viscosidad o elipse de Taylor. (Schnaid et al., 2021)

Pero también, la resistencia al corte está compuesta de una resistencia debida a la fricción τ_f .

$$\tau_f = \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} - \mathcal{V} \right) * \text{Sen}2\alpha$$

Que así mismo, esta expresión representa la ecuación paramétrica de una elipse. Esta elipse recibe el nombre de Elipse de Fricción o Elipse de Coulomb.

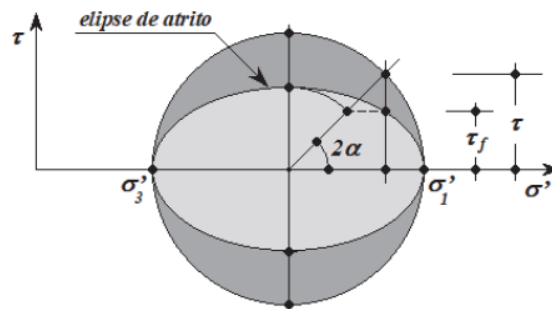


Figura 3. Elipse de fricción o elipse Coulomb. (Schnaid et al., 2021).

Cuando se realiza un ensayo Consolidado No Drenado en un suelo saturado, la relación de vacíos se mantiene constante. Convencionalmente, un ensayo Consolidado No Drenado se realiza con velocidad de deformación constante, tal que la parte viscosa permanece constante. Otra conclusión inmediata es que, como la parte viscosa del esfuerzo cortante depende de la velocidad de deformación, tan pronto como el ensayo se pone en marcha en una prueba, la resistencia viscosa se moviliza instantáneamente a su valor total (con deformación igual a cero) y permanece constante hasta el final de la prueba. Esto significa que, en el caso de suelos normalmente densos, por ejemplo, el camino (la trayectoria) de esfuerzos efectivos (σ'_1) en un plano s' - t' da un salto de 45° a la derecha y luego cambia de dirección caminando hacia la izquierda como se ilustra.

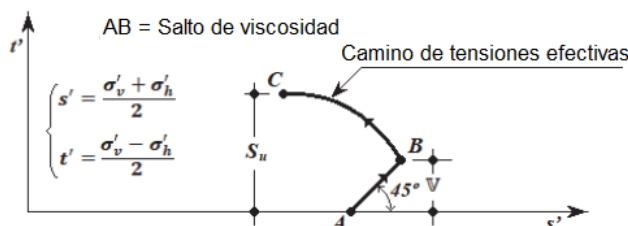


Figura 4. Caminho de tensiones efectivas. Fuente: (Schnaid et al., 2021)

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Materiales y equipos utilizados

Las muestras de suelos utilizados para los ensayos son suelos tipo A-6 extraídas en la ciudad de Asunción, Paraguay, en inmediaciones de la zona comercial del Barrio Ykua Sati con las siguientes coordenadas aproximadamente 25°17'05.9"S 57°33'48.1"W. El suelo fue extraído de una profundidad promedio de aproximadamente de 20 m, mediante muestreadores SPT en forma alterada. Las mismas fueron reacondicionadas en laboratorio, en humedad y densidad in-situ previa realización de los ensayos.

La clasificación de los suelos según la Norma AASHTO T-11-(2020) y la Norma ASTM D-2487-(2020) con los siguientes resultados:

Tabla 1 Resumen clasificación de suelos.

Muestra de Suelo	Asunción
Clasificación AAASHTO	A-6 (5)
Constituyentes Principales	Suelos arcillosos
Clasificación SUCS	CH
Nombres Típicos	Arenas inorgánicas de plasticidad alta
Limite Liquido	25,8%
Limite Plástico	12,6%
Índice Plasticidad	13,2
Uso en obra	Fundaciones

Los equipos utilizados para este trabajo fueron una Prensa Triaxial Estática de marca comercial GDS Instruments y un equipo de Corte Directo Wykeham Farrance como se ilustra en la siguiente Figura 5. Cabe resaltar que todos los experimentos fueron realizados con una humedad de $\omega=12,5\%$ que es la humedad media de campo y un peso específico aparente seco $\gamma = 18,2 \frac{kN}{m^3}$.

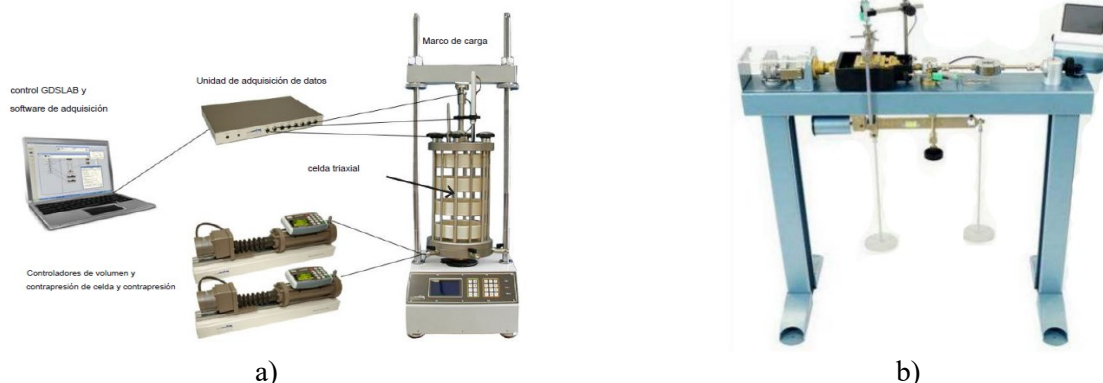


Figura 5. a) Equipo Triaxial Estático, b) Equipo de Corte directo

3.2 Consideraciones y variables para los ensayos

La variable considerada en los ensayos con el Corte Directo y el Corte Triaxial No Drenado fue la velocidad de deformación. En este estudio fueron considerados factores controlables el peso específico seco, la humedad y acondicionamiento de las muestras. En la Figura 6, se puede mostrar algunas imágenes de los ensayos realizados.

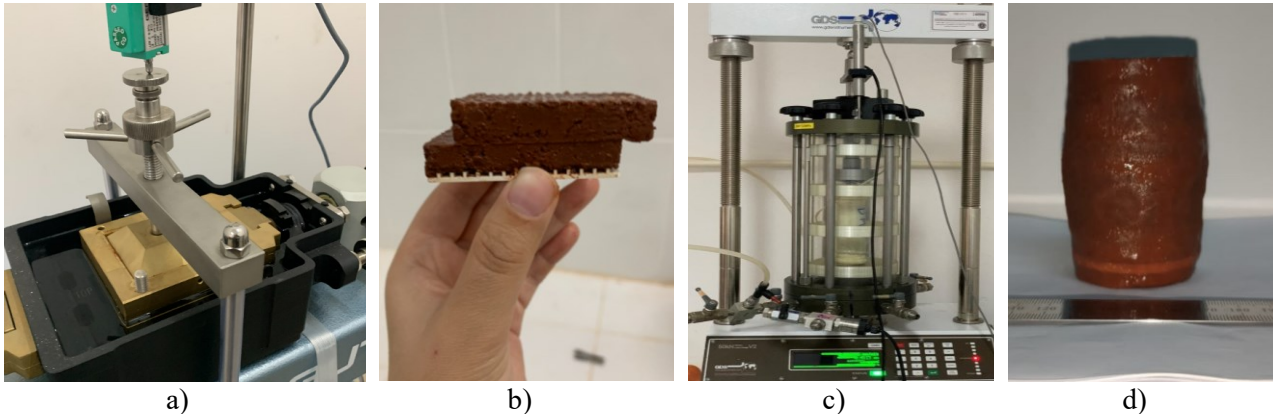


Figura 6. a) y b) Ensayo de Corte Directo, c) y d) Ensayo de Compresión triaxial No drenada

4 METODOLOGIA

Se procedió al ensayo de 4 grupos de muestras de suelo, cada grupo consta de 3 muestras, en donde a la primera muestra se fue aplicada una tensión normal de 50 kPa, la segunda muestra una carga de 100 kPa y a la tercera muestra una tensión de 200 kPa. La velocidad de corte para el primer grupo es de 0,0024 mm/min, para el segundo grupo 0,02 mm/min, para el tercer grupo 0,01 mm/min y para el cuarto grupo de 0,00685 mm/min.

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 Influencia de la velocidad de ensayo de corte directo ASTM D 3080M-11(2020).

De acuerdo a los ensayos realizados con diferentes velocidades de ensayos se obtuvieron los siguientes resultados que se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2 Resumen de los Resultados de Corte Directo.

Ensayo	N [kPa]	τ [kPa]	Parametros geotécnicos
1 – Velocidad de desplazamiento axial de 0,024 mm/min [2,4% de la dimension axial de la caja de corte]	50	45,97	Cohesión = 13,28 kPa ϕ = 31,27 kPa
	100	70,51	
	200	135,89	
2 – Velocidad de desplazamiento axial de 0,02 mm/min [2% de la dimension axial de la caja de corte]	50	41,78	Cohesión = 13,05 kPa ϕ = 29,32 kPa
	100	68,23	
	200	125,71	
3 – Velocidad de desplazamiento axial de 0,01 mm/min [1% de la dimension axial de la caja de corte]	50	34,39	Cohesión = 15,74 kPa ϕ = 24,57 kPa
	100	67,75	
	200	105,06	
4 – Velocidad de desplazamiento axial de 0,00685 mm/min [0.685% de la dimension axial de la caja de corte]	50	30,96	Cohesión = 19,61 kPa ϕ = 20,81 kPa
	100	69,11	
	200	91,80	

5.2 Influencia de la velocidad de ensayo en el Ensayo Triaxial Consolidado No drenado (CU). Norma ASTM D 4767-(2020).

De acuerdo a los ensayos realizados con diferentes velocidades de ensayos se obtuvieron los siguientes resultados que se muestran en la Figura 7.

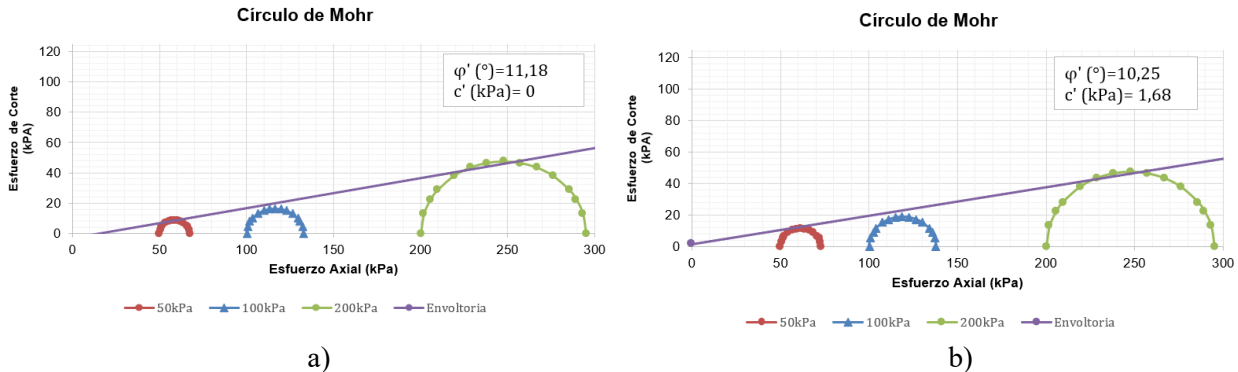


Figura 7. Círculos de Mohr obtenidos de los ensayos triaxiales a) al 0,685 % correspondiente a 0,685 mm/hora; b) al 1% correspondiente a 1 mm/hora.

5.3 Elaboración de las Elipses de Viscosidad

5.3.1. Camino de tensiones efectivas y salto de la viscosidad.

A continuación, se muestra un ejemplo del camino de tensiones efectivas obtenido del ensayo Triaxial Estático realizado. Teniendo en la ordenada q (representa a la tensión desviadora) y en las abscisas p (tensiones confinantes). Con las curvas obtenidas es posible determinar gráficamente las viscosidades de los suelos de manera aproximada correspondiente para cada velocidad de deformación y carga axial aplicada.

Donde: $q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ $p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$

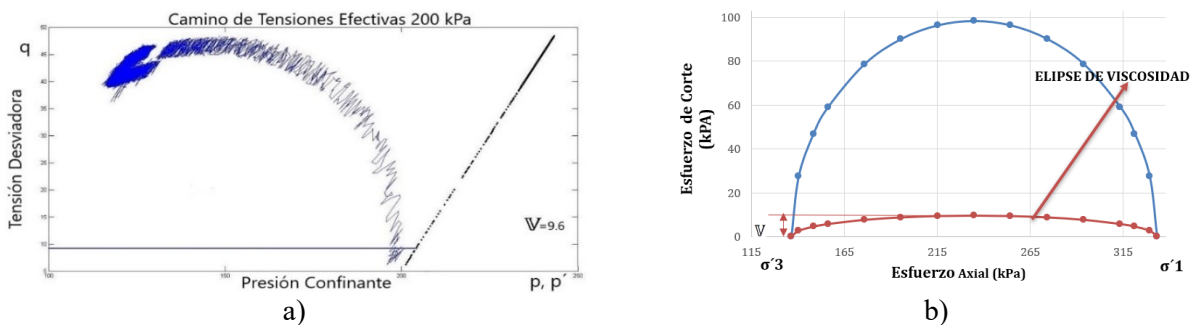


Figura 8. a) Camino de tensiones efectivas 200 kPa. Ejemplo de la determinación de viscosidades; b) Círculo de Mohr- Elipse de viscosidad 200 kPa (Vel=0.685%).

5.4 Criterio de ruptura llevando en cuenta la velocidad de deformación parcela viscosa.

Mediante la determinación de las elipses de viscosidad fue posible obtener los valores de viscosidad para las velocidades de deformación correspondiente al 0.685% y 1% de la dimensión axial para ensayos de compresión triaxial.

Asumiendo que la viscosidad será la misma para los ensayos de corte directo, para la misma velocidad de deformación. Nos queda determinar la viscosidad para la velocidad de deformación de 2% y 2.4%. Para las cuales no fue posible realizar el ensayo triaxial CU, debido a problemas técnicos. Se realizó la operación de interpolación para así poder obtener los valores de viscosidad para las velocidades de 2% y 2.4% en el ensayo de corte directo.

Finalmente, se evalúan las envolventes de ruptura tomando en cuenta las viscosidades como se muestra en la Figura 9.

Ensayo de Compresión Triaxial Estático.

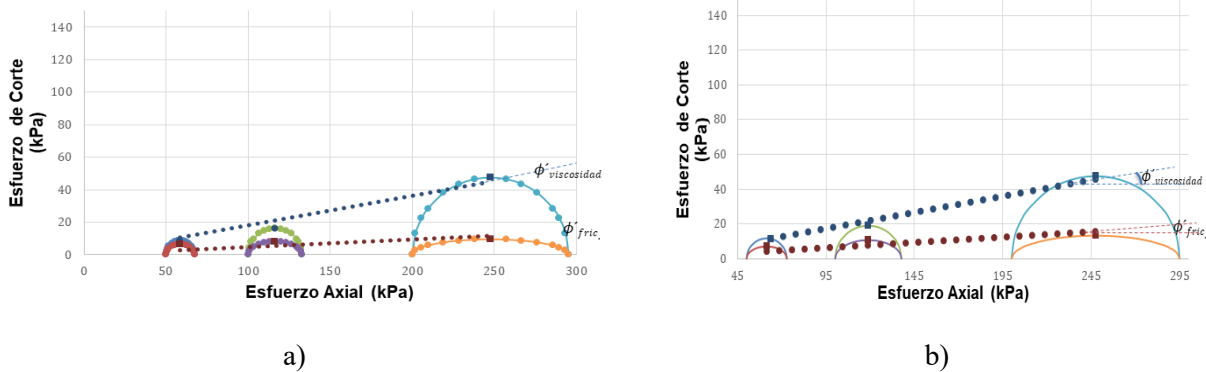


Figura 9. Envolvente de falla teniendo en cuenta la parcela viscosa. para la velocidad. a) 0,685%; b) 1%

Ensayo de Corte Directo

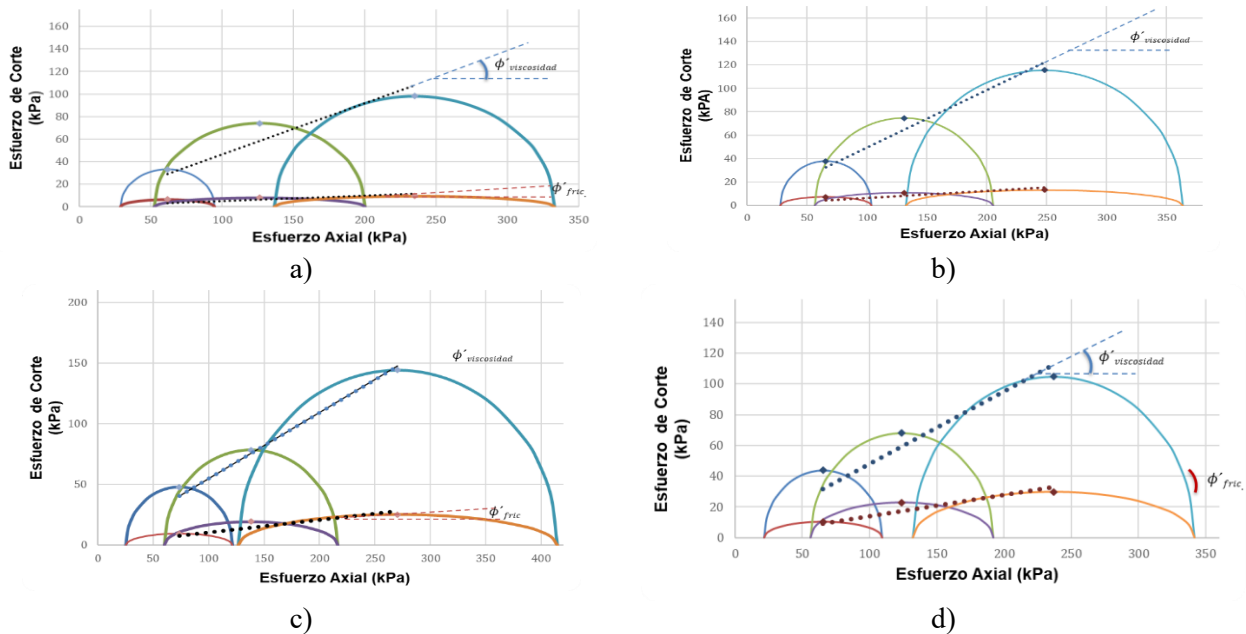


Figura 10. Envolvente de falla teniendo en cuenta la parcela viscosa. para la velocidad. a) 0,685%; b) 1%; c) 2%; d) 2,4%.

5.5 Variación entre los valores de la cohesión y ángulo de fricción para los ensayos de Corte Directo y Compresión Triaxial.

Observando los resultados obtenidos para el tipo de suelo estudiado, se tiene una resistencia aparente al Esfuerzo Cortante mayor para solicitaciones cuyo tiempo de duración sea más corto que aquellas solicitaciones cuyas cargas tengan un tiempo de aplicación más largo, para una misma deformación. Los resultados obtenidos en el ensayo de Compresión Triaxial son menores a sus homólogos que fueron obtenidos en el de Corte Directo, el ensayo de Corte Directo arroja resultados más permisivos. Por ello, los parámetros geotécnicos obtenidos con este ensayo pueden ser reducidos para una mejor y así no alejarse de las condiciones reales de los geo materiales.

5.6 En cuanto a la variación de velocidad de deformación

La velocidad de aplicación de la carga tiene una gran influencia en el comportamiento mecánico del suelo, por lo tanto, en la obtención de los parámetros geotécnicos, esto puede observarse en los Resultados obtenidos, con los valores obtenidos para la Tensión de Corte, también en los valores del Angulo de Fricción y de la Cohesión.

Del estudio de la Elipse de Taylor, se observa que, la resistencia al corte de un suelo está compuesta por dos parcelas, Resistencia por Fricción y la Resistencia por viscosidad, teniendo mayor preponderancia esta última. En los círculos de Mohr graficados puede observarse claramente la afirmación anterior, los rangos de valores obtenidos, en cada velocidad de ensayo, para el ϕ movilizado por fricción es mucho menor que los rangos de valores obtenidos para el ϕ movilizado por viscosidad. La Resistencia al corte del suelo queda dependiente por lo tanto de la velocidad de deformación cortante.

También, se concluye, que la velocidad define la tipología del ensayo, pudiendo realizarse ensayos Consolidados No Drenados y Consolidados Drenados. Para velocidades bajas existe una variación de volumen en el cuerpo de prueba, por lo que puede medirse esta variación volumétrica, Ensayo Consolidado Drenado. En los casos donde las velocidades son altas, la variación volumétrica no puede ser cuantificada.

6 CONCLUSIONES

Del análisis de los resultados obtenidos en el Corte Directo y Compresión triaxial, a las distintas velocidades, se concluye que;

- Para los distintos valores obtenidos de ϕ , se concluye que la velocidad con que la carga solicita al suelo arroja valores permisivos a medida que esta vaya creciendo, y para los valores de la cohesión c , el ensayo de corte directo se vuelve más exigente al aumentar la velocidad ya que los mismos tienen una tendencia a disminuir.
- En cada velocidad de ensayo, para el ϕ movilizado por fricción es mucho menor que los rangos de valores obtenidos para el ϕ movilizado por viscosidad. La Resistencia al corte del suelo queda dependiente por lo tanto de la velocidad de deformación cortante.
- Los resultados obtenidos de ángulo de fricción y cohesión en el ensayo de Compresión Triaxial son menores a sus homólogos que fueron obtenidos en el de Corte Directo

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Schnaid, F., Martins, I. S. M., Delgado, B. G., & Odebrecht, E. (2021). Velocidade de carregamento na estimativa de parâmetros geotécnicos. *Geotecnia*, 152, 405-434.
- Terzaghi (1941) *Mecánica de suelos teórica* Karl Terzaghi
- Norma AASHTO T-11-(2020) Método de prueba estándar para materiales con un grosor inferior a 75 μm (tamiz n.º 200) en agregados minerales mediante lavado
- Norma ASTM D-2487-(2020) Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)
- Norma ASTM D 4767-(2020) Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils 1
- Norma ASTM D3080/D3080M-11 Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions (Withdrawn 2020)