

INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN APROBADO EN EL 2023**1.0. Título del proyecto:**

DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA NO DRENADA MEDIANTE LA EJECUCIÓN DEL ENSAYO PENETRÓMETRO DE CONO EN SUELOS ARCILLOSOS DE LA REGIÓN SAN MARTÍN

2.0. Autor/es del proyecto:

Miriam Escalaya¹

Marco Hernández²

César Rojas³

Ronald Vega⁴

3.0. Resumen

En el presente Proyecto de Investigación se pretende determinar experimentalmente la resistencia no drenada (S_u) de un suelo arcilloso por métodos no convencionales en la práctica de la Ingeniería Peruana. Para ello se utilizó el Penetrómetro de Cono que es un equipo de laboratorio usado comúnmente en la obtención del límite líquido de los suelos. Con la finalidad de calibrar los resultados obtenidos, se utilizó un equipo de Veleta de Laboratorio, el cual proporciona la medida directa de S_u .

Para el estudio se realizaron un total de 35 excavaciones a cielo abierto o calicatas, en diferentes localidades de la región San Martín, en la Selva Peruana, donde se recolectaron muestras inalteradas de suelo arcilloso. A estas muestras se les realizó, adicionalmente, ensayos de caracterización de suelos. Debido a que varias de las muestras presentaban una consistencia mayor a la capacidad de trabajo de la veleta de laboratorio, la investigación se limitó a 13 muestras inalteradas. Como resultado, se obtuvo una correlación empírica que permite determinar la resistencia no drenada de suelos arcillosos a partir del ensayo de Penetrómetro de Cono, la cual, debido a su facilidad de uso, se convierte en una alternativa rápida y económica para su determinación.

Palabras clave: *Penetrómetro de cono, resistencia no drenada, suelo arcilloso, veleta de laboratorio*

Abstract:

In this Research Project the aim is to experimentally determine the undrained shear strength (S_u) of a clay soil by non-conventional methods in the practice of Peruvian Engineering. For this, the Fall Cone is used, which is a laboratory equipment commonly used to obtain the liquid limit of soils. In order to calibrate the results

¹ Docente de la carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Ricardo Palma, Lima Perú, <https://orcid.org/0000-0002-0620-8633>, miriam.escalaya@urp.edu.pe

² Docente de la carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Ricardo Palma, Lima Perú, <https://orcid.org/0000-0003-1534-428X>, marco.hernandez@urp.edu.pe

³ Estudiante de la Carrera de la Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Ricardo Palma, Lima Perú, <https://orcid.org/0009-0002-0180-1160>, 201811351@urp.edu.pe

⁴ Estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Ricardo Palma, Lima Perú, <https://orcid.org/0009-0005-3498-5586>, ronald.vega@urp.edu.pe

obtained, a Mini Vane Shear Test is being used, which provides direct measurement of S_u .

For the study, a total of 35 excavations or pits were carried out in different locations in the San Martín Region, in the Peruvian Amazon, where undisturbed samples of clay soil were collected. Additionally, soil characterization tests are performed on these samples. Because several of the samples had a consistency greater than the working capacity of the laboratory vane, the research was limited to 13 unaltered samples. As a result, an empirical correlation was obtained that allows determining the undrained resistance of clay soils from the Cone Penetrometer test, which, due to its ease of use, becomes a quick and economical alternative for its determination.

Keyword: *Fall cone, undrained Shear strength, Clay soil, mini vane shear test*

4.0. Introducción

La resistencia no drenada es un importante parámetro en los proyectos de ingeniería geotécnica donde el suelo es cargado rápidamente, sin drenaje del agua intersticial. Esta puede ser evaluada mediante ensayos tanto de campo como de laboratorio. Debido a la escasez de equipos apropiados para realizar estos ensayos, en la presente investigación se propone el uso del ensayo Penetrómetro de Cono para la determinación de la resistencia no drenada de suelo arcillosos blandos. Para el desarrollo de la investigación se seleccionaron suelos de la región San Martín.

Los trabajos de campo se iniciaron en el mes de agosto del presente año, una vez asignada la partida presupuestal. El equipo de investigación realizó las visitas a las ciudades de Tarapoto, Moyobamba, Rioja y Nueva Cajamarca para reconocimiento de los suelos arcillosos blandos a investigar. Los trabajos de campo tuvieron que realizarse en dos campañas de campo distintas debido a la presencia de lluvias torrenciales en la zona.

Para el cumplimiento del objetivo principal de la investigación, fue necesario realizar la calibración del penetrómetro de cono mediante la obtención de la resistencia no drenada a través de una prueba alternativa. Para ello, se consideró el uso del equipo de veleta de laboratorio, el cual proporciona el valor de S_u directamente. Con tal finalidad, dentro de las partidas del Proyecto se consideró la compra de dicho equipo.

El equipo de Veleta de laboratorio fue adquirido por la Universidad Ricardo Palma, mediante la partida presupuestal N33691. El día 8 de setiembre se emitió la orden de compra y se procedió a la importación del equipo, el que fue entregado al Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad el día 14 de noviembre. A partir de esa fecha se inició con los trabajos de aprendizaje del manejo del equipo y las calibraciones correspondientes.

5.0. Planteamiento del Problema

Una de las propiedades geotécnicas de gran interés en proyectos que envuelven suelos finos saturados es la resistencia al corte no drenada (S_u) ofrecida por el suelo cuando es cargado rápidamente sin drenaje. Esta situación comúnmente es crítica, por lo que un gran número de proyectos geotécnicos requiere el conocimiento de este parámetro en la fase de planteamiento de soluciones, dimensionamiento y evaluación de las obras geotécnicas; como es el caso del diseño de cimentaciones, análisis de estabilidad a corto plazo, etc. La evaluación de esta propiedad en el laboratorio, comúnmente se realiza mediante ensayos triaxiales, en los cuales la muestra tiene que ser preparada cuidadosamente para mantener las condiciones originales de

campo, lo que en el caso de suelos arcillosos blandos es muy difícil; además, son pocos los laboratorios, en las zonas del país donde se encuentran estos suelos, que cuentan con este ensayo.

Ante esta dificultad, la utilización de equipos de laboratorio simples, puede ser una alternativa para la obtención del parámetro S_u de estos suelos, de una manera rápida, económica y sin problemas de perturbación de la muestra. Dentro de estos equipos se tiene al Penetrómetro de Cono que es usado comúnmente en la obtención del límite líquido del suelo, y que es de fácil acceso en los laboratorios del país.

En este sentido, ¿Es posible determinar la resistencia no drenada mediante la ejecución del ensayo Penetrómetro de Cono en suelos arcillosos de la Región San Martín?

6.0. Importancia

En el Perú existen varias ciudades ubicadas sobre suelos arcillosos, donde las diversas obras pueden presentar problemas técnicos, no experimentados en otras zonas, debido a las características del suelo, a la que se suma la carencia de equipos apropiados de laboratorio para la determinación de sus principales propiedades.

El presente estudio aporta de manera significativa en la determinación de manera sencilla del valor del parámetro de resistencia no drenada (S_u), que es un parámetro importante en proyectos geotécnicos que envuelven suelos finos. Para tal fin, se plantea el uso del Penetrómetro de Cono, que es un equipo común en varios de los laboratorios del país. Esta metodología permitirá estudiar suelos muy blandos, saturados y difíciles de muestrear, de una forma eficiente y económica.

7.0. Antecedentes

El ensayo Penetrómetro de Cono fue desarrollado entre los años 1914 y 1922, por la comisión Geotécnica de Vías de Suecia; comparado con otros ensayos, es considerado un método sencillo, lo que llevó a su amplio uso en Escandinavia (Hansbo, 1957). Fue originalmente desarrollado para estimar la resistencia de suelos arcillosos remoldeados y se tornó ampliamente utilizado como método alternativo para determinar el límite líquido de arcillas (Koumoto & Houlsby, 2001), siendo incluido en las normas británicas, suecas, canadienses y japonesa.

A lo largo de los años, se han realizados diversas evaluaciones experimentales de la resistencia al corte no drenada de suelos de grano fino, basadas en el ensayo del Penetrómetro de Cono, entre ellas están las de Karlsson (1961), Wood (1985), Brown & Huxley (1996), Rajasekaran & Rao (2004), Tanaka et al (2012), Lemos, S; Pires, P (2017), Wang, et al (2013), Bastos, C. et al (2014), Gruchot & Zydron (2016), Oliveira, et al (2018), Pinto, Lima, & Berkert (2018), Cabalar, et al (2020), trabajaron con muestras de suelos artificiales y mezclas de suelos, validando el modelo propuesto por Hansbo (1957).

Adicionalmente, análisis teóricos basados en la teoría de la plasticidad corroboran la idea de que este ensayo mide la resistencia al corte del suelo (Houlsby, 1982), (Koumoto & Houlsby, 2001), (Dastider, et al; 2021).

Rajasekaran & Rao (2004) utilizaron el ensayo de Penetrómetro de Cono para medir la resistencia al corte de arcillas marinas. Los estudios indicaron que existe una relación lineal entre los resultados de los ensayos de laboratorio de Penetrómetro de Cono (FCT) y de la veleta de laboratorio (LVT) en arcillas marinas tratadas y no tratadas con cal, conforme se muestra en la Figura N°01. Los resultados permitieron

a los autores concluir que el ensayo Penetrómetro de Cono puede ser un excelente método alternativo para medir la resistencia al corte no drenada de suelos marinos blandos.

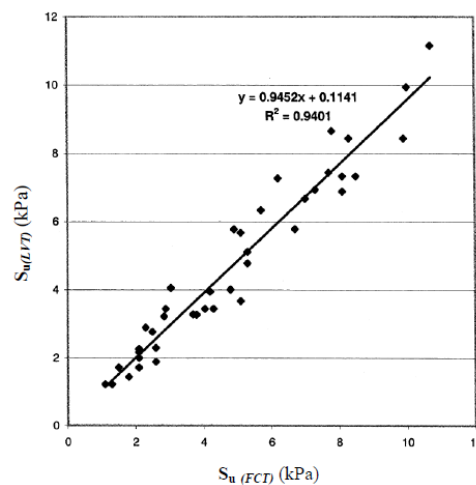


Figura N°01. Comparación de resistencia no drenada obtenida por el ensayo de cono (FCT) y veleta de laboratorio (LVT) para arcillas marinas tratadas y no tratadas con cal (Rajasekaran & Rao, 2004)

Tanaka et al (2012) evaluaron el uso del ensayo Penetrómetro de Cono (FCT) para la obtención de la resistencia no drenada y la sensibilidad de cuatro diferentes depósitos de arcilla blanda, ampliamente estudiados en Japón, mediante la comparación de resultados del ensayo FCT con los resultados obtenidos con los ensayos de compresión simple (UCT), veleta de campo (FVT) y veleta de laboratorio (LVT). Las arcillas estudiadas tenían características y parámetros diferentes, pero con resistencias relativamente próximas (entre 20 a 80 kPa). La Figura N°2(a) presenta la comparación de los resultados de la resistencia no drenada obtenida por los ensayos FCT y UCT, donde los autores reconocen la tendencia de los valores de S_u obtenidos por el ensayo de compresión simple menores a los obtenidos con el Penetrómetro de Cono. Asimismo, la Figura N° 02(b) presenta una comparación de los resultados obtenidos por el Penetrómetro de Cono y la veleta de laboratorio (LVT), donde también se observa la tendencia de los valores de resistencia obtenidos con la veleta de campo y laboratorio, menores a los obtenido con el Penetrómetro de Cono.

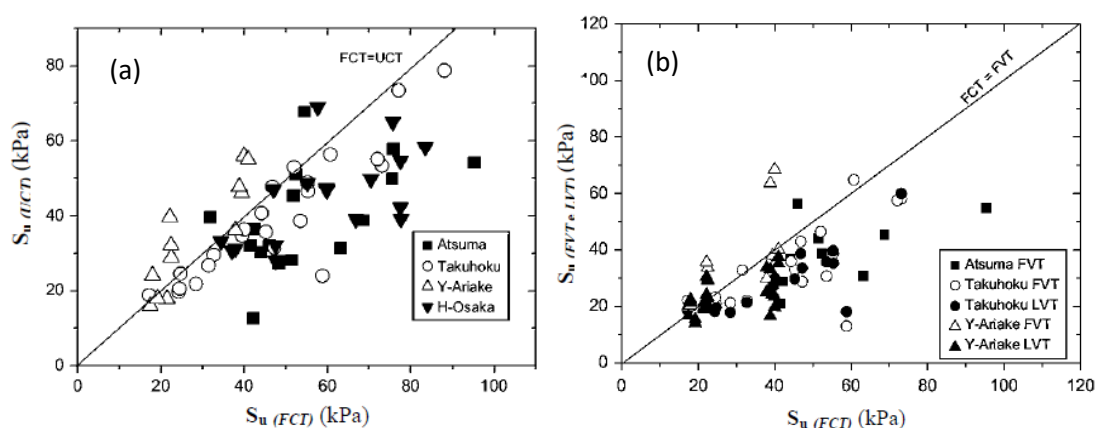


Figura N°02: Comparación de resistencia no drenada medida por los ensayos (a) compresión simple (UCT) y cono (FCT), (b) ensayos de veleta de campo (FVT), veleta de laboratorio (LVT) y cono (FCT) (Tanaka, et al; 2012)

Wang et al (2013) utilizaron la prueba de Penetrómetro de Cono y veleta de laboratorio para obtener la resistencia no drenada de sedimentos solidificados con cemento/cal del puerto de Dunkirk en Francia. Comparando los resultados obtenidos, encontraron relaciones lineales entre las resistencias obtenidas en ambos ensayos, en el rango de 0 a 6 kPa; con resistencias mayores, la discrepancia de los resultados se vuelve más evidente (Figura N°03).

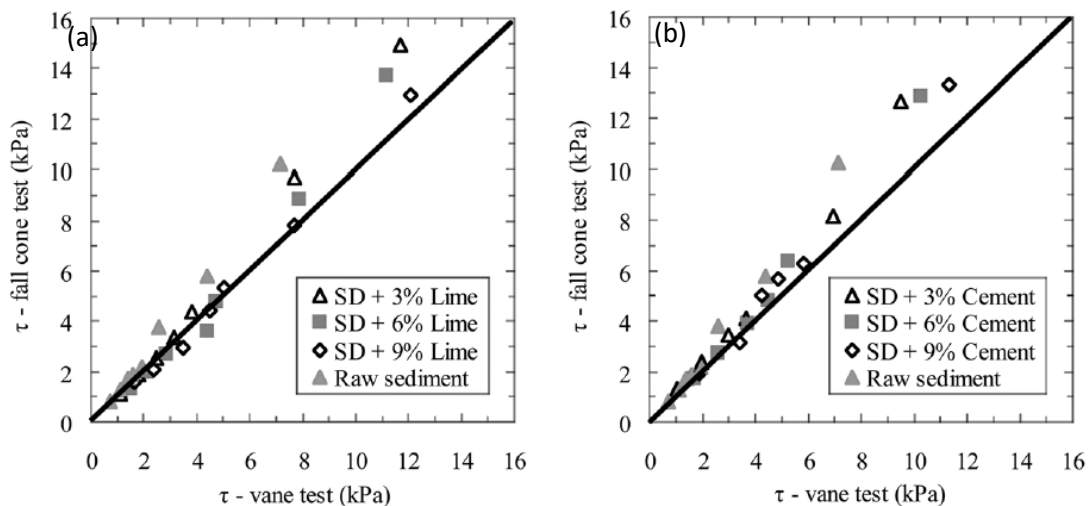


Figura N°03: Comparación de resistencia no drenada definida por el ensayo penetrómetro de cono y veleta de laboratorio (a) Tratamiento con cal, (b) Tratamiento con cemento. (Wang, Zentar, Abriak, & Xu, 2013)

Bastos et al (2014) realizaron una investigación con la finalidad de evaluar el potencial uso del ensayo Penetrómetro de Cono en la estimación de la resistencia no drenada de suelos finos (S_u); con tal fin, correlacionaron resultados de ensayos obtenidos con el cono y la paleta de laboratorio en muestras consolidadas de suelos artificiales, producidas a partir de mezclas de caolín, bentonita y arena fina. Los resultados validaron el empleo del Penetrómetro de Cono en la estimación de S_u y la aplicación del modelo propuesto por Hansbo (1957).

Lemos & Pires (2017) estimaron la resistencia no drenada de muestras inalteradas de arcilla blanda con diferentes índices de plasticidad, provenientes de las costas brasileras. La resistencia no drenada obtenida con el penetrómetro de cono se comparó con los resultados obtenidos con los ensayos de laboratorio y campo, comúnmente utilizados para obtener este parámetro: ensayos de cono y veleta de campo, y las pruebas de laboratorio de compresión no confinada, triaxial no consolidado no drenado (UU) y veleta de laboratorio. La resistencia al corte no drenada normalizada se comparó con algunas correlaciones empíricas reportadas en la literatura basadas en el índice de plasticidad, verificándose cierta similitud de comportamiento.

Canela & Fernandes (2018) utilizaron el ensayo Penetrómetro de Cono para evaluar su aplicación en la determinación del límite líquido y la resistencia no drenada, comparando sus resultados con los obtenidos con ensayos comúnmente utilizados para su obtención. Los autores evaluaron cuatro muestras de suelos arcillosos, en condición remoldeada, provenientes de la región centro-oeste de Portugal.

Cabalar, Khalaf, & Isik (2020) realizaron ensayos con el Penetrómetro de Cono y veleta de laboratorio, con la finalidad de determinar la resistencia no drenada de mezclas de arcilla con arena. Los resultados mostraron que los valores de S_u obtenidos

con la veleta de laboratorio eran mayores que los obtenidos con el Penetrómetro de Cono, y que los resultados eran influenciados significativamente por las características de la arena.

Clemente, et al (2020) evaluaron la aplicabilidad del Penetrómetro, obteniendo la resistencia no drenada mediante pruebas adicionales, como ensayos triaxiales no consolidados no drenados (UU) y ensayos de veleta de laboratorio. Los materiales utilizados en la investigación fueron suelos marinos brasileiros en condiciones inalterada y remoldeada. Concluyendo que el ensayo de Penetrómetro de Cono es compatible con los ensayos tradicionales, además de ser un método simple y rápido, pudiéndose considerar como una opción para complementar y ayudar en las evaluaciones de resistencia al corte no drenado de suelos blandos.

Dastider et al (2021, 2022) realizaron mediante un análisis de elementos finitos la simulación de la evolución de la resistencia del suelo alrededor de un cono que penetra a través del suelo. Basándose en los resultados presentaron un factor de cono modificado, K_d (Eq. 1) para ser usado en el cálculo de la resistencia no drenada, teniendo en cuenta la ganancia de resistencia dependiente de la tasa de deformación en suelos de grano fino, la inercia del suelo durante la penetración no drenada del cono, y la velocidad del cono distinta de cero al inicio de la penetración. Se cuantificaron los efectos de la tasa de deformación y las condiciones de rugosidad de la interface del cono sobre la resistencia no drenada.

$$K_d = \left[\frac{3}{\pi N_{fc} \tan^2(0.5\beta)} \right] \left(1 + \frac{h_d}{h_f} \right) = K \left(1 + \frac{h_d}{h_f} \right) \quad (\text{Eq. 1})$$

Donde K_d = Factor de cono modificado, β = ángulo del cono, N_{fc} = factor de capacidad de carga de caída del cono, h_f = profundidad de penetración del cono, h_d = altura de caída del cono.

$$N_{fc} = N_{fc0} (1 + B\mu) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde $B = 9.5$ para las condiciones de interface lisa y rugosa. El Cuadro N° 01 muestra los valores de N_{fc0} obtenidos a partir del análisis de elementos finitos con diferentes ángulos de cono β y diferentes condiciones de interface suelo-cono.

Angulo del cono, β (grados)	Factor de capacidad de carga del penetrómetro de cono	
	liso	rugoso
30	5.4	10.63
45	5.4	9.17
60	5.55	8.71
75	6.02	8.58

Cuadro N° 01: Valores de factores de capacidad de carga del penetrómetro de cono N_{fc0} obtenidos a partir de análisis de elementos finitos con diferentes ángulos de cono β y diferentes condiciones de interface suelo-cono (Dastider, et al; 2021)

La ecuación propuesta fue verificada mediante la predicción de la resistencia no drenada para dos diferentes tipos de suelos con varios contenidos de agua, teniendo en cuenta varios ángulos β del vértice del cono, con condiciones de interface cono-suelo lisas y rugosas, además incrementando la altura de caída del cono (H_d), de modo que el cono golpee la superficie del suelo con una velocidad de impacto, como mostrado en la Figura N°04.

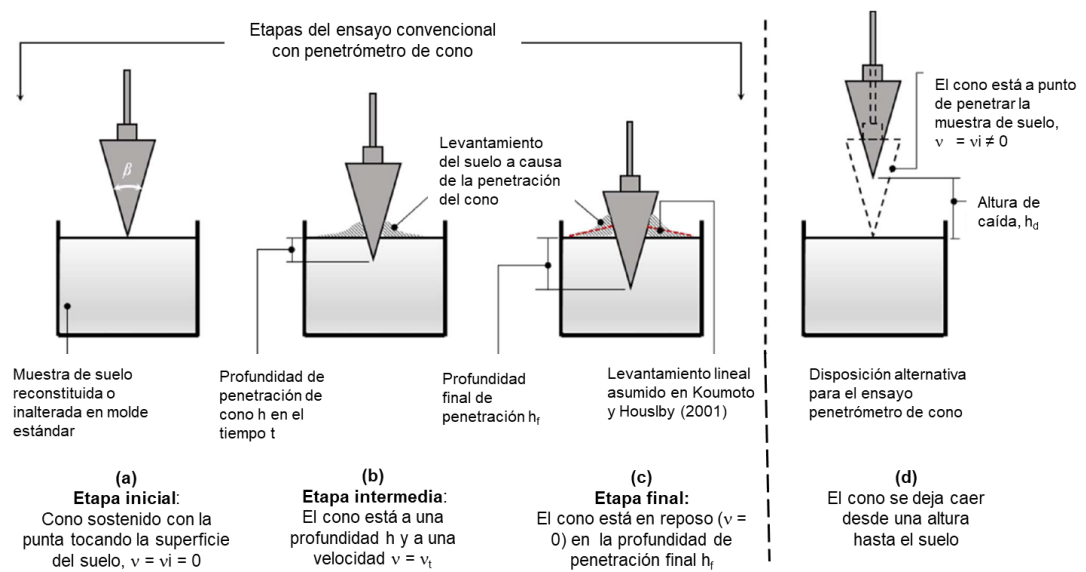


Figura N° 04: Diferentes etapas de un ensayo convencional de penetrómetro de cono y una alternativa para el ensayo penetrómetro de cono con bajo contenido de agua (Dastider, et al; 2021)

8.0. Marco Conceptual

El ensayo Penetrómetro de Cono consiste en la caída por su propio peso de un cono padrón, siendo medida la profundidad de penetración del cono en el suelo (Figura N°05).

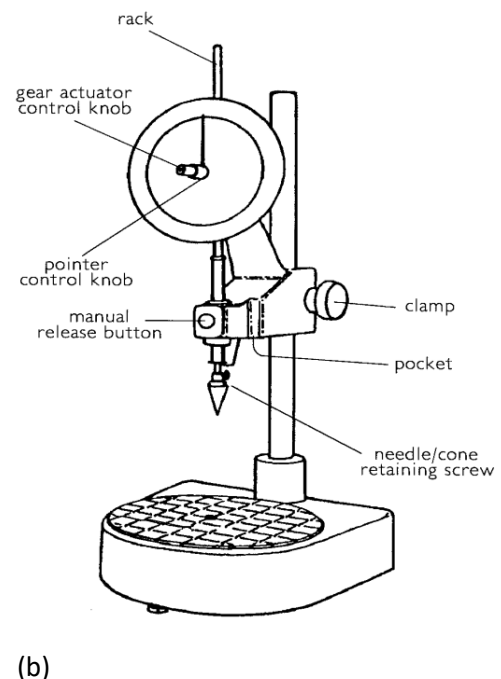


Figura N°05: Penetrómetro de Cono (a) Vista general, (b) Ilustración esquemática

Existen dos configuraciones del Penetrómetro de Cono, ampliamente utilizadas: (i) el cono de punta de 60° y 60 g de masa que es utilizado principalmente en países como Canadá, Japón, Noruega y Suecia, y (ii) el cono de punta de 30° y 80 g de masa, utilizado en Australia, Francia, Gran Bretaña y Nueva Zelanda.

El cono británico es la configuración más común, estandarizado en la Norma BS 1377-2, *Methods of Test for Soils for Civil Engineering Purposes. Part 2: Classification Test*.

Koumoto & Houlsby (2001) recomiendan el uso del cono de ángulo de 60° con masa de 60 g debido a que su base teórica es más clara; mientras que Llano-Serna, et al (2018) consideran que el ángulo más agudo del cono de 30° es más útil para evaluar la resistencia de los suelos más rígidos.

El ensayo Penetrómetro de Cono se inicia con la punta de cono apoyada sobre la superficie del suelo, posteriormente se suelta y cae por su propio peso. La profundidad de penetración final del cono en el suelo se registra después de 5 segundos. A partir de este ensayo sencillo se han derivado varias relaciones teóricas.

Un estudio detallado de Hansbo (1957) estableció la relación entre la profundidad de penetración del cono con la resistencia al corte no drenada del suelo (S_u). El análisis dimensional se basa en el movimiento del cono (análisis dinámico) y se describe a continuación:

$$S_u = K \cdot \frac{Q}{h^2} \quad (\text{Ec.3})$$

Donde:

S_u = resistencia al corte no drenada,

K = factor de cono,

Q = peso total del cono, y

h = profundidad de penetración del cono.

K es la pendiente de la relación lineal entre Q/h^2 y S_u . Es una constante empírica que depende del ángulo (α) y de la rugosidad (ξ) del cono.

Varios estudios han intentado, mediante ensayos de laboratorio cuantificar la influencia de diferentes parámetros (ej. rugosidad de la superficie del cono, la velocidad de corte, ángulo del cono) en el factor K del cono (Karlsson, 1961), (Wood D. , 1982), (Sivakumar et al, 2015), (Farias & Llano-Serna, 2016), (Vardanega, et al; 2018), (Llano-Serna & Contreras, 2020), (Zeng, et al; 2020)

Según Koumoto & Houlsby (2001), utilizando un enfoque cuasi estático, el peso Q puede aproximarse considerando la teoría de la capacidad de carga, lo que resulta en lo siguiente:

$$Q = N_{ch} S_u A = N_{ch} S_u \pi \tan^2 (\beta/2) h^2 \quad (\text{Ec.4})$$

Donde

N_{ch} = factor de capacidad portante del cono en el que se tiene en cuenta el levantamiento producido por el suelo desplazado

A = sección transversal del cono en el nivel de la superficie original

β = ángulo de la punta del cono

La Ec.4 puede ser simplificada por:

$$Q/S_u = F h^2 \quad (\text{Ec.5})$$

Donde F puede ser expresado como:

$$F = N_{ch} \pi \tan^2 (\beta/2) \quad (\text{Ec.6})$$

Los autores, calcularon también los valores de N_{ch} dependiendo de la rugosidad del cono, considerando una simplificación lineal de la elevación (lado izquierdo de la Figura N°06).

Por otro lado, Hazell (2008) aplicó el método de elementos finitos con enmallado adaptativo para evaluar la influencia de la superficie curva en el factor N_{ch} (lado derecho de la Figura N°06).

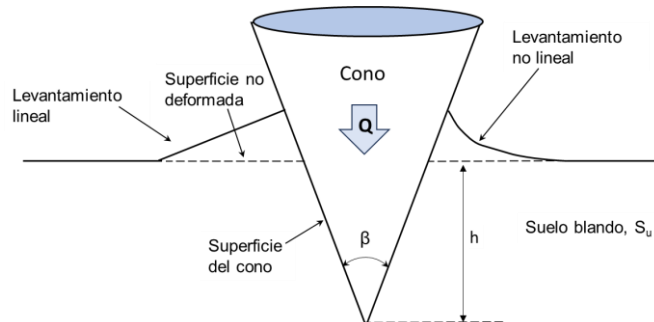


Figura N°06: Ilustración esquemática de la penetración del cono. El lado izquierdo representa el análisis de Koumoto & Houlsby (2001), y el lado derecho representa los resultados del análisis de elementos finitos de Hazell (2008), (Llano-Serna, et al; 2018)

Calibración del Penetrómetro de Cono

Para calibrar el ensayo Penetrómetro de Cono, se requiere conocer la resistencia al corte no drenada de un suelo arcilloso a partir de una prueba alternativa. Para ello, se suele considerar el ensayo de corte con el equipo de veleta de laboratorio (Hansbo, 1957) (Farias & M. A, 2016) (O'Kelly, B, 2014) (Zentar, et al; 2009) (Wood D. , 1985) (Karlsson, 1961) (Lu & Bryant, 1997) (Lemos, S, 2014). En la Figura N°07 se muestra la calibración realizada por Lemos (2014) en muestras de arcillas blandas.



Figura N°07: Calibración del Penetrómetro de Cono mediante la comparación de resultados obtenidos con el ensayo de veleta de laboratorio (a) Ensayos realizados con el Penetrómetro de Cono, (b) Ensayo realizado con veleta de laboratorio (Lemos, S, 2014)

Las pruebas de Penetrómetro de Cono proporcionan una estimación simple y rápida de la resistencia al corte no drenada (S_u) de suelos de grano fino con diversos contenidos de agua. La precisión de dicha estimación depende en gran medida de la selección de un factor de caída de cono K que relacione la profundidad de penetración final h con S_u .

Para la calibración se grafican los resultados de h y la resistencia al corte no drenada del equipo de veleta de laboratorio, S_u , con el valor de Q/h^2 en abscisas versus S_u en ordenadas. Luego, se encuentra el mejor ajuste para una línea recta que pasa por el origen. De esta forma es posible encontrar la pendiente y, en consecuencia, el valor del factor del cono adimensional, K .

En el Cuadro N°02 se muestran los diferentes valores del factor de cono K y el factor de capacidad de carga N_{ch} , obtenidos para diferentes conos. En la Figura N°08 se muestra una comparación entre los resultados (Llano-Serna, et al; 2018).

	Adecuado a Ec.1		Adecuado a Ec.3		
	K	R ²	F	N _{ch}	R ²
Farias y Llano Serna (2016)	0.498	0.974	1.464	6.488	0.980
O'Kelly, B (2014)	0.565	0.848	1.855	8.226	0.856
Zentar, R.; Abriak, N.; Dubois, V., (2009)	0.380	0.945	1.413	6.264	0.950
Wood D. , (1985)*	0.696	0.960	1.126	4.992	0.934
Gardiner, (1982)*	1.058	0.948	1.204	5.339	0.979
Karlsson, (1961)*	0.800	0.986	1.190	5.275	0.967

Nota: * representa el peso del cono $Q = 0.981 \text{ N}$ (100 g)

Cuadro N° 02: Valores de K y N_{ch} calculados por diferentes autores (adaptado de Llano Serna (Llano-Serna, et al; 2018))

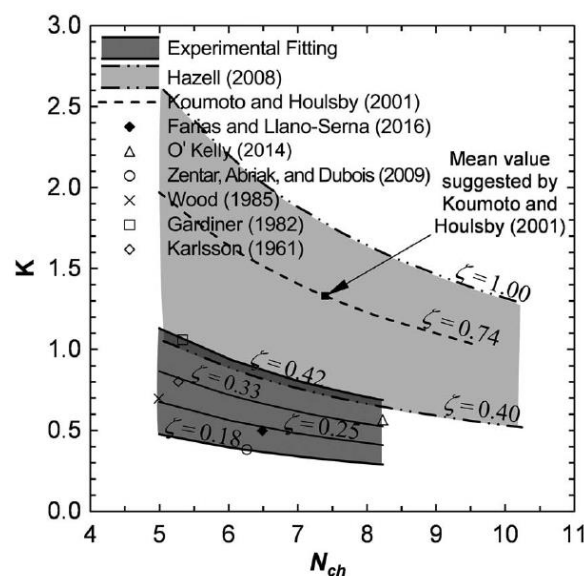


Figura N°08: Factor del penetrómetro de cono K versus factor de capacidad de carga N_{ch} para un determinado rango de valores de Hazell (2008), Koumoto & Houlsby (2001), Farias & M. A, (2016), O'Kelly (2014), Zentar, et al(2009), Wood (1985), Karlsson (1961), Gardiner (1982), Llano-Serna, et al(2018)

Por su parte, el equipo de Veleta de Laboratorio tiene el principio similar del ensayo de Veleta de Campo, en menor escala, siendo un ensayo para la medida directa de la resistencia al corte no drenada de muestras de suelos. La utilización del ensayo es recomendada, por la Norma ASTM D 4648, en suelos de granulometría fina, predominantemente arcilloso, y con resistencia no drenada inferior a 100 kPa. Se debe destacar su uso ventajoso en suelos de menor resistencia donde es difícil preparar muestras para la ejecución de otro tipo de ensayos.

El ensayo de veleta de laboratorio consiste en introducir verticalmente en la muestra de suelo una paleta de sección cruciforme con cuatro paletas radialmente opuestas, de diámetro D y altura H, y enseguida aplicar una rotación a velocidad constante y padronizada (60° a 90°/min), midiéndose el torque necesario para causar el corte de superficie cilíndrica del suelo, en condiciones no drenadas. El torque es medido por medio de un resorte calibrado que es conectado directamente en la Veleta, conforme la Figura N°09.

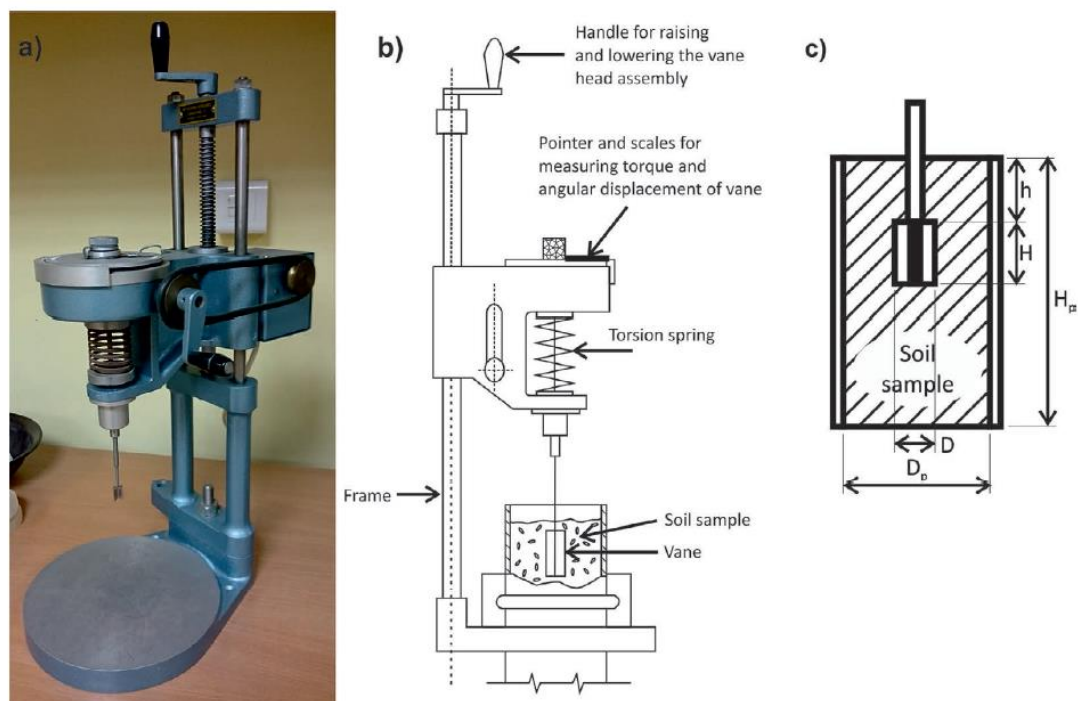


Figura N°09: Aparato de veleta de laboratorio: (a) Vista general, (b) Esquema del aparato (c) Dimensiones requeridas de las muestras ($D_p/D > 3.5$, $H_p/H > 3$, $h \geq H$)

Con el torque medido y las dimensiones de la veleta es posible determinar la resistencia del suelo no drenada (S_u) en kPa, en base a las ecuaciones:

$$S_u = \frac{T}{K} \cdot 10^{-4} \quad \text{Ec (7)}$$

$$K = \frac{\pi D^2}{10^9} \cdot \left(\frac{H}{2} + \frac{D}{6} \right) \quad \text{Ec (8)}$$

Donde T es el torque máximo medido en kgf.cm, D es el diámetro de la veleta en mm y H es la altura de la veleta en mm

En secuencia a la determinación del torque máximo es posible determinar el valor de resistencia al corte en la condición remoldeada (S_{ur}), utilizando el valor de torque

máximo corresponde a la condición remoldeada obtenido por la rotación de la veleta por un mínimo de 5 a 10 revoluciones completas.

9.0. Objetivos

Objetivo general

Determinar la resistencia no drenada (S_u) mediante la ejecución del ensayo Penetrómetro de Cono en suelos arcillosos de la Región San Martín.

Objetivos Específicos

- Extraer muestras inalteradas de arcillas saturadas en un distrito de la región San Martín.
- Realizar la caracterización física de las muestras de arcilla.
- Realizar el ensayo de veleta en laboratorio para obtener de manera directa la resistencia no drenada de las muestras extraídas.
- Realizar el ensayo Penetrómetro de Cono en el laboratorio para obtener de manera indirecta la resistencia no drenada de las muestras.

Uno de los objetivos planteados en la etapa del Proyecto Inicial de Investigación fue realizar la caracterización física y mineralógica de las muestras de arcilla. Sin embargo, durante la elaboración del proyecto se tuvo que prescindir de realizar los ensayos de Difracción de Rayos X, necesarios para realizar la caracterización mineralógica. Estos ensayos deberían de hacerse en un laboratorio externo, y la fecha de cierre de habilitación presupuestal fue antes de contar con las muestras para su ejecución. En consecuencia, el objetivo quedó reformulado a solamente la caracterización física de las muestras de arcillas.

10.0. Hipótesis

No aplica

11.0. Variables

Determinación de la resistencia no drenada (S_u) (Variable dependiente)

Ejecución del ensayo de Penetrómetro de Cono en suelos arcillosos de la región San Martín. (Variable independiente)

12.0. Método

12.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es aplicada de nivel correlacional. Se están asociando los resultados obtenidos en el ensayo de la veleta de laboratorio con los resultados obtenidos en el ensayo de penetrómetro de cono, con la finalidad de obtener un factor "k" que permita la obtención de la resistencia no drenada mediante el uso de este último ensayo.

12.2. Método de investigación

El método utilizado es el experimental, donde a través de la ejecución del ensayo de Penetrómetro de Cono se determina el valor de la resistencia no drenada del suelo

arcilloso. Para ello se realizó la calibración del equipo mediante el uso del ensayo de veleta de laboratorio, que fue adquirido con esta finalidad.

Paralelamente se realizaron ensayos de caracterización de suelos en el laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Ricardo Palma (humedad, granulometría, límite líquido, límite plástico, límite de contracción, gravedad específica), con el objetivo de clasificar los suelos y determinar diferentes características del material que podrían influir en los resultados finales esperados:

12.3. Diseño de investigación

Diseño de Investigación Experimental

12.4. Muestra / Participantes / Sujetos / Base(s) de datos

El muestreo fue intencional. Se procuraron lugares en la región San Martín, de los cuales se tenían referencias de la existencia de suelos arcillosos blandos. Las muestras fueron 35 en total, extraídas de las localidades de Rioja (Rioja, Posic, Awajun, Nueva Cajamarca, Naranjillo) y Moyobamba (Moyobamba, Yantaló, Jepelacio). En las Figuras N°10, 11, 12 y 13 se muestra la ubicación de los puntos donde se extrajeron las muestras.

Es importante destacar que la investigación se limitó a 13 muestras inalteradas porque varias de las muestras recolectadas presentaban una consistencia mayor a la capacidad de trabajo de la veleta de laboratorio.



Figura N°10: Ubicación de los puntos de donde se extrajeron muestras en el Tramo Rioja – La Perla de Cascayunga, provincia de Rioja, departamento de San Martín



Figura N°11: Ubicación de los puntos de donde se extrajeron muestras en el Tramo Moyobamba – Yantalo, provincia de Moyobamba, departamento San Martín



Figura N°12: Ubicación de los puntos de donde se extrajeron muestras en las localidades de Naranjillo y Awajun, provincia de Rioja, departamento de San Martín



Figura N°13: Ubicación de los puntos de donde se extrajeron muestras en la localidad de Posic, provincia de Rioja, departamento de San Martín

12.5. Instrumento de recolección de datos

Se realizaron excavaciones a cielo abierto o calicatas de 1.0 m promedio de profundidad, donde se extrajeron muestras en estado inalterado, mediante el uso de tubos de acero de pared delgada.

La extracción de muestras se tuvo que realizar en dos fechas diferentes debido a la presencia de lluvias intensas en el área.



Figura N°14: (a) Vista de interior de calicata, realizada para extracción de muestra (b) Tubo de pared delgada, utilizado para extracción de muestras inalteradas

12.6. Técnicas de procesamiento de datos

Para los estudios experimentales desarrollados en el presente proyecto se realizaron las siguientes actividades y ensayos:

Corte de Tubos Shelby

Cada uno de los tubos con muestras de suelo, se cortaron transversalmente para la obtención de los cuerpos de prueba de 7 cm de altura y 8.5 de diámetro, como se muestra en la Figura N°15. En total se realizaron dos cortes por tubo. Durante el corte transversal del tubo, se tomaron cuidados especiales para evitar la penetración de la sierra al suelo. El tubo se fue girando en cada etapa de corte hasta que todo el perímetro fue cortado. Para dicha actividad se contó con el apoyo del personal de la oficina de maestranza de la Universidad Ricardo Palma. Posteriormente, los segmentos del tubo fueron separados mediante el corte del suelo con un hilo de nylon, el cual dejaba lisa la superficie de la muestra.



Figura N°15: (a) Corte de tubos de con muestra de suelo (b) Vista de cuerpo de prueba, listo para ser ensayado

Aprendizaje del manejo del Nuevo Equipo de Veleta de Laboratorio y el Penetrómetro de Cono

La ejecución del ensayo con Veleta de Laboratorio se realizó conforme lo indicado por la norma ASTM D4648-16 "Standard Test Methods for Laboratory Miniature Vane Shear Test for Saturated Fine-Grained Clayey Soil", con las precisiones recomendadas por Head, K and Epps, R. (2011)

El ensayo Penetrómetro de Cono se llevó a cabo de acuerdo con la norma BS 1377-2,1990, garantizando que el peso del cono y del vástago se encuentre dentro del rango de $80 \text{ g} \pm 0.1 \text{ g}$. Se verificó que el vástago esté completamente liso y limpio, y que la punta del cono no presente desgaste.

Calibración del Penetrómetro de Cono

Para calibrar el ensayo Penetrómetro de Cono y obtener la resistencia no drenada a través de este ensayo, se obtuvo paralelamente el valor de la resistencia no drenada mediante el ensayo de veleta de laboratorio.

Para el caso del ensayo Penetrómetro de Cono, se coloca el cuerpo de prueba debajo del cono y se verifica que éste haga contacto muy ligero con la superficie del suelo, y que el vástago toque el dial. Seguidamente, se deja caer el cono y después de 5 segundos se registra la profundidad de penetración del cono (h). Se realizan cuatro lecturas equidistantes desde el centro. Se repite el mismo procedimiento en la cara opuesta del cuerpo de prueba. En la Figura N°16 se muestra el equipo Penetrómetro de Cono y los principales pasos seguidos durante el ensayo.



Figura N°16: (a) Equipo Penetrómetro de cono, (b) Posición del cono antes de ensayo (c) Ejecución de ensayo en cuatro puntos equidistantes

Para el caso del ensayo con la Veleta de Laboratorio, se elige uno de los cuatro resortes disponibles, cada uno con una rigidez mayor que el anterior.

Después de instalar el resorte, se alinea la lectura a 0° tanto para la medición interior como exterior. La veleta se introduce gradualmente en el centro del cuerpo de prueba, manteniéndolo estable para prevenir cualquier posible giro debido a la inserción de la veleta. La profundidad de inserción es de 2 veces la altura de la veleta.

El ensayo se inicia registrando el tiempo y girando la manivela en sentido horario, a una velocidad constante de 60°/min hasta alcanzar los 90°/min, hasta que el puntero deje de girar. El ensayo es repetido en la otra cara del cuerpo de prueba.

En la Figura N°17 se muestra el equipo de Veleta de Laboratorio y los principales pasos seguidos durante el ensayo.

Para la obtención de la resistencia no drenada (S_u), se utilizan tablas de calibración. Las lecturas registradas se multiplican por la rigidez del resorte utilizado y la constante K según las dimensiones de la veleta.



Figura N°17: (a) Equipo Veleta de Laboratorio, (b) Posición de la veleta antes de ensayo (c) Ejecución de ensayo en el centro del cuerpo de prueba

Con el propósito de prevenir posibles sesgos, todos los ensayos se realizaron utilizando los mismos equipos y bajo la supervisión del mismo operador.

Con los datos obtenidos se realizaron análisis estadísticos, con el objetivo de determinar el factor K medio, que correlaciona los resultados de profundidad de penetración (h) obtenidos con el penetrómetro de cono y la resistencia no drenada (S_u) del equipo de veleta de laboratorio. Durante este análisis, se tuvo en cuenta las medidas de variabilidad de los datos, lo que permitió una evaluación más completa de la consistencia y fiabilidad de los resultados.

13.0. Resultados

13.1. Ensayos de Caracterización

El Cuadro N°03 muestra el resumen de los resultados obtenidos de los ensayos de granulometría, límite líquido, límite plástico, límite de contracción, y gravedad específica. Las muestras seleccionadas fueron clasificadas de acuerdo con el

Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). El límite líquido fue determinado conforme a la norma ASTM, mediante el uso de la copa de Casagrande.

Ubicación	Muestra	LL	LP	LC	IP	SUCS	G _s
Posic (Rioja)	M-1	139 (61)	29	35	110	OH	2.57
Posic (Rioja)	M-2	139(61)	29	35	110	OH	2.57
Posic (Rioja)	M-3	-	-	-	-	Pt	-
Posic (Rioja)	M-4	-	-	-	-	Pt	-
Jepelacio (Moyobamba)	M-5	46	19	16	27	CL	2.73
Jepelacio (Moyobamba)	M-6	46	19	16	27	CL	2.73
Jepelacio (Moyobamba)	M-7	66 (46)	27	17	39	OH	2.74
Jepelacio (Moyobamba)	M-8	66(46)	27	17	39	OH	2.74
Moyobamba-Yantaló	M-9	38	18	19	20	CL	2.74
Moyobamba-Yantaló	M-10	57	18	20	39	CH	2.64
Moyobamba-Yantaló	M-11	52	23	19	29	CH	2.71
Moyobamba-Yantaló	M-12	51	21	23	30	CH	2.66
Rioja-La Perla de Casayunga	M-13	77 (43)	27	49	50	OH	2.63

* LL=límite líquido, LP=límite plástico, LC=límite de contracción, IP=índice de plasticidad, G_s=gravedad específica. El valor indicado entre paréntesis fue obtenido con muestra secada al horno previamente

Cuadro N° 03: Resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de muestras evaluadas

En la Figura N° 18 se muestran los resultados obtenidos en la carta de plasticidad. Se puede observar que todas las muestras se posicionan arriba de la línea A, y la mayoría son de alta plasticidad.

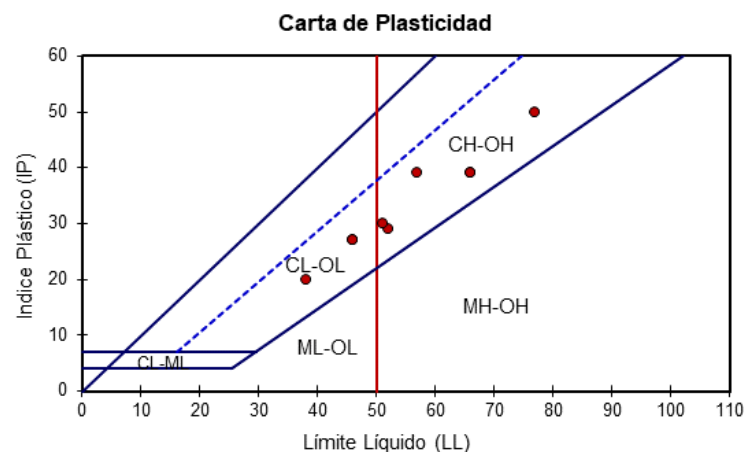


Figura N°18: Clasificación de muestras utilizadas en la Carta de Plasticidad

13.2. Ensayos de veleta de laboratorio y penetrómetro de cono

Los ensayos de veleta y penetrómetro de cono fueron realizados de acuerdo con lo indicado en el ítem 12.6, y se llevaron a cabo en las caras superior e inferior de las trece muestras inalteradas, a excepción de la muestra M-4, M-7 y M-8 en las cuales únicamente se registraron los resultados realizados en una cara del cuerpo de prueba debido a que el realizado en la otra cara no falló dentro del tiempo especificado en la norma ASTM D4648-16 (de 2 a 3 minutos).

Los resultados obtenidos se presentan en el Cuadro N°04.

Ubicación	Muestra	Penetrómetro de cono		Veleta de laboratorio			w%
		h mm	Q/h ² kPa	S _u kPa	S _{ur} kPa	S _u /S _{ur}	
Posic (Rioja)	M-1 sup fon	5.3	27.6	6.9	1.0	7	221.93
		7.1	15.7	7.1	1.1	6	229.55
Posic (Rioja)	M-2 sup fon	7.7	13.2	7.0	0.9	8	203.38
		6.5	18.6	6.7	1	8	116.75
Posic (Rioja)	M-3 sup fon	3.2	75.1	31.7	4.9	6	89.86
		3.5	65.3	41.6	8.4	5	72.13
Posic (Rioja)	M-4 fon	3.5	62.9	32.0	7.1	4	90.72
Jepelacio (Moyobamba)	M-5 sup fon	7.8	12.8	5.4	2.3	2	71.10
		7.1	15.6	5.0	3.1	2	65.72
Jepelacio (Moyobamba)	M-6 sup fon	7.0	16.0	5.0	3.4	1	65.40
		7.0	16.0	4.3	3.1	1	40.62
Jepelacio (Moyobamba)	M-7 fon	2.3	151.6	76.3	25.3	3	23.72
Jepelacio	M-8 sup	2.5	125.6	53.1	19.8	3	27.81
Moyobamba- Yantaló	M-9 sup fon	2.8	100.1	60.9	16.6	4	19.38
		2.7	110.4	56.4	16.1	4	20.07
Moyobamba- Yantaló	M-10 sup fon	5.0	31.0	14.4	3.9	4	86.68
		3.4	67.9	21.6	4.0	5	41.82
Moyobamba- Yantaló	M-11 sup fon	2.0	206.4	104.9	34.8	3	26.89
		1.6	297.2	152.6	50.1	3	26.42
Moyobamba- Yantaló	M-12 sup fon	2.8	102.5	67.6	20.5	3	29.83
		2.2	158.5	83.2	32.8	3	27.72
Rioja - La Perla de Cascayunga	M-13 sup fon	2.0	206.4	101.6	13.8	7	33.17
		2.0	196.2	95.8	13.8	7	37.46

* h=profundidad de penetración del cono, Q=peso total del cono, S_u=resistencia no drenada, S_{ur}= resistencia no drenada residual, w=humedad

Cuadro N° 04: Resultados obtenidos en los ensayos de caracterización de muestras evaluadas

La resistencia no drenada obtenida de la veleta de laboratorio fue calculada mediante la Ec (7).

La determinación de humedad fue realizada directamente de las secciones de tubos, inmediatamente después de la realización del ensayo de veleta y penetración de cono.

13.3 Correlación entre las Variables Estudiadas

La correlación expresa la dependencia o asociación que existe entre variables. Su medida recibe el nombre de coeficiente de correlación, la cual generalmente se le denota con r y cuyo valor varía desde -1 a +1. (Sanchez y Reyes, 2021).

En este caso, se calculó el coeficiente de correlación de Spearman, el cual mide la dirección y la intensidad de la asociación monótonica entre dos variables (Schober et al, 2018).

El coeficiente de correlación de Spearman se determinó utilizando la siguiente expresión:

$$r = 1 - \frac{6 \sum d_i^2}{n(n^2-1)} \quad \text{Ec (9)}$$

Donde:

r = coeficiente de correlación de Spearman

d= diferencia entre los rangos de las dos variables (X menos Y)

n= número de datos

El Cuadro N°05 muestra la interpretación del grado de correlación en rangos, según el valor del coeficiente.

Rango	Relación
-0.91 a -1.00	Correlación negativa perfecta
-0.76 a -0.90	Correlación negativa muy fuerte
-0.51 a -0.75	Correlación negativa considerable
-0.11 a -0.50	Correlación negativa media
-0.01 a -0.10	Correlación negativa débil
0	No existe correlación
+0.01 a +0.10	Correlación positiva débil
+0.11 a +0.50	Correlación positiva media
+0.51 a +0.75	Correlación positiva considerable
+0.76 a +0.90	Correlación positiva muy fuerte
+0.91 a +1.00	Correlación positiva perfecta

Cuadro N° 05: Grado de relación según coeficiente de correlación (Hernández, Fernández y Babiata, 1997)

En el Cuadro N° 06 se muestra cada uno de los rangos asignados a las variables estudiadas.

Indice	h X	Su Y	Rangos (X)	Rangos (Y)	d	d ²
1	5.3	6.9	16.0	6.0	10.0	100.00
2	7.1	7.1	20.5	8.0	12.5	156.25
3	7.7	7.0	22.0	7.0	15.0	225.00
4	6.5	6.7	17.0	5.0	12.0	144.00
5	3.2	31.7	11.0	11.0	0.0	0.00
6	3.5	41.6	13.5	13.0	0.5	0.25
7	3.5	32.0	13.5	12.0	1.5	2.25
8	7.8	5.4	23.0	4.0	19.0	361.00
9	7.1	5.0	20.5	2.5	18.0	324.00
10	7.0	5.0	18.5	2.5	16.0	256.00
11	7.0	4.3	18.5	1.0	17.5	306.25

12	2.3	76.3	6.0	18.0	-12.0	144.00
13	2.5	53.1	7.0	14.0	-7.0	49.00
14	2.8	60.9	9.5	16.0	-6.5	42.25
15	2.7	56.4	8.0	15.0	-7.0	49.00
16	5.0	14.4	15.0	9.0	6.0	36.00
17	3.4	21.6	12.0	10.0	2.0	4.00
18	2.0	104.9	3.0	22.0	-19.0	361.00
19	1.6	152.6	1.0	23.0	-22.0	484.00
20	2.8	67.6	9.5	17.0	-7.5	56.25
21	2.2	83.2	5.0	19.0	-14.0	196.00
22	2.0	101.6	3.0	21.0	-18.0	324.00
23	2.0	95.8	3.0	20.0	-17.0	289.00

Cuadro N° 06: rangos asignados a variables estudiadas

Del cuadro se tiene $n = 23$ y $\Sigma d^2 = 3909.5$. Al reemplazar estos valores en la Ec (9), se obtiene una **correlación de Spearman de -0.932**. Este resultado indica una **correlación negativa perfecta entre los rangos**, es decir, una relación inversa. Por lo tanto, a medida que aumenta el valor de la resistencia no drenada obtenida con la veleta de laboratorio, disminuye la profundidad de penetración registrada con el Penetrómetro de Cono.

14.0. Discusión de Resultados

Los resultados obtenidos en los ensayos fueron relacionados. En la Figura N°19 se muestra la correlación entre la resistencia no drenada obtenida con la veleta de laboratorio y la profundidad de penetración del penetrómetro de cono. La línea de tendencia que mejor se ajustó a los resultados fue la potencial, con un R^2 de 0.97, que muestran una buena correlación de los resultados obtenidos. En el gráfico se puede observar que la penetración es inversamente proporcional a los valores de resistencia no drenada.

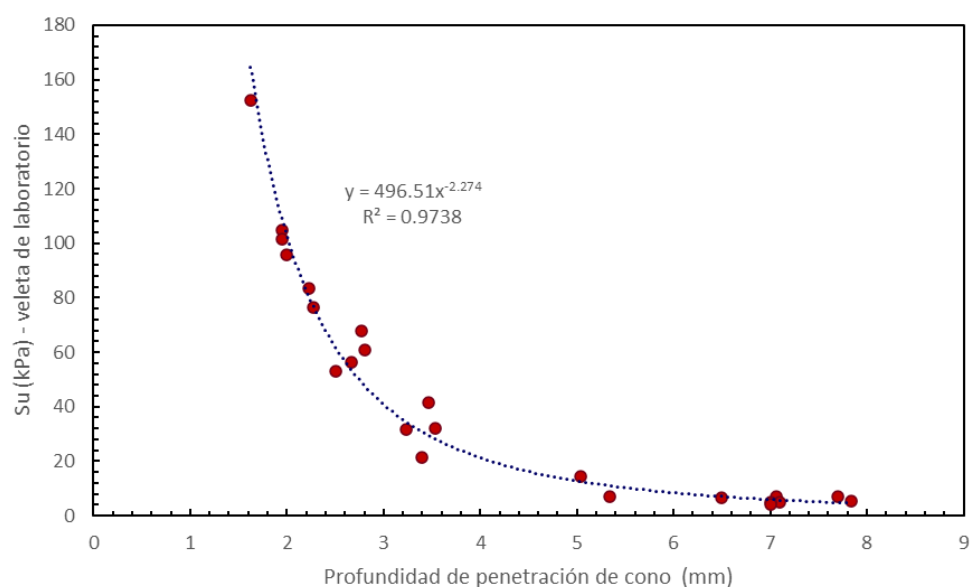


Figura N°19: Relación entre la resistencia no drenada obtenida con la veleta del laboratorio y la profundidad de penetración del cono

Según la ecuación lineal de Hansbo (Ec. 3), se establece una relación lineal entre la inversa de la penetración del cono ($1/h^2$) y la resistencia al corte no drenada (S_u) medida en la veleta en miniatura de laboratorio. En la Figura N°20 se muestra la calibración del penetrómetro de cono con una pendiente que representa el factor de cono, K , con un valor de 0.518, considerando el peso del cono igual a $Q=mg$, donde m es igual a 0.08 kg (80g), que incluye la masa del cono y el vástago, y el valor de g igual a 9.81 m/s^2 . Se observa una notable concordancia entre los resultados experimentales y la expresión de Hansbo (1957), respaldada por un coeficiente de correlación $R^2=0.978$.

En la Figura N° 21 se puede verificar que existe buena compatibilidad con los resultados.

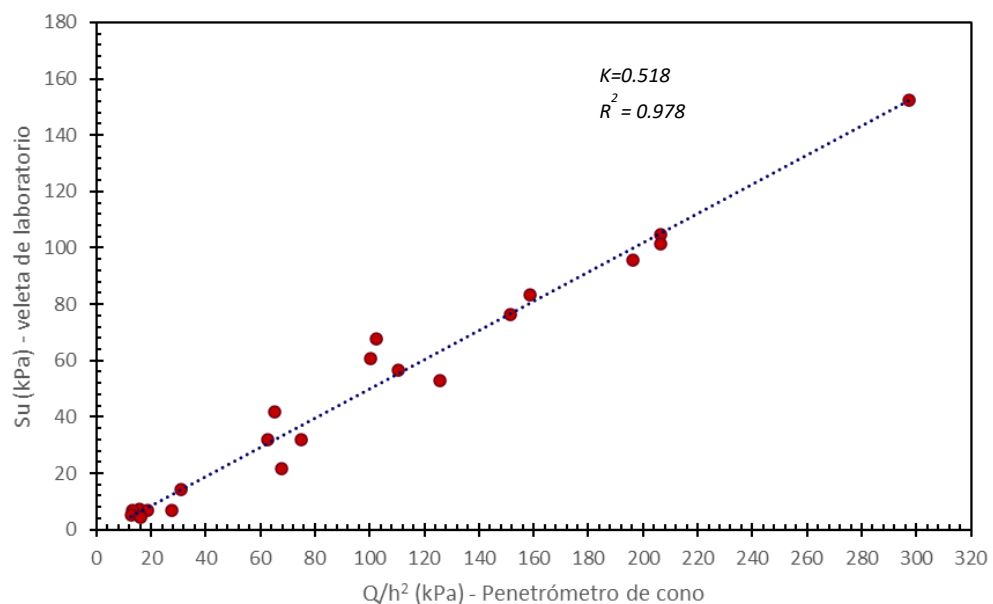


Figura N°20: Correlación entre la resistencia no drenada y la penetración del cono obtenida en la presente investigación, $K=0.518$

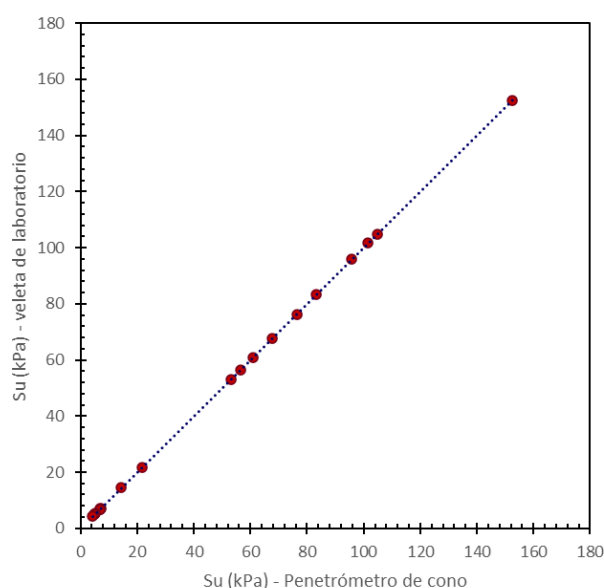


Figura N°21: Comparación de resistencia no drenada obtenida con veleta de laboratorio y penetrómetro de cono obtenida por la ecuación 3

El valor de K encontrado fue comparado con los valores reportados por otros autores. El Cuadro N° 06 muestra que el valor obtenido es muy cercano al de Farias y Llano-Serba (2016) y O'Kelly (2014). Es importante destacar que el R^2 obtenido en investigación actual es mayor.

Investigador	K	R^2
Farias y Llano-Serna (2016)	0.498	0.974
O'Kelly, B (2014)	0.565	0.848
Zentar, R.; Abriak, N.; Dubois, V., (2009)	0.380	0.945
Wood D. , (1985)	0.696	0.960
Gardiner, (1982)	1.058	0.948
Karlsson, (1961)	0.800	0.986
Presente Investigación (2023)	0.518	0.978

Cuadro N° 06: Factor de cono K obtenido en diferentes investigaciones, comparado con el obtenido en la presente investigación

15.0. Conclusiones y Recomendaciones

- La presente investigación muestra una metodología simple para estimar la resistencia al corte no drenada por medio del ensayo penetrómetro de cono, que es un equipo de fácil acceso en los laboratorios del Perú. La metodología está basada en la relación entre la profundidad de penetración del cono y la resistencia al corte no drenada (S_u), propuesta por Hansbo (1957).
- Se debe enfatizar la importancia de una previa y apropiada calibración para hallar el factor de cono (K), debido a que éste depende mucho de la rugosidad de la superficie del cono. Por lo tanto, asumir un factor de cono K, sin tomar en cuenta esta característica fundamental del instrumento, puede llevar a resultados incorrectos. En esta investigación, la calibración del penetrómetro de cono fue lograda usando los resultados de la profundidad de penetración (h) frente a la correspondiente resistencia al corte no drenada, obtenida del ensayo de veleta en miniatura de laboratorio, obteniéndose un valor de factor de cono de $K=0.518$ con $R^2=0.978$. La buena correlación entre el resultado experimental y la curva de penetración teórica versus la resistencia al corte no drenada, propuesta por Hansbo (1957), corrobora la exactitud del modelo.
- El estudio muestra que si la caída del cono es apropiadamente calibrada es una herramienta confiable para estimar la resistencia al corte no drenada en arcillas. A pesar de una validación limitada respecto a la resistencia al corte no drenada hallada por el ensayo de veleta en miniatura de laboratorio, la simplicidad de la metodología propuesta y el bajo costo del ensayo penetrómetro de cono pueden proporcionar una herramienta útil para obtener parámetros para un análisis preliminar. Además, la simplicidad del ensayo puede también ser atractivo para problemas de ingeniería donde están involucrados ensayos que requieran mayor tiempo para arcillas saturadas.
- Con base en los resultados obtenidos en este estudio, se recomienda continuar con las investigaciones con la finalidad de considerar la implementación del ensayo de penetrómetro de cono como una herramienta estándar en la práctica geotécnica para la determinación de la resistencia no drenada en suelos arcillosos blandos, especialmente en casos donde no es posible obtener muestras adecuadas para ensayos convencionales de laboratorio. Este ensayo es

particularmente útil en las fases preliminares de proyectos, como estudios de factibilidad, evaluación de alternativas y anteproyectos, que involucran el diseño de cimentaciones y la evaluación de la estabilidad de taludes sobre suelos blandos, donde la resistencia no drenada es un parámetro crucial para la toma de decisiones. Mediante futuras investigaciones, se podrá ampliar este enfoque y desarrollar bases de datos locales sobre la resistencia no drenada en diferentes tipos de suelos, lo que contribuirá a mejorar las correlaciones específicas de la región y proporcionaría una herramienta aún más robusta para proyectos futuros en suelos blandos.

- Es fundamental que, al utilizar el Penetrómetro de Cono, se tenga en cuenta que la resistencia no drenada puede variar con la profundidad, las condiciones de saturación y el historial de esfuerzos del suelo. Por lo tanto, se recomienda realizar un análisis integral de las condiciones del suelo en cada proyecto para asegurar la precisión de los resultados y su adecuada aplicación en el diseño geotécnico.
- Es relevante mencionar que, actualmente, Universidad Ricardo Palma (URP) se posiciona como la única institución en el país que cuenta con el equipo de Veleta de Laboratorio, adquirido como parte de la ejecución del presente Proyecto y clave para la calibración del Penetrómetro de Cono. Con esto se puede respaldar la inclusión del ensayo de Penetrómetro de Cono como una herramienta valiosa en la práctica de la ingeniería geotécnica peruana para determinar la resistencia no drenada en suelos arcillosos blandos.
- La aplicación de este ensayo tiene un impacto significativo en investigaciones geotécnicas, especialmente en regiones donde los equipos de prueba avanzados no están fácilmente disponibles. Además, los resultados obtenidos en este proyecto servirán como base para estudios adicionales en áreas con condiciones similares a las de la región San Martín, promoviendo el desarrollo de soluciones geotécnicas adaptadas a diferentes escenarios. En investigaciones futuras, se espera ampliar los hallazgos mediante la aplicación del Penetrómetro de Cono a una variedad más amplia de tipos de suelo y condiciones ambientales.
- Para fortalecer el impacto de esta investigación, se han publicado dos artículos en la revista Perfiles de Ingeniería de la URP. Adicionalmente, se están llevando a cabo evaluaciones para la presentación de los resultados en congresos internacionales y su publicación en revistas de mayor impacto. Estas acciones buscan aumentar la visibilidad de la Universidad en investigaciones relacionadas con suelos blandos, consolidando su posición en el ámbito académico y profesional.

16.0. Referencias

- Bastos, C.; Alves, A.; Pereira, M.; Rosa, K.; Viegas, M.; De Jesus, E. (2014). Estudo sobre a resistência não drenada de solos finos pelo ensaio de cone de queda livre empregando amostras de solos artificiais. *XV Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*. Goiânia: xv.
- Brown, P., & Huxley, M. (1996). The cone factor for a 30° cone. *Ground Engineering*, 29(10), 34-36.
- Burkert Bastos, C., Alves, A. M., Camargo Pereira, M., Rosa, K., Viegas, M. R., & Guedes de Jesus, S. (2014). Estudo sobre a resistência não drenada de solos finos pelo ensaio de cone de queda livre empregando amostras de solos artificiais. *XVII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*.

- Cabalar, Ali Firat; Khalaf, Muhammed Mukhlif; Isik, Haluk. (2020). A comparative study on the undrained shear strength results of fall cone and vane shear tests in sand-clay mixtures. *Arab J Geosci*, 13:395. doi:10.1007/s12517-020-05351-5
- Canela, D., & Fernandes, I. (2018). Use of fall cone test for the determination of undrained shear strength of cohesive soil. *MATECWeb Conferences IPICSE*. doi:10.1051/mateconf/201825104067
- Clemente, C; Faro, V; Moncada, M. (2019). Determination of undrained shear strength by the fall cone method - analysis, concept and guidelines. *17th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Clemente, C; Faro, V; Moncada, M. (2020). Determination of the undrained shear strength by the fall cone methos in marine soils. *International Journal of Civil &Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, 20.
- Dastider, A; Chatterjee, S; Basu, P. (2021). Advancement in estimation of undrained shear strength through fall cone tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 147(7). doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002535
- Dastider, A; Chatterjee, S; Basu, P. (2022). Closure to "Advancement in estimation of undrained shear strength through fall cone tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148. doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002808
- Farias, M., & M. A, L. S. (2016). Simple methodology to obtain critical state parameters of remolded clays under normally consolidated conditions using the fall-cone test. *Geotech. Test. J*, 39(5). doi:10.1520/GTJ20150207
- Gardiner, E. (1982). *Part II Projet Report*. Unit Kingdom: Cambridge University Engineering Department.
- Gruchot, A., & Zydron, T. (Sept de 2016). Impact of a test method on the undrained shear strength of a chosen fly ash. *Journal of Ecological Engineering*, 17(4), 41-49. doi:10.12911/22998993/63955
- Hansbo, S. (1957). *A new approach to the determination of the shear strength of clay by the Fall-Cone test*. Stockholm: Stockholm.
- Hazell, E. (2008). Numerical and experimental syudies of shallow cone penetration en clay. Phil.thesis.Dept thesis.Dept.of Engineering Science, Univ Oxford.
- Head, K and Epps, R. (2011). *Manual of Soil Laboratory Testing*. Scotland, UK: Whittles.
- Hernández,R; Fernández, C y Babtista, P. (1997), Metodología de la Investigación. McGraw-Hill
- Houlsby, H. (1982). Theoretical analysis of the fall cone test. *Geotechnique* 32(2), 111-118. doi:10.1680/geot.1982.32.2.111
- Karlsson, R. (1961). Suggested improvements in the liquid limit test, with reference to flow properties of remolded clays. *Proceeding of the 5th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, (págs. 171-184). Paris.
- Koumoto, T., & Houlsby, G. (2001). Theory and practice of the fall cone test. *Geotechnique*, 51(8), 701-712. doi:10.1680/geot.51.8.701.40475
- Lemos, S. (2014). *Estudo da resistência não drenada de solo de baixa consistência por meio de ensaios de campo e laboratório*. Vitória: Universidade Federal do Espírito Santo.

- Lemos, S; Pires, P. (September-December de 2017). The undrained strength of soft clays determined from unconventional and conventional tests. *Soils and Rocks*, 40(3), págs. 291-301. doi:10.28927/SR.403291
- Llano-Serna, M. A; Contreras, L. F. (2020). The effect of surface roughness and shear rate during fall-cone calibration. *Géotechnique*, *Géotechnique*(4), 1-11. doi:10.1680/jgeot.18.P.222
- Llano-Serna, M., Farias, M., Pedroso, D., Williams, D., & Sheng, D. (2018). Considerations on the experimental calibration of the fall cone test. *Geotechnical Testing Journal*. doi:10.1520/GTJ20170205
- Lu, T., & Bryant, W. (1997). Comparison of vane shear and fall cone strengths of soft marine clay. *Marine Georesources & Geotechnology*, 15(1), 67-82. doi:10.1080/10641199709379935
- O'Kelly, B. (2014). Characterisation and undrained strength of amorphous clay. *Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng.*, 167(3), 311-320. doi:10.1680/geng.11.00025
- O'Kelly, B. (2022). Discussion of Advancement in estimation of undrained shear strength through fall cone tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(6). doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002807
- Oliveira, C., Eichelberger, L., Alves, A., & Bastos, C. (2018). Resistencia não drenada de solos a artificiais remoldados através do ensaio de cono e queda. *XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, COBRAMSENG 2018*. Salvador, Bahia, Brasil.
- Pinto, P., Lima, A., & Berkert, B. (july de 2018). Fall cone test applied to studies of plasticity and shear strength of artificial soils. *Geotecnia*(143), págs. 85-110.
- Rajasekaran, G., & Rao, N. (2004). Falling cone method to measure the strength of marine clays. *Ocean Engineering*, 31(14-15), 1915-1927. doi:10.1016/j.oceaneng.2000.12.001
- Sanchez, H & Reyes, C. (2021). Metodología y Diseño en la Investigación Científica
- Schober P, Boer C, Schwarte LA. (2018) Correlation Coefficients: Appropriate Use and Interpretation. *Anesth Analg*. 2018 May;126(5):1763-1768. doi: 10.1213/ANE.0000000000002864. PMID: 29481436
- Sivakumar, V., O'Kelly, B., Henderson, L., Moorhead, C., & Chow, S. (2015). Measuring the plastic limit of fine soils: An experimental study. *Proc. Inst. Civ. Eng. Geotech. Eng.*, 168(1), 53-64. doi:10.1680/geng.14.00004
- Tanaka, H., Hirabayashi, H., Matsuoka, T., & Kaneko, H. (2012). Use of fall cone test as measurement of shear strength for soft clay materials. *Soils and foundations*, 52(4), 590-599. doi:10.1016/j.sandf.2012.07.002
- Vardanega, P., Hickey, C., Lau, K., Sarzier, H., Couturier, C., & Martin, G. (2018). Investigation of the atterberg limits and undrained fall-cone shear strength variation with water content of some peat soils. *International Journal of Pavement Research and Technology*. doi:10.1007/s42947-019-0017-0
- Wang, D., Zentar, R., Abriak, N., & Xu, W. (2013). Shear Strength Behavior of Cement/Lime-Solidified Dunkirk Sediments by Fall Cone Tests and Vane Shear Tests. *Geotechnical Testing Journal*, 36(1), 1-8. doi:10.1520/GTJ20120030
- Wood, D. (1982). Cone penetrometer and liquid limit. *Géotechnique*, 32(2), 152-157. doi:10.1680/geot.1982.32.2.152
- Wood, D. (1985). Some fall cone tests. *Geotechnics*, 35(1), 64-68. doi:10.1680/geot.1985.35.1.64

Zeng, X.; Li, Y.; Liu, X.; Yao, J.; Lin, Z. (2020). Relationship between the shear strength and the depth of cone penetration in fall cone tests. *Advances in Civil Engineering*, 2020. doi:10.1155/2020/8850430

Zentar, R.; Abriak, N.; Dubois, V. (2009). Fall cone test to characterize shear strength of organic sediments. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 135(1), 153-157. doi:10.1061/(ASCE)1090-0241(2009)135:1(153)

17.0. Artículos publicados en revistas indizadas

17.1. Artículo indizado N° 1

- a) Nombre del artículo científico y autor/es cuyo contenido debe corresponder con el Proyecto de Investigación de la Universidad Ricardo Palma a su cargo, aprobado el presente año.

“El ensayo Penetrómetro de Cono aplicado a la determinación de la resistencia al corte no drenada de suelos de grano fino”

- b) Captura de pantalla del resultado de la búsqueda del artículo científico en las bases de datos de Scopus, Web Of Science, SciELO o Latindex 2.0.
- c) Captura de pantalla del artículo científico publicado en la revista indizada, donde deberá encontrarse:
- El nombre completo del/a autor/a/es del artículo científico.
 - La fecha de publicación del artículo.
 - El volumen, número e ISSN de la revista.

ISSN impreso 1996-6660 / ISSN online 2519-5719
DOI: <https://doi.org/10.31381/perfilesingenieria.v20i20.6267>



EL ENSAYO PENETRÓMETRO DE CONO APLICADO A LA DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA AL CORTE NO DRENADA DE SUELOS DE GRANO FINO

FALL-CONE TEST APPLIED TO THE DETERMINATION OF UNDRAINED SHEAR STRENGTH OF FINE-GRAINED SOILS

Miriam Rosanna Escalaya Advíncula, Marco Antonio Hernández Aguilar
César Giancarlo Rojas Llactas, Ronald Saúl Vega López
Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú

RECIBIDO: 28 de septiembre de 2023.
ACEPTADO: 30 de diciembre de 2023.

RESUMEN

El comportamiento de suelos finos blandos es considerado uno de los más complejos y problemáticos desde el punto de vista geotécnico. Por tal motivo, es importante y fundamental el conocimiento de sus parámetros de resistencia y compresibilidad. En el presente artículo, se realiza una revisión de la literatura disponible acerca de la utilización del penetrómetro de cono en la determinación de la resistencia no drenada de estos suelos, las calibraciones necesarias y los principales avances en la determinación del factor de cono K. Este ensayo es utilizado comúnmente en la obtención del límite líquido de los suelos, y debido a la facilidad de su uso se convierte en una alternativa rápida y económica para la obtención de la resistencia no drenada de suelos arcillosos blandos.

Palabras clave: penetrómetro de cono, arcillas blandas, resistencia no drenada

Cómo citar

M. R. Escalaya Advíncula, M. A. Hernández Aguilar, C. G. Rojas Llactas, y R. S. V. L. Ronald Saúl Vega López, «El ensayo penetrómetro de cono aplicado a la determinación de la resistencia al corte no drenada de suelos de grano fino», *Perfiles Ingeniería*, vol. 20, n.º 20, pp. 15–32, dic. 2023.

ABSTRACT

The behavior of soft fine-grained soils is considered one of the most complex and problematic, from a geotechnical point of view. For this reason, knowledge of its strength and deformability parameters is important and fundamental. In this paper, a review of the available literature is carried out about the use of fall-cone test in determining the undrained shear strength of these soils, the necessary calibrations and the main advances in the determination of the cone factor K. Fall-Cone test is widely used to obtain the liquid limit of soils, and due to the ease of use it becomes a quick and economical alternative to obtain the undrained shear strength of soft clay soils.

Keywords: fall-cone test, soft clays, undrained shear strength.

© Los autores. Este artículo está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional. (CC-BY 4.0)



d) Enlace para descargar el artículo científico publicado en la revista indizada:

<https://doi.org/10.31381/perfilesingenieria.v20i20.6267>

17.2. Artículo indizado N° 2

- a) Nombre del artículo científico y autor/es cuyo contenido debe corresponder con el Proyecto de Investigación de la Universidad Ricardo Palma a su cargo, aprobado el presente año.

“Uso del ensayo penetrómetro de cono en la determinación de la resistencia al corte no drenado de suelos arcillosos blandos de la región San Martín, Perú”

- b) Captura de pantalla del resultado de la búsqueda del artículo científico en las bases de datos de Scopus, Web Of Science, SciELO o Latindex 2.0.
- c) Captura de pantalla del artículo científico publicado en la revista indizada, donde deberá encontrarse:
- El nombre completo del/a autor/a/es del artículo científico.
 - La fecha de publicación del artículo.
 - El volumen, número e ISSN de la revista.

ISSN impreso 1996-6660 / ISSN online 2519-5719
DOI: <https://doi.org/10.31381/perfilesingenieria.v20i21.6589>



Uso del ensayo penetrómetro de cono en la determinación de la resistencia al corte no drenado de suelos arcillosos blandos de la región San Martín, Perú

Use of fall cone test to estimation of undrained shear strength of soft clay soils from region San Martin, Peru

Miriam Rosanna Escalaya Advíncula, Marco Antonio Hernández Aguilar, César Giancarlo Rojas Llactas

RECIBIDO: 26 de abril de 2024.

ACEPTADO: 03 de junio de 2024.

RESUMEN

En esta investigación, se busca determinar experimentalmente la resistencia no drenada (S_u) de un suelo arcilloso blando por métodos no convencionales en la práctica de la Ingeniería en el Perú. Se empleó el Penetrómetro de Cono que es un equipo de laboratorio comúnmente utilizado para obtener el límite líquido de los suelos. Para calibrar los resultados, se usó un equipo de Veleta de Laboratorio, que proporciona la medida directa de S_u . El estudio se llevó a cabo con trece muestras inalteradas extraídas de las localidades de Rioja y Moyobamba en la región San Martín, Perú. Como resultado, se obtuvo una correlación empírica que permite determinar la resistencia no drenada de estos suelos a partir del ensayo de Penetrómetro de Cono. En la investigación se concluye que, con una calibración adecuada, el Penetrómetro de cono es una herramienta confiable para la determinación de la resistencia no drenada de los suelos blandos. Además, su ejecución sencilla y de bajo costo, lo convierte en un alternativa rápida y económica.

Palabras clave: resistencia no drenada, penetrómetro de cono, veleta de laboratorio, arcillas blandas.

Cómo citar

M. R. Escalaya Advíncula, M. A. Hernández Aguilar, y C. G. Rojas Llactas, «Uso del Ensayo Penetrómetro de Cono en la Determinación de la Resistencia al Corte No Drenada de Suelos Arcillosos Blandos de la Región San Martín, Perú», *Perfiles_Ingenieria*, vol. 20, n.º 21, pp. 95-110, jun. 2024.

ABSTRACT

In this research, we seek to experimentally determine the undrained shear strength (S_u) of a soft clay soil by unconventional methods in the practice of Peruvian Engineering. The fall-cone test was used, which is a laboratory equipment commonly used to obtain the liquid limit of soils. To calibrate the results, laboratory miniature vane test equipment was used, which provides direct measurement of S_u . The study was conducted with thirteen undisturbed samples extracted from the localities of Rioja and Moyobamba in the San Martín region, Peru. As a result, an empirical correlation was obtained that allows the undrained shear strength of these soils to be determined from the fall-cone test. The research concludes that, with adequate calibration, the fall-cone is a reliable tool for determining the undrained shear strength of soft soils. Furthermore, its simple and low-cost execution makes it a quick and economical alternative.

Keywords: undrained shear strength, fall-cone test, laboratory miniature vane, soft clays.

© Los autores. Este artículo Open Access está publicado bajo la Licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC-BY 4.0).



https://revistas.urp.edu.pe/index.php/Perfiles_Ingenieriarevista

perfilesing@urp.edu.pe

d) Enlace para descargar el artículo científico publicado en la revista indizada:

<https://doi.org/10.31381/perfilesingenieria.v20i21.6589>