

## Deformación elástica y módulo de elasticidad en arcillas expansivas mediante ensayos de laboratorio

Rosales Asto<sup>1</sup>, Palomino Zegarra<sup>1</sup>, Velásquez Bejarano<sup>1</sup> y Douglas Sarango<sup>\*2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima Perú

<sup>2</sup>Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú

Recibido 17 Ago 2023 – Aceptado 27 Nov 2023 – Publicado 04 Dic 2023

### Resumen

Los suelos expansivos tienen propiedades especiales y es difícil encontrar los parámetros de resistencia; ángulo de fricción interna y cohesión por la teoría de Morh-Coulomb, por ello es necesario evaluar las constantes elásticas que nos permite calcular el asentamiento y la carga admisible de estos suelos. La presente investigación tiene como objetivos determinar la deformación elástica y el módulo de elasticidad en arcillas expansivas, tomándose las muestras en el año 2014, tres muestras de San Ignacio - Cajamarca (M-1, M-2, M-3) y una de Pavayacu-Loreto (M-4). Para determinar dichos parámetros se realizó ensayos en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la UNALM, se ejecutaron ensayos de expansión libre; y sobre las muestras expandidas se efectuaron los ensayos de consolidación unidimensional. Para una carga específica se efectuaron ciclos de carga y descarga hasta generar una histéresis donde las curvas de carga y descarga se sobrepone formando una línea que corresponde a un comportamiento elástico. Como artificio se trazó por el origen de la curva de consolidación una paralela a la última histéresis, la cual corresponde a la tangente de la curva de consolidación. Se determinó la deformación elástica y la deformación plástica en forma independiente. Los valores obtenidos del módulo de elasticidad  $E_s$  se encuentran dentro de los rangos de 41.8 kg/cm<sup>2</sup> a 70.1 kg/cm<sup>2</sup>, dichos valores clasifican al suelo como arcillas blandas.

**Palabras clave:** Arcillas expansivas, módulo de elasticidad, expansión libre, consolidación unidimensional.

### Elastic deformation and modulus of elasticity in expansive clays by means of laboratory tests

#### Abstract

Expansive soils have special properties and it is difficult to find resistance parameters; Angle of internal friction and cohesion by the Morh-Coulomb theory, therefore it is necessary to evaluate the elastic constants that allow us to calculate the settlement and the admissible load of these soils. The present investigation has as objectives to determine the elastic deformation and the elasticity modulus in expansive clays, taking samples in 2014, three samples from San Ignacio - Cajamarca (M-1, M-2, M-3) and one from Pavayacu-Loreto (M-4). To determine these parameters, tests were carried out in the Soil Mechanics Laboratory of the UNALM, free expansion tests were carried out; and one-dimensional consolidation tests will be carried out on the expanded samples. For a specific charge, charge and discharge cycles will be carried out until a hysteresis is generated where the charge and discharge curves overlap, forming a line that corresponds to an elastic behavior. As an artifice, a parallel to the last hysteresis was drawn at the origin of the consolidation curve, which corresponds to the tangent of the consolidation curve. Elastic strain and plastic strain are determined independently. The values obtained from the modulus of elasticity  $E_s$  are within the ranges of 41.8 kg/cm<sup>2</sup> to 70.1 kg/cm<sup>2</sup>, these values classify the soil as soft clay.

**Keywords:** Expansive clays, module of elasticity, free expansion, one-dimensional consolidation.

\* dsarangoj@unmsm.edu.pe

© Los autores. Este es un artículo de acceso abierto, distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0) que permite el uso, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada de su fuente original.



## 1. Introducción

En los suelos expansivos predominan partículas de arcilla que tienen alta plasticidad y se expanden considerablemente cuando entran en contacto con el agua. Las cimentaciones de estructuras construidas sobre estos tipos de suelos están sujetas a eventuales levantamientos ocasionados por las fuerzas expansivas, el cual provocan daños a las estructuras y las deformaciones volumétricas alcanzan casi el 50 % [1].

Se han desarrollado investigaciones (Braja M. Das, 2001) [2] donde se ha relacionado la expansión libre con el límite líquido y el contenido de humedad con la finalidad de determinar el grado de expansión y la expansión potencial. Así mismo se han elaborado sistemas de clasificación de suelos expansivos en base al límite líquido, índice de plasticidad y expansión potencial [3].

El comportamiento esfuerzo - deformación en suelos expansivos no está bien determinado ya que en los ensayos de corte directo y/o compresión triaxial, los parámetros de resistencia: cohesión aparente ( $c$ ) y ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) son discrepantes [3], más aún si los ensayos se ejecutan en condiciones saturadas, por lo tanto, la evaluación de la capacidad de carga y de asentamiento no es posible, dejándose a criterio del proyectista la definición del tipo de cimentación sobre estos suelos. La presente investigación consiste en determinar la deformación elástica y el módulo de elasticidad de arcillas expansivas, para la cual se consideraron las siguientes hipótesis:

- Generar la expansión total para convertir el suelo expansivo en un suelo totalmente estable y evitar variaciones en el comportamiento esfuerzo deformación.
- Mediante el ensayo de consolidación en el suelo expandido totalmente (suelo estabilizado) determinar la deformación elastoplástica para una carga específica [4].
- El modelo de Saint Venant representa el comportamiento de un material elastoplástico el cual incluye el resorte Hookeano que representa la relación lineal entre el esfuerzo y la deformación, y una unidad de Coulomb que representa la deformación plástica.
- El rebote elástico que se define como una reacción generada por las partículas de un suelo indeformable cuando se aplica una carga sobre él y se manifiesta después que se retira la carga.

Se obtuvieron muestras representativas de arcillas expansivas; las cuales fueron analizadas en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) para su caracterización. Se ejecutaron ensayos de expansión libre [5]; y sobre las muestras expandidas se efectuaron los ensayos de consolidación. Para una carga específica se efectuaron ciclos de carga y descarga hasta generar una histéresis donde las curvas de carga y descarga se superponen formando una línea que corresponde a un comportamiento elástico [6]. Como artificio se trazó por el origen de la curva de

consolidación una paralela a la última histéresis, la cual corresponde a la tangente de la curva de consolidación.

La recta tangente a la curva de consolidación al cortarse con la prolongación de una recta trazada por la carga especificada determina la deformación elástica y la deformación plástica en forma independiente. En la presente investigación se propone una metodología experimental para la obtención de parámetros elásticos en arcillas expansivas con características específicas correspondientes a dos lugares de nuestro territorio peruano.

## 2. Materiales y Metodología

### 2.1. Materiales

Las muestras de suelo que se analizaron fueron arcillas seleccionadas de plasticidad alta, provenientes de San Ignacio - Cajamarca (M-1, M-2, M-3) y de Pavayacu - Loreto (M-4), cuya ubicación se presenta en la Figura 1.



**Figura 1:** Ubicación de las muestras San Ignacio - Cajamarca (M-1, M-2, M-3) y de Pavayacu - Loreto (M-4). Fuente: elaboración propia.

Se utilizaron los siguientes equipos de medición e instrumentos de laboratorio de mecánica de suelos de la UNALM establecidos en la norma NTP (Norma Técnica Peruana).

- Equipo para análisis granulométrico – método del hidrómetro [7].
- Equipo para ensayo de límites de consistencia [8].
- Equipo para ensayo de límite de contracción [9].
- Equipo para ensayo de peso específico de sólidos [10].
- Equipo para ensayo de expansión controlada [5].
- Equipo para ensayo de expansión libre [5].
- Equipo para ensayo de consolidación unidimensional [11].

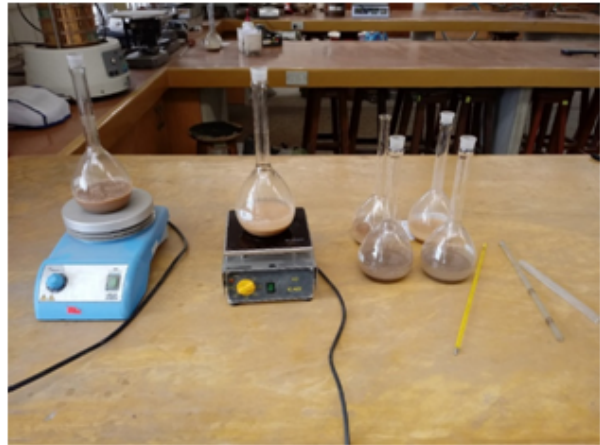
En la Figura 2 a la figura 6 se muestran los equipos utilizados:



**Figura 2:** Equipo para análisis granulométrico – método del hidrómetro. Fuente: elaboración propia.



**Figura 3:** Equipo para ensayo de límites de consistencia. Fuente: elaboración propia.



**Figura 4:** Equipo para ensayo de peso específico de sólidos. Fuente: elaboración propia.



**Figura 5:** a) Equipo para ensayo de expansión controlada. b) Ensayo de límite de contracción. c) Ensayo de expansión libre. Fuente: elaboración propia.



**Figura 6:** Equipo para ensayo de consolidación unidimensional. Fuente: elaboración propia.

## 2.2. Metodología

### a) Selección de muestras de suelo

Se eleccionaron 4 muestras de arcilla de alta plasticidad.

Ensayos	Normas técnicas	Número de ensayos
Contenido de humedad	NTP 339.127	4
Límite líquido	NTP 339.129	4
Límite plástico	NTP 339.129	4
Límite de contracción	NTP 339.140	4
Clasificación SUCS	NTP 339.134	4
Granulometría por hidrómetro	NTP 339.128	4
Gravedad específica de sólidos	NTP 339.131	4
Expansión controlada	NTP 339.170	4
Expansión libre	NTP 339.170	4
Consolidación unidimensional	NTP 339.154	4

**Tabla 1:** Ensayos estándares y ensayos especiales realizados. Fuente: Elaboración propia.

### c) Consideraciones en los ensayos especiales

#### c1) Ensayo de expansión controlada

Este ensayo se realizó en muestras inalteradas, tomando en cuenta a la Norma Técnica Peruana NTP 339.170 [5]. Método de ensayo normalizado para la determinación de hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos, con la finalidad de determinar la fuerza de expansión de las muestras de suelos.

#### c2) Ensayo de expansión libre

Este ensayo se realizó en muestras inalteradas, tomando en cuenta a la Norma Técnica Peruana NTP 339.170 [5]. Método de ensayo normalizado para la determinación de hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos.

El ensayo se realizó con la finalidad de obtener suelos totalmente expandidos y estables para evitar variaciones en su comportamiento esfuerzo-deformación.

#### c3) Ensayo de consolidación unidimensional

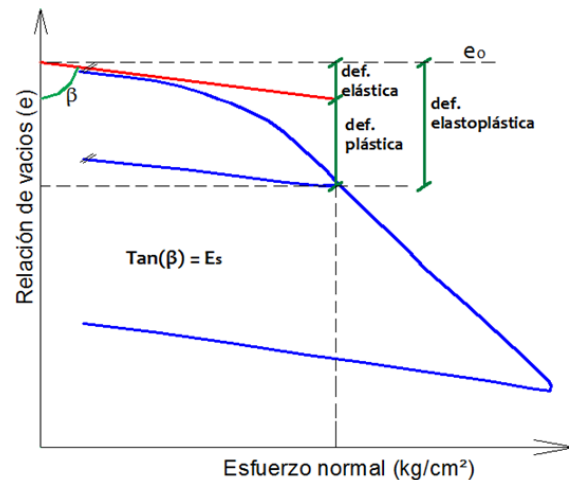
El ensayo de consolidación unidimensional NTP 339.154 [11] se ejecutó en 4 muestras que han sido sometidas previamente a ensayo de expansión libre, con la finalidad de obtener la deformación elastoplástica.

El principio del “rebote elástico” formulado por algunos autores (Juárez Badillo-Rico Rodríguez, 2005) [12] considera que los suelos también tienen un comportamiento elástico; el principio se basa en que un suelo gra-

### b) Ensayos estándares y especiales en laboratorio de mecánica de suelos

Se realizaron ensayos estándares y especiales (muestras inalteradas) de acuerdo a los procedimientos establecidos en la norma NTP (Norma Técnica Peruana). Ver Tabla 1.

nular denso, cuando es cargado y luego descargado, las curvas de carga y descarga son lineales y se superponen.



**Figura 7:** Deformación elástica y módulo de elasticidad. Fuente: elaboración propia.

A partir de este principio a los suelos expandidos se aplicaron cargas que generaron una deformación elastoplástica  $\epsilon_{ep}$  (Figura 7); la curva de descarga también corresponde a una recuperación elastoplástica. Para llegar al rebote elástico se aplicaron varios ciclos de carga y descarga [13], manteniendo constante la carga, estos ciclos se repitieron hasta obtener una recta donde la curva de carga se superpone a la curva de descarga. Haciendo el artificio de trasladar la recta al origen de la curva de consolidación se obtiene la tangente a dicha curva de con-

solidación se obtiene la tangente a dicha curva, la cual al cortar una recta que pasa por la carga establecida permite obtener dentro de lo esperado la deformación elástica.

La metodología es una nueva propuesta basada en el uso de principios y ensayos físicos conocidos como el “Principio del rebote elástico”, “Ensayo de Consolidación unidimensional y expansión libre” realizado en laboratorio bajo normas establecidas.

La ventaja es la obtención de los parámetros elásticos adecuados para arcillas expansivas con las características de las muestras analizadas bajo cargas aplicadas, dichos parámetros permiten el cálculo del asentamiento de estructuras proyectadas.

### 3. Resultados y Discusiones

#### 3.1. Caracterización de las muestras

Las muestras analizadas provenientes de San Ignacio - Cajamarca (M-1, M-2, M-3) y de Pavayacu – Loreto (M-4), son suelos expansivos con un contenido de arcilla mayor al 57 % en peso, e índices de plasticidad superior a 40 %. Su fuerza expansiva varía entre 0.79 a 2.50 kg/cm<sup>2</sup> y su expansión libre varía de 4.75 % (naturalmente expandida) a 35.56 %. En la Tabla 2 se muestra los resultados de laboratorio.

	M-1	M-2	M-3	M-4
Arena %	0.00	10.41	6.85	0.00
Limo %	39.03	28.10	35.82	31.86
Arcilla %	60.97	61.49	57.33	68.14
Límite Líquido %	80.50	72.50	60.90	94.20
Límite Plástico %	29.00	27.12	20.17	40.30
Límite de contracción %	11.00	10.47	10.90	11.57
Índice de plasticidad %	51.50	45.38	40.73	53.81
Gravedad específica de sólidos (Gs)	2.78	2.70	2.75	2.74
Clasificación SUCS	CH	CH	CH	CH

Tabla 2: Resultados de los ensayos de laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

	M-1	M-2	M-3	M-4
Densidad inicial (gr/cm <sup>3</sup> )	1.70	1.72	1.6	1.8
Densidad después de la expansión (gr/cm <sup>3</sup> )	1.176	1.11	1.08	1.21
Expansión controlada (Kg/cm <sup>2</sup> )	0.852	0.942	0.793	2.52

Tabla 3: Resultados de los ensayos de laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

#### 3.2. Ensayos especiales

##### a) Ensayo de expansión libre

Los ensayos de expansión libre [5] sirvieron para generar la máxima expansión y tener suelos totalmente estables ya que las muestras proceden de zonas con precipitaciones altas, y los suelos en estado natural han sufrido procesos de expansión previos.

Así mismo en las muestras en estado natural se ejecutaron ensayos de expansión controlada [9] para medir la presión de expansión residual de dichos suelos, la obtención de las propiedades mecánicas en muestras en estado natural y remoldeada son similares [14]. En la figura 8 se muestra las curvas de expansión libre y los valores de la expansión controlada en la Tabla 3.

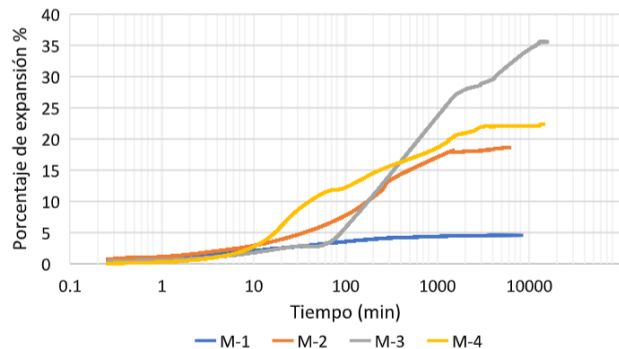


Figura 8: Curva de expansión libre de las muestras de suelos. Fuente: elaboración propia.

##### b) Ensayo de consolidación unidimensional

Sobre los suelos totalmente expandidos (estables) se efectuaron los ensayos de consolidación para determinar

las deformaciones totales para cada carga aplicada de acuerdo con la Teoría de la consolidación unidimensional de Terzaghi [15], que indica que en un medio semi infinito la deformación es unidimensional y en la dirección de la carga.

Para cargas de 0.5 kg/cm<sup>2</sup> y 1.0 kg/cm<sup>2</sup>, se realizaron ciclos de carga y descarga [15] hasta obtener una histéresis que tiende a definir una recta correspondiente al rebote elástico (comportamiento elástico). En las Figuras 9, 10, 11 y 12 se muestran el artificio basado en el rebote elástico para obtener la deformación elástica.

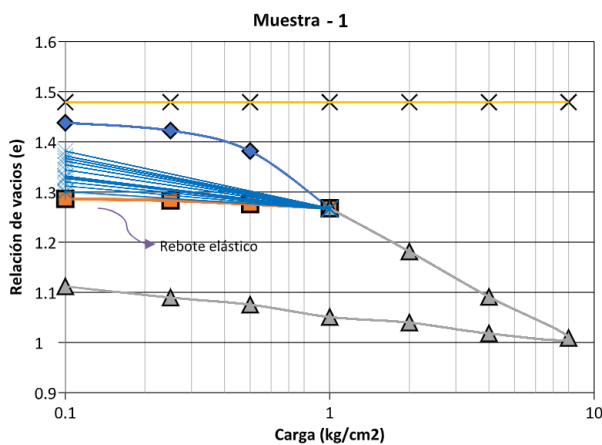


Figura 9: Deformación elástica y módulo de elasticidad – muestra 1. Fuente: elaboración propia.

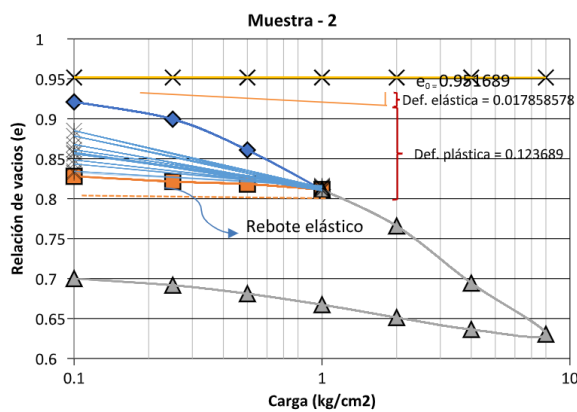


Figura 10: Deformación elástica y módulo de elasticidad – muestra 2. Fuente: elaboración propia.

c) Determinación de deformación elástica  $\epsilon_e$  y el módulo de elasticidad  $E_s$

Definida la recta que representa el comportamiento elástico, como artificio se trazó una paralela en el origen de la curva de consolidación, la cual se convierte en la

tangente a la curva en el origen. Para definir la magnitud de la deformación elástica se trazó una recta vertical que pasa por las cargas específicas y cortan a la recta horizontal correspondiente a la relación de vacíos inicial  $e_0$ . La intersección de la tangente a la curva de consolidación en el origen y la recta vertical define las magnitudes de la deformación elástica y la deformación plástica como se muestra en las Figuras 9, 10, 11 y 12.

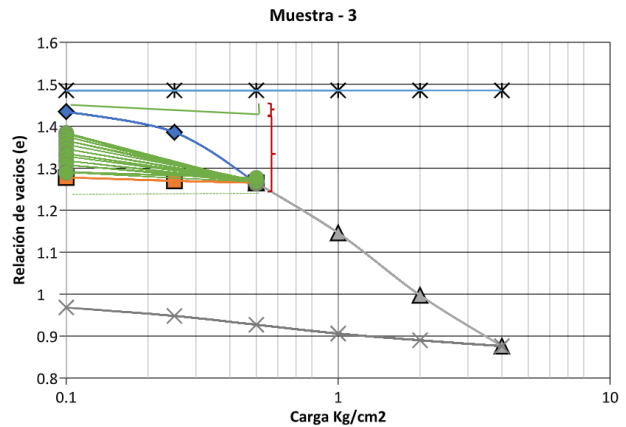


Figura 11: Deformación elástica y módulo de elasticidad – muestra 3. Fuente: elaboración propia.

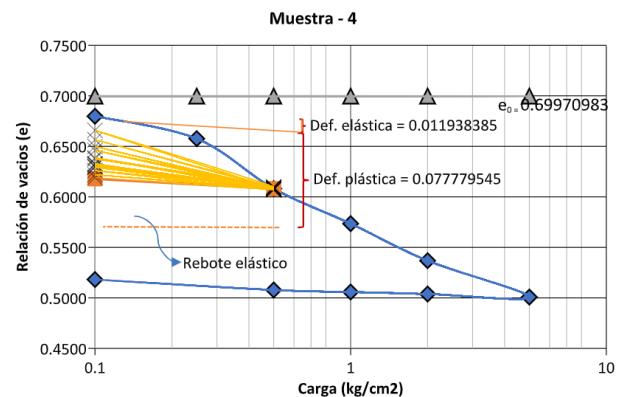


Figura 12: Deformación elástica y módulo de elasticidad – muestra 4. Fuente: elaboración propia.

El Módulo de Elasticidad  $E_s$  se obtuvo calculando la tangente del ángulo que forma la recta tangente a la curva de consolidación y el eje de relación de vacíos (Figura 7).

En base a la hipótesis planteada y el artificio utilizado se pudo determinar la deformación elástica y el “Módulo de elasticidad” cuyos valores se encuentran dentro de los rangos establecidos por varios investigadores; Braja M. 41 – 204 kg/cm<sup>2</sup> [2], Jiménez Salas 13 – 135 kg/cm<sup>2</sup> [16], Casagrande A. 20 – 80 kg/cm<sup>2</sup> [17]. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.



Muestra	Carga aplicada $\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Deformación unit elastoplástica	Deformación unit plástica	Deformación unit elástica	Módulo de elasticidad $E_s$ (kg/cm <sup>2</sup> )
M-1	1.0	0.20597	0.19171	0.01426	70.128
M-2	1.0	0.14155	0.12369	0.01786	55.995
M-3	0.5	0.21997	0.20870	0.01126	44.401
M-4	0.5	0.08972	0.07777	0.01194	41.882

**Tabla 4:** Resultados de la deformación elástica y módulo de elasticidad. Fuente: Elaboración propia.

Los rangos de los valores reportados por los autores antes mencionados son muy amplios y no presentan una relación de sus parámetros elásticos con las propiedades físicas de los suelos como su composición granulométrica, límites de consistencia, gravedad específica de sólidos, por lo tanto, los valores de los parámetros elásticos obtenidos representan muy bien a estos suelos arcillosos con características expansivas en condición estable. También existen modelos adimensionales para la estimación del módulo de elasticidad en arcillas expansivas, pero en condiciones no saturados [18].

#### 4. Conclusiones

- De las muestras analizadas se logró obtener la deformación elástica y el módulo de elasticidad, estos valores van de 41.8 kg/cm<sup>2</sup> a 70.1 kg/cm<sup>2</sup>, que están dentro de los rangos establecidos por otros investigadores como Braja M. Das, (2001) [2]; Jiménez Salas, (1975) [16] y Casagrande A. (1948) [17].
- Para la obtención de los parámetros elásticos se determinó que el ensayo más adecuado es el ensayo de consolidación unidimensional ya que cumple con la Teoría de Terzaghi, el cual considera que para un medio semi infinito la deformación es unidimensional y en dirección de la carga aplicada.
- El cálculo del Módulo de Elasticidad permite determinar el asentamiento inmediato con mayor precisión ya que el Módulo de Elasticidad se calcula directamente para cada suelo en condición estable.
- Las muestras que presentan menor límite de contracción e índice de plasticidad (Tabla 1) son las muestras que tienen menor porcentaje de expansión (Tabla 2) y a la vez presentan un mayor módulo de elasticidad cuyos datos se muestran en la Tabla 4 y de forma gráfica en las

Figuras 9, 10, 11 y 12.

- Los ensayos especiales (expansión libre y consolidación unidimensional) realizados a la muestra M-4 fueron en especímenes inalterados y siguiendo las pautas de acuerdo a la Norma Técnica Peruana NTP 339.151.

#### 5. Recomendaciones

- Dado que el módulo de elasticidad esta expresado en rangos que muchas veces son amplios se recomienda utilizar el procedimiento planteado en la presente investigación, ya que de esta manera sería calculado directamente y no se estaría trabajando con valores estimados a partir de los rangos existentes en la bibliografía especializada.
- Se recomienda extender la investigación para la obtención de otros parámetros elásticos como por ejemplo la relación de Poisson ( $\mu$ ) y que se tomen más muestras colindantes a la zona de la muestra M-4.
- Continuar con los procedimientos expuestos en la presente investigación con el fin de validar los resultados obtenidos y poder determinar el módulo de elasticidad en suelos arcillosos de otros lugares con características similares a los analizados.
- Los ensayos deben ejecutarse siguiendo las pautas establecidas en las normas técnicas peruanas (NTP) y en laboratorios acreditados.

#### Agradecimientos

Los autores agradecen al Ing. Hermes Valdivia Aspilcueta por el apoyo y consejos en el desarrollo experimental en la presente investigación. Asimismo, agradecen al Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

#### Referencias

- [1] K.M. Al Haj and J.R. Standing. Mechanical properties of two expansive clay soils from Sudan (2015) <https://doi.org/10.1680/geot.14.P.139>
- [2] M.D. Braja. Fundamentos de Ingeniería Geotécnica. Traducción del libro Fundamentals of Geotechnical engineering. International Thomsons Editores (2001).
- [3] J.F. Bowles. Propiedades Geofísicas de los Suelos. Editorial McGraw – Hill. México (1978).

- [4] T.W. Lambe. R.V. Whitman. *Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa, México (1976).
- [5] Norma Técnica Peruana NTP 339.170: Método de ensayo normalizado para la determinación de hinchamiento unidimensional o potencial de asentamiento de suelos cohesivos (Acceso: 2023) <https://www.inacal.gob.pe/cid/categoria/normas-tecnicas-peruanas>
- [6] C. Villalaz. *Mecánica de suelos y cimentaciones*, 5ta edición. Editorial Limusa, México (2004).
- [7] Norma Técnica Peruana NTP 339.128: Método de ensayo para el análisis granulométrico. (Acceso: 2023).
- [8] Norma Técnica Peruana NTP 339.129: Método de ensayo para determinar el límite líquido, límite plástico, e índice de plasticidad de suelos. (Acceso: 2023).
- [9] Norma Técnica Peruana NTP 339.140: Determinación de los factores de contracción de suelos mediante el método del mercurio. (Acceso: 2023).
- [10] Norma Técnica Peruana NTP 339.131: Método de ensayo para determinar el peso específico relativo de las partículas sólidas de un suelo. (Acceso: 2023).
- [11] Norma Técnica Peruana NTP-339.154: Método de ensayo normalizado para propiedades de consolidación unidimensional en suelos. (Acceso: 2023).
- [12] E. Juárez. *Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa S.A. México (2005).
- [13] G.B. Sowers. *Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. Editorial Limusa S.A. México (1986).
- [14] T.A. Gaspar et al. The mechanical properties of a high plasticity expansive clay (2022). <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106647>
- [15] Terzaghi Karl and Peck B. Ralph. *Mecánica de Suelo en la Ingeniería Practica*, Segunda Edición, Editorial El Ateneo S.A (1973).
- [16] J.A. Jiménez. *Geotecnia y Cimientos I*. Editorial Rueda. Madrid, España (1975).
- [17] A. Casagrande. Classification and Identification of Soils, Transactions ASCE (1948).
- [18] H.H. Adem and S.K. Vanapalli. Elasticity moduli of expansive soils from dimensional análisis (2014) <https://doi.org/10.1680/gr.14.00006>