

Caracterización Física y Mecánica de Suelos de Alta Plasticidad de Ilobasco.

Ivette Alejandra Arévalo Guevara, Andrea Carolina Hernández García, Ivania Larissa Lemus Hernández, Nancy Marisol Vásquez Grande

Departamento de Mecánica Estructural, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas

Antiguo Cuscatlán, El Salvador

00061312@uca.edu.sv ; 00049512@uca.edu.sv ; 00018712@uca.edu.sv ; 00047813@uca.edu.sv

Abstract – Esta investigación trata de la caracterización física y mecánica de un suelo de alta plasticidad proveniente del municipio de Ilobasco, en el departamento de Cabañas, con coordenadas -88.8607310, 13.8277060.

La metodología de estudio fue una combinación de procedimientos de ensayos de laboratorio de normas ASTM y análisis estadísticos como parte de la interpretación de resultados. Se partió de un muestreo en la zona central del país, con el objetivo de obtener el suelo con la condición más plástica de la zona, a la cual se le evaluó las propiedades físicas (análisis de tamaño de partícula, límites de consistencia, gravedad específica, peso volumétrico suelto y relaciones densidad-humedad de suelos compactados con energía estándar y modificada) y mecánicas (determinación de los parámetros del suelo en ensayos de compresión no confinada, compresión triaxial no consolidada no drenada y caja de corte para grados de compactación correspondientes al 100% y al 90% en rama húmeda). Asimismo, se determinaron propiedades de asentamiento por medio de ensayos de consolidación unidimensional.

De la caracterización física, se obtuvo una clasificación del suelo como limo de alta plasticidad (MH). Mientras que, a partir de la caracterización mecánica, en los parámetros de ángulo de fricción, cohesión y módulo de elasticidad, se encontró una pérdida en la resistencia al pasar de la condición del 100% del grado de compactación al 90% de éste en la rama húmeda, así como también un comportamiento inusual en este última.

I. INTRODUCCIÓN

El Salvador no cuenta con muchas investigaciones cuyo objeto de estudio sean los suelos plásticos. Es decir, que se tiene una base de datos incompleta sobre su comportamiento.

Sin embargo, existen investigaciones fruto de trabajos de graduación que persiguen estos objetivos. Tal es el caso de

“CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE LOS SUELOS DE SAN MIGUEL” del año 1995 (ver [4]), que resalta la importancia de la caracterización de los suelos plásticos y presenta un estudio de correlaciones SPT y ángulo de fricción.

También “CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE ARCILLAS DE ALTA PLASTICIDAD DEL MUNICIPIO DE PASAQUINA, DEPARTAMENTO DE LA UNIÓN” del año 2017 (ver [1]), que describe el comportamiento físico y mecánico de suelos plásticos de la zona ante el hinchamiento y retracción y “CARACTERIZACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE SUELOS DE ALTA PLASTICIDAD DEL MUNICIPIO DE DELICIAS DE CONCEPCIÓN, DEPARTAMENTO DE MORAZÁN” del año 2017 (ver [2]), que hace una caracterización de suelos de alta plasticidad de la Zona Oriental. Siendo estas últimas dos, parte de la serie de trabajos de graduación a la que pertenece este documento.

Tomando en cuenta lo descrito anteriormente sobre lo que se conoce sobre los suelos plásticos del país, los objetivos de esta investigación fueron determinar las propiedades físicas y mecánicas de un suelo proveniente del municipio de Ilobasco en el departamento de Cabañas, estudiando su variabilidad para establecer posibles tendencias, correlaciones o proponer modelos matemáticos para describir las propiedades encontradas en los diversos ensayos.

La estructura de este artículo se divide en tres partes: primero se presenta el planteamiento de la metodología con respecto al muestreo y los ensayos de laboratorio a realizar, posteriormente un resumen de los resultados obtenidos en donde se expone, de forma breve, todo lo relevante respecto a la caracterización del suelo. Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones producto del trabajo de caracterización realizado.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Selección de Material.

Un muestreo por toda la zona central de El Salvador dio inicio a esta investigación. Los lugares que fueron parte del muestreo se

presentan en la figura 1.



Fig. 1 Mapa de El Salvador con énfasis en la zona central y los puntos de muestreo de la investigación.

Se realizó el ensayo de Límites de Atterberg a un total de 22 muestras, según procedimientos descritos en la norma ASTM D4318. El suelo a trabajar fue aquel con mayores propiedades plásticas, siendo este, el que se proyectó más lejos del origen en la carta de plasticidad de Casagrande, es decir, límite líquido e índice de plasticidad mayores. Los resultados se presentan en la figura 2.

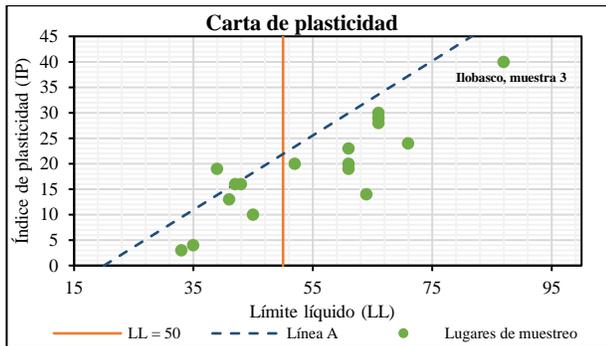


Fig. 2 - Carta de plasticidad con resultados del muestreo en la zona central de El Salvador

Se tuvo como resultado un suelo del municipio de Ilobasco, en el departamento de Cabañas, con LL = 87 e IP = 41. De dicho lugar fueron extraídas 3 muestras, identificadas como banco 1, 2 y 3, como se muestra en la figura 3, para medir la variabilidad en el comportamiento físico del suelo.

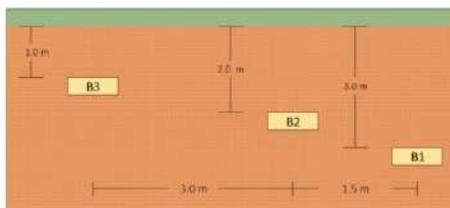


Fig. 3 Esquema de extracción de los bancos 1, 2 y 3 en Ilobasco.

B. Metodología de Laboratorio

La metodología seguida para el proceso de caracterización en el laboratorio se dividió entre física y mecánica. Los procedimientos y cálculos a seguir en cada parámetro a estudiar fueron tomados de las

normas ASTM correspondientes. El detalle de ensayos y normas para la caracterización física se presenta en la tabla I.

TABLA I
DETALLE DE ENSAYOS, DESIGNACIÓN DE NORMA ASTM CORRESPONDIENTE Y CANTIDAD DE ENSAYOS REALIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN FÍSICA.

Nombre de Ensayo	Norma ASTM	N° de ensayos realizados
Límite líquido y límite plástico	D4318-17	23 en fase preliminar. 4 para suelo seleccionado
Lavado de suelos por malla No. 200	C117-17	6
Tamizado mecánico	D6913-17	5
Sedimentación con hidrómetro	D7928-17	3
Gravedad específica	D854-14	14
Peso volumétrico seco suelto	D4254-16	4
Compactación con energía estándar	D698-12	39
Compactación con energía modificada	D1557-12	78

Todos los parámetros físicos presentados en dicha tabla, con excepción del ensayo de compactación, fueron determinados por triplicado, uno para cada banco. Para compactación no se hizo distinción por banco.

Los resultados fueron analizados partiendo de 3 parámetros estadísticos: desviación estándar, coeficiente de variación e intervalo de confianza. La desviación estándar se comparó con el valor límite propuesto por las normas ASTM, denominado como 1s.

El intervalo de confianza se analizó de dos formas: La primera, que todos los valores de un mismo ensayo estuvieran dentro del intervalo de confianza del 95%. Y la segunda, creando una banda de dispersión, con los rangos máximos entre resultados propuestos por las normas, llamado d2s.

Por otro lado, el coeficiente de variación se clasificó según Bonilla (ver [5]), que propone lo siguiente: “altamente representativo” para valores menores al 10%, “bastante representativo” con valores entre 10% y 20%, “tiene representatividad” con valores entre 20% y 30%, “dudosa representación” valores comprendidos entre 30% y 40% y “carente de representatividad” para valores mayores a 40%.

En el ensayo de compactación, los contenidos de humedad de prueba (realizados por triplicado) se extendieron hasta obtener los grados de compactación correspondientes al 90% del peso volumétrico

seco máximo en las ramas seca y húmeda, tanto para energía estándar y modificada.

Una vez determinada la curva de compactación para energía modificada, se procedió a la determinación de los contenidos de humedad correspondientes para condiciones de grados de compactación del 100% y 90% en rama húmeda, y con esas humedades se procedió a replicar dichas condiciones para la realización de los ensayos para obtener las propiedades mecánicas con el fin de medir y establecer las diferencias entre una condición y la otra. El detalle de normas y ensayos para la determinación de las propiedades mecánicas se presentan en la tabla II.

TABLA II

DETALLE DE ENSAYOS, DESIGNACIÓN DE NORMA ASTM CORRESPONDIENTE Y CANTIDAD DE ENSAYOS REALIZADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN MECÁNICA.

Nombre de Ensayo	Norma ASTM	N° de ensayos
Compresión triaxial no consolidada-no drenada*	D2850-15	34
Corte directo de suelos consolidado-drenado.*	D3080-11	48
Compresión no confinada*	D2166-16	21
Consolidación unidimensional	D2453-11	3

*Ensayos realizados con cinco réplicas.

En todos se verificó que se cumplieran los criterios presentados en la norma correspondiente tal y como fue planteado para la caracterización física. Para esto, fue necesario la repetición de cierto número de probetas en ensayos de corte directo, compresión triaxial y no confinada, en ambas condiciones para que pudieran aceptarse.

La cantidad de probetas elaboradas se extendió a las mínimas necesarias para garantizar la homogeneidad de las muestras en cuanto al contenido de humedad o si se presentaban resultados inusuales; ya que su variación implica fluctuación de propiedades mecánicas.

El ensayo de consolidación por su parte, se realizó por triplicado para un grado de compactación correspondiente al 100% en condición saturada. Dichas muestras fueron sometidas a una serie de cargas (20, 40 y 80 kgf y como criterio de cambio de carga se utilizó la diferencia de pendiente en la curva deformación-log(tiempo), que establece el cambio de consolidación primaria a secundaria) para la estimación del coeficiente de consolidación C_c y el coeficiente de permeabilidad, k .

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Propiedades físicas

En la tabla III, se muestra un resumen de los resultados de los ensayos a las propiedades físicas.

TABLA III
RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS A LAS PROPIEDADES FÍSICAS.

Ensayo	Propiedad	Rango		Prom.
		Mín	Máx	
Tamaño de partícula	%Arenas, %	3.2	4.2	3.7
	Arena media, %	0.7	1.3	0.9
	Arena fina, %	2.3	2.8	2.6
	%Finos, %	95.8	96.8	96.33
	Limo, %	48.0	49.2	48.8
	Arcilla, %	47.3	47.8	47.6
Límites de consistencia	LL	85	89	87
	LP	44	48	46
	IP	38	44	41
	LC	30	34	32
Gs		2.56	2.69	2.61
Peso volumétrico suelto seco, kg/m ³		889	923	903

La clasificación como suelo plástico es congruente con los datos esperados ya que, según el MAG (ver [10]), el municipio de Iobasco, departamento de Cabañas se encuentra constituido mayormente por suelos de color rojizo con propiedades plásticas.

En cuanto a resultados de compactación, en la figura 4 se observan las curvas densidad-humedad para ambas energías ensayadas y en la tabla IV se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

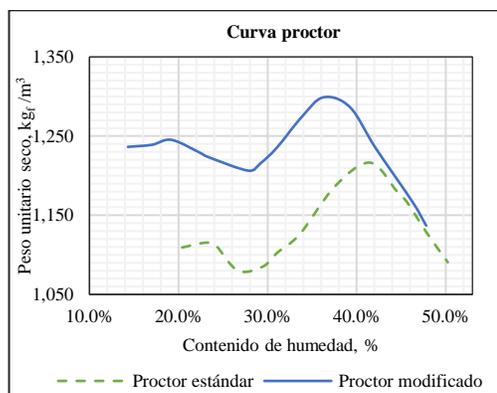


Fig. 4 Curvas de compactación para energías estándar y modificada.

TABLA IV
RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS DE ENSAYO DE COMPACTACIÓN.

Proctor estándar			
Humedad óptima, %	41.5		
PVS _{MAX} , kg/m ³	1,215		
	Mín.	Máx.	Promedio
Relación de vacíos	1.15	1.42	1.31
Porosidad, %	53.4	58.6	56.7
Grado de saturación, %	39.4	96.3	36.2
Proctor modificado			

Humedad óptima, %	36.8		
PVS _{MAX} , kg/m ³	1,300		
	Mín.	Máx.	Promedio
Relación de vacíos	1.01	1.30	1.12
Porosidad, %	50.2	56.4	52.9
Grado de saturación, %	33.6	99.6	34.6

B. Propiedades mecánicas

En la figura 5, 6 y 7 se presentan consolidados de los resultados de compresión no confinada, compresión triaxial y corte directo respectivamente.

Los resultados que se muestran en color morado corresponden a un grado de compactación del 100%, y los resultados que se muestran en color verde corresponden a los obtenidos para un grado de compactación del 90% en rama húmeda. Es evidente una reducción en el esfuerzo de corte en el suelo al pasar de un grado de compactación mayor a uno menor.

En el caso de la envolvente del 90% en el ensayo de corte directo (figura 7) pueden observarse dos tendencias, en donde el tramo con esfuerzo normal de 0 a 0.5 kgf/cm² se comporta como un suelo cohesivo, y de 0.5 a 1.5 kgf/cm² se comporta como friccionante.

Este comportamiento también se presentó en una investigación hecha por Suárez (2009, ver [3]), en donde se muestra resultados de laboratorio con un comportamiento bilineal en arcillas parcialmente saturadas (grado de saturación mayor a 70), en el cual se establece que a esfuerzos de confinamiento altos, la envolvente tiende al origen, mientras que a esfuerzos bajos sigue una tendencia horizontal. Por lo que el comportamiento encontrado en el laboratorio puede considerarse congruente para altos niveles de contenido de agua en este suelo para dicha condición.

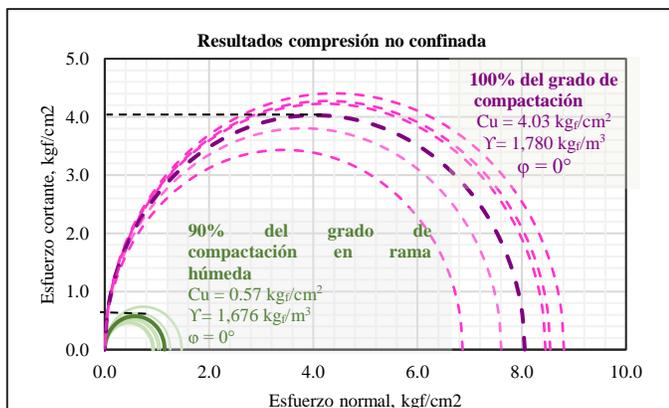


Fig. 5 Gráfico consolidado de resultados de compresión no confinada para grados de compactación del 100% y 90% del mismo en la rama húmeda.

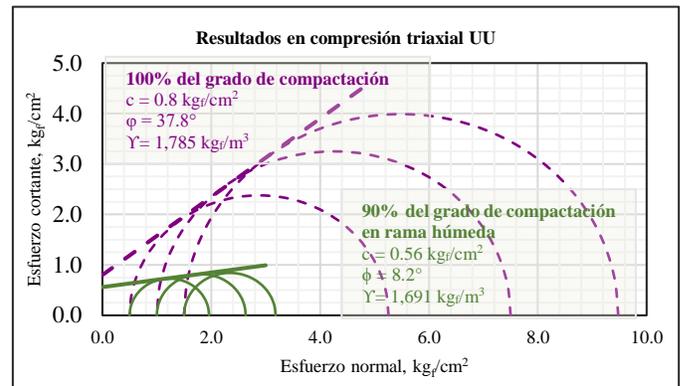


Fig. 6 Gráfico consolidado de ensayo de compresión triaxial para grados de compactación del 100% y 90% del mismo en la rama húmeda.

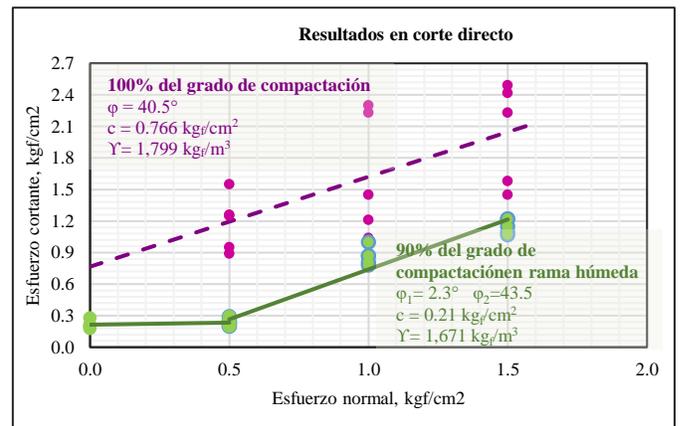


Fig. 7 Gráfico consolidado del ensayo de corte directo para grados de compactación del 100% y 90% del mismo en la rama húmeda.

En la tabla V se presenta un resumen de los resultados de los ensayos a estas propiedades para ambas condiciones de compactación mencionadas. Además, en la última columna se presenta la relación de pérdida que hay entre ellas, expresado como el porcentaje de la diferencia de los resultados obtenidos para un grado de compactación del 100% y el resultado obtenido para un grado de compactación del 90%, dividida entre el resultados obtenido para un grado de compactación del 100%.

TABLA V
RESUMEN DE RESULTADOS DE ENSAYOS A PROPIEDADES MECÁNICAS.

Ensayo	Propiedad	100% de compactación	90% en la rama húmeda	%pérdida
Compresión no confinada	c, kgf/cm ²	4.03	0.57	86%
	E**,	426.7	41.6	90%
	kgf/cm ²			
	γ, kgf/m ³	1,780	1,676	6%
Compresión triaxial	c, kgf/cm ²	0.8	0.56	30%
	φ, °	37.8	8.2	78%

Ensayo	Propiedad	100% de compactación	90% en la rama húmeda	%pérdida
	E**, kg/cm ²	E _{0.5} = 134.1 E _{1.0} = 222.6 E _{1.5} = 237.1	E _{0.5} = 31.2 E _{1.0} = 45.7 E _{1.5} = 58.0	E _{0.5} = 77% E _{1.0} = 80% E _{1.5} = 76%
	γ, kg/m ³	1,785	1,691	5%
Corte directo	c, kg/cm ²	0.77	0.21	73%
	φ, °	40.5	φ ₁ = 2.3° φ ₂ = 43.5°	-7%*
	γ, kg/m ³	1,799	1,671	7%

* El signo negativo indica que no hubo una reducción del valor en el 90%, sino más bien un aumento (tramo 2).

**Resultados obtenidos para deformaciones unitarias ϵ entre 0 hasta 0.04 para la condición del 100% del grado de compactación y entre 0 hasta 0.02 para el 90% en la rama húmeda.

Al analizar los valores dados para módulo de elasticidad, se puede observar una reducción en más del 70%, en todos los casos al pasar del 100% de compactación al 90% de esta en la rama húmeda. Esto se debe a que “a menores contenidos de agua, el agua une las partículas, aumenta el esfuerzo y la succión entre las partículas y da lugar a un alto módulo de suelo” (ver [8]).

Estas razones de pérdida son además congruentes con las presentadas por Ayala y otros (ver [1]), por lo que, independientemente del tipo de suelo, el 90% en la rama húmeda pierde arriba del 50% de la resistencia respecto a la condición más compacta.

1) Esquemas de falla

Para los ensayos de compresión triaxial y no confinada se observó un tipo de falla común en cada condición de compactación ensayada. Como se observa en las figuras 8 (a) y 8 (c), el tipo de falla común en el grado de compactación del 100% fue a través de un plano inclinado, lo que se conoce como falla por corte (ver [9]). Este plano de falla define, usualmente de forma clara, un ángulo, que puede correlacionarse con el ángulo de fricción del suelo en estudio.

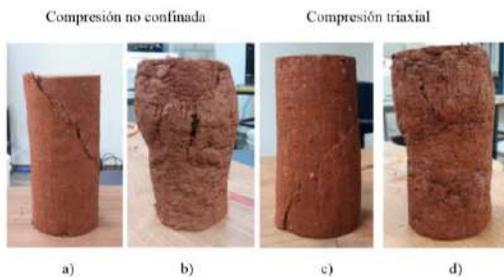


Fig. 8 Probetas falladas luego del ensayo de compresión no confinada y compresión triaxial (a) y (c) Condición del 100% de compactación. (b) y (d) Condición del 90% de compactación en la rama húmeda.

Por otra parte en las figuras 8 (b) y 8 (d) se muestran las probetas en el grado de compactación del 90% en la rama húmeda, las cuales presentaron fallas por fluencia plástica.

2) Consolidación unidimensional de arcillas.

En el ensayo de consolidación unidimensional no se pudo realizar la serie de cargas y descargas establecidas inicialmente, debido a los largos tiempos requeridos para que en las curvas deformación vs log(tiempo) se definiera el cambio de pendiente. Adicional a esto, para la primera carga de 20 kg_f se presentó hinchamiento en las 3 muestras. Es por esto que no se pudo establecer una tendencia en las propiedades del suelo, solo destacar las particularidades que se tuvieron en la etapa que sí se pudo completar. Es decir la carga de 40 kg_f, pues fue la única en la que se pudo calcular el tiempo de consolidación primaria, los resultados obtenidos se muestran en la tabla VI.

TABLA VI
RESULTADOS PROMEDIOS Y PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE PERMEABILIDAD Y COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN.

Carga kg _f	Cv prom. (cm ² /s)	k prom. (cm/s)
40	2.40x10 ⁻⁵	2.13x10 ⁻¹⁰
μ	1.39x10 ⁻⁵	1.60 x10 ⁻¹⁰
CV%	58.10%	75.21%

Al comparar el valor promedio de coeficiente de consolidación Cv, presentado en la investigación de Delicias de Concepción de 9.35x10⁻⁴ cm²/s, (ver [2]), con el presentado en la tabla 6 se puede ver como este último es mucho menor. Lo anterior puede deberse a la proporcionalidad del mismo con la velocidad de consolidación, lo que es congruente con el tiempo observado en el laboratorio.

IV. CONCLUSIONES

A. Propiedades físicas

De acuerdo a ASTM D 2487-11, el suelo en estudio se clasifica como MH y se describe como Limo elástico, color café rojizo, con 0% de grava, 4 % de arena fina a media y 96% de finos (49% de limo y 48% de arcilla) de alta plasticidad (LL=87%, LP=46% , IP= 41% y LC=32%). Con una gravedad específica promedio de 2.61 y un peso volumétrico seco suelto de 903 kg/m³.

De acuerdo al sistema de clasificación descrito por AASHTO M 145 el suelo se clasifica como un A-7-5 (50).

En cuanto a las propiedades de compactación del suelo compactado con energía modificada y estándar los pesos volumétricos

secos máximos obtenidos son de 1300 kg/m^3 y 1215 kg/m^3 con humedades óptimas de 36.8 y 41.5 respectivamente.

La figura 9 muestra las curvas de la relación humedad- densidad obtenidas, mostrando en el eje de contenido de humedad sus límites de consistencia y las relaciones de los contenidos óptimos de humedad con respecto al límite plástico, que son: humedad óptima para energía modificada = Límite plástico menos 9.2% y humedad óptima para energía estándar = Límite plástico menos 0.9%.

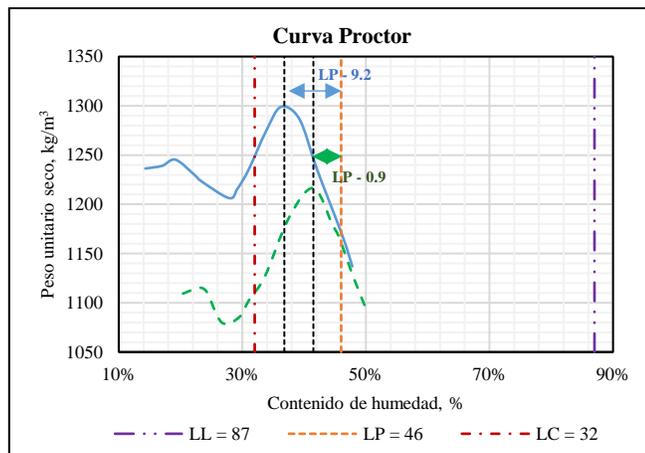


Fig. 9 Relación entre los resultados del ensayo de límites de consistencia y las curvas Proctor modificada y estándar.

El peso volumétrico seco en estado suelto representa un grado de compactación equivalente al 74.3% respecto al peso volumétrico seco máximo obtenido de Proctor con energía modificada y del 69.4% con respecto al peso volumétrico seco máximo de Proctor con energía estándar.

B. Propiedades mecánicas

De los resultados obtenidos en la tabla V, puede apreciarse que en general se presenta una disminución (mayor al 70%) de los valores de parámetros del suelo (ϕ , γ , c y E), debido al incremento del contenido de agua entre la humedad óptima y la humedad correspondiente al 90% del grado de compactación en la rama húmeda. Ya que por encontrarse por encima del límite plástico, es susceptible a una degradación estructural por el acomodamiento de partículas, es decir que sus propiedades mecánicas se ven afectadas.

Asimismo, se presenta un comportamiento inusual de los parámetros del suelo en los resultados obtenidos en el ensayo de caja de corte directo para un grado de compactación correspondiente al 90% de la rama húmeda, de acuerdo a la figura 7, formando una tendencia bilineal.

Los parámetros del suelo obtenidos en pruebas no confinadas fueron: $\phi = 0^\circ$, $\gamma = 1,780 \text{ kg/m}^3$, $c = 4.03 \text{ kgf/cm}^2$ y $E = 426.7 \text{ kgf/cm}^2$ (para valores de ϵ entre 0 y 0.04) para el grado de compactación del 100%. Mientras que, para el grado de compactación en el 90% en la rama húmeda, se obtuvieron: $\phi = 0^\circ$, $\gamma = 1,676 \text{ kg/m}^3$, $c = 0.57 \text{ kgf/cm}^2$ y $E = 41.6 \text{ kgf/cm}^2$ (para valores de ϵ entre 0 y 0.02), como se muestra en la tabla V.

Para el ensayo de compresión triaxial se obtuvieron valores de $\phi = 37.8^\circ$, $\gamma = 1,785 \text{ kg/m}^3$, $c = 0.8 \text{ kgf/cm}^2$ y valores de E entre 134.1 kgf/cm^2 y 237.1 kgf/cm^2 (para valores de ϵ entre 0 y 0.04) para el grado de compactación del 100%. Mientras que, para el grado de compactación en el 90% en la rama húmeda, se obtuvieron: $\phi = 8.2^\circ$, $\gamma = 1,691 \text{ kg/m}^3$, $c = 0.56 \text{ kgf/cm}^2$ y valores de E entre 31.2 kgf/cm^2 y 58.0 kgf/cm^2 (para valores de ϵ entre 0 y 0.02), como se muestra en la tabla V.

Para el ensayo de corte directo se obtuvieron valores de $\phi = 40.5^\circ$, $\gamma = 1,799 \text{ kg/m}^3$ y $c = 0.77 \text{ kgf/cm}^2$ para el grado de compactación del 100%. Mientras que, para el grado de compactación en el 90% en la rama húmeda, se obtuvo una tendencia bilineal que se resume de la siguiente forma: para esfuerzos normales de 0 a 0.5 kgf/cm^2 $\phi = 2.3^\circ$ y $c = 0.21 \text{ kgf/cm}^2$, y de 0.5 a 1.5 kgf/cm^2 $\phi = 43.5^\circ$ y $c = 0.23 \text{ kgf/cm}^2$ para un peso volumétrico seco de $1,691 \text{ kg/m}^3$ como se muestra en la tabla V.

Los tipos de falla más frecuentes que se observaron fueron de corte y fluencia plástica, de acuerdo a la figura 8.

Finalmente para ensayo de consolidación unidimensional correspondiente a un grado de compactación del 100% en condición saturada, se presentó hinchamiento ante una carga normal de 20 kgf (equivalente a 0.6 kgf/cm^2). Y para la carga de 40 kgf (equivalente a 1.3 kgf/cm^2) se obtuvo un C_c promedio de 0.056 y un coeficiente de permeabilidad de $2.13 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$. Los períodos de aplicación de carga para que se completara la consolidación primaria en cada incremento de carga variaron de 6 a 8 semanas.

Dado que los comportamientos mecánicos presentados en este trabajo corresponden a solo los grados de compactación del 100% y 90% en la rama húmeda, se recomienda ampliar el tipo de ensayos (CBR, colapsabilidad, hinchamiento, compresión no confinada, compresión triaxial UU, CU y CD, corte directo y consolidación unidimensional) y las condiciones de estos a otros grados de compactación (por ejemplo, 90% y 95% en rama seca y 95% en rama húmeda) para energías de compactación estándar y modificada.

Adicional a esto, se recomienda complementar con ensayos de difracción de rayos X para evaluar el mineral predominante en este suelo.

RECONOCIMIENTOS

Agradecemos a nuestro director de tesis, ingeniero Néstor España, por sus conocimientos, esfuerzo, paciencia, amabilidad, amistad y tiempo, que fueron clave para que lográramos culminar este trabajo de graduación y que con su ejemplo nos inspira a ser grandes profesionales. A Julio López y Giovanni López quienes fueron fundamentales a lo largo del desarrollo de los ensayos de laboratorio que forman parte de este documento y que con su amistad y amabilidad transformaron nuestros días en el laboratorio. A nuestra lectora, ingeniera Patricia de Hasbun, cuyos conocimientos y aportes fueron parte esencial de este documento.

REFERENCIAS

- [1] Alberto, D., & Moscoso, I, *Caracterización física y mecánica de arcillas de alta plasticidad del municipio de Pasaquina, departamento de La Unión, UCA, Antiguo Cuscatlán.* (2017)
- [2] Ayala Tavarone, J. R., Hidalgo Chavéz, H. E., Mejía Velásquez, D. R., & Osegueda Valencia, D. E, *Caracterización física y mecánica de suelos de alta plasticidad del municipio de Delicias de Concepción, departamento de Morazán, UCA, Antiguo Cuscatlán,* (2018)
- [3] Suárez, J. *Deslizamientos: Análisis geotécnico,* Bucaramanga, Colombia, pp. 75-123, 2009
- [4] Granada, Santos, Aparicio, & Samayoa, *Caracterización física y mecánica de los suelos de San Miguel,* UCA, San Salvador, (1995).
- [5] Bonilla, G. *Estadística: Elementos de estadística descriptiva y probabilidad,* Antiguo Cuscatlán, El Salvador, UCA Editores, (1986).
- [6] Coduto, D. P. *Foundation Design, Principles and Practices.* Nueva Jersey, USA, Prentice Hall, (2001)
- [7] Coduto, D. P. *Geotechnical Engineering: Principles and Practices.* New Jersey, USA, Prentice Hall, Inc, (1999)
- [8] Geniolandia (2018) website. [En línea]. Disponible: <https://www.geniolandia.com/13143201/modulo-elastico-en-suelos>
- [9] Natalia Pérez, Paul Garnica, Itzel Mendoza, Blanca Flores, “*Comportamiento de suelos finos compactados con altos niveles de esfuerzo cortante*”, Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C. Cancún. (2012)
- [10] Ministerio de Agricultura y ganadería, *Clasificación por división política de El Salvador,* Soyapango, San Salvador (2012)
- [11] Das, B. M., *Principios de ingeniería de cimentaciones* (2011).
- [12] ASTM D2216-10, *Laboratory determination of water (moisture) content of soil and rock by mass,* edición 2018.
- [13] ASTM D7928-17, *Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis,* edición 2018.
- [14] ASTM D4429-09, *Standard Test Method for CBR (California Bearing Ratio) of soils in place,* edición 2018.
- [15] ASTM D427-04, *Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method,* edición 2018.
- [16] ASTM 2435-11, *Standard test methods for One-dimensional Consolidation properties of soils using Incremental loading,* edición 2018.
- [17] ASTM D2487-11, *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified System),* edición 2018.
- [18] ASTM D3080-11, *Direct shear test of soils under consolidated drained conditions,* edición 2018.
- [19] ASTM D75-11, *Standard Practice for Sampling Aggregates,* edición 2018.
- [20] ASTM D1557-12, *Laboratory Compaction Characteristics of soil using modified effort (56 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³)),* edición 2018.
- [21] ASTM D698-12, *Standard test methods for Laboratory Compaction Characteristics of soils using Standard Effort (12,400 ft-lb/ft³ (600 IN-m/m³)),* edición 2018.
- [22] ASTM D702-12, *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing,* edición 2018.
- [23] ASTM 6026, *Standard practice for using significant digits in geotechnical data,* edición 2013.
- [24] ASTM D854-14, *Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer,* edición 2018.
- [25] ASTM D3282-15, *Standard Practice for Classification of Soils and Soil Aggregate Mixtures for Highway Construction Purposes,* edición 2018.
- [26] ASTM D2166-16, *Standard test method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil,* edición 2018.
- [27] ASTM D4254-16, *Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils and calculation of relative density,* edición 2018.
- [28] ASTM D1140-17, *Standard test methods for determining the amount of material finer than No.200 sieve in soils by washing,* edición 2018.
- [29] ASTM D4318-17, *Standard test methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils,* edición 2018.
- [30] ASTM D6913-17, *Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis,* edición 2018.