

Estabilización de arcillas expansivas con ceniza volcánica y ceniza de cascarilla de arroz

Stabilization of expansive clays with volcanic ash and rice husk ash

Mercedes Villacís Troncoso¹ <https://orcid.org/0000-0002-8465-8437>, Germán Luna Hermosa¹ <https://orcid.org/0000-0002-1963-9061>, Gilles Escadeillas² <https://orcid.org/0000-0003-1569-4685>, Karina Román Solórzano¹ <https://orcid.org/0000-0003-4100-5695>, Cristhian Licuy Ordóñez¹ <https://orcid.org/0000-0002-7911-4558>, Liseth Orbe Pinchao¹ <https://orcid.org/0000-0001-9144-945X>, Paúl Zúñiga Morales¹ <https://orcid.org/0000-0002-6218-8737>, Víctor Guerrero Barragán³ <https://orcid.org/0000-0002-8465-8437>

¹*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental (FICA), Quito, Ecuador*

mercedes.villacis@epn.edu.ec, german.luna@epn.edu.ec,
karinaroman27@hotmail.com, cristhianabel69@gmail.com,
liseth.orbep@epn.edu.ec, paul.zunigam@epn.edu.ec

²*LMDC, INSA / Université Paul Sabatier, Toulouse, Francia*
gilles.escadeillas@insa-toulouse.fr

³*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Mecánica, Quito, Ecuador*
victor.guerrero@epn.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Enviado: 2021/05/18

Aceptado: 2022/03/08

Publicado: 2022/06/30

Resumen

Una arcilla expansiva es aquella que sufre grandes variaciones de volumen según los cambios de humedad a los que está expuesta, produciendo una expansión con el aumento de humedad y una contracción con la disminución. Este fenómeno genera problemas significativos en las obras que deben cimentarse sobre este tipo de suelo. El diseño experimental consiste en efectuar pruebas de laboratorio para determinar las propiedades físicas y mecánicas de 3 muestras de arcilla expansiva, las que se comparan con muestras de suelo estabilizadas. La estabilización se realiza mediante el reemplazo de suelo por varios porcentajes de ceniza, para controlar su cambio de volumen. Para ello, se usan dos tipos de cenizas, la primera proveniente

Sumario: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusiones.

Como citar: Villacís, M., Luna, G., Escadeillas, G., Román, K., Licuy, C., Zúñiga, P. & Guerrero, V. (2022). Estabilización de arcillas expansivas con ceniza volcánica y ceniza de cascarilla de arroz. *Revista Tecnológica - Espol*, 34(2), 15-28. <http://www.rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/887>

del volcán Tungurahua y la otra de origen orgánico (ceniza de cascarilla de arroz), combinadas en una proporción de partes iguales (50% - 50% en peso). Los ensayos se aplican sobre muestras de suelo con los reemplazos del 10%, 20% y 30% en peso del suelo arcilloso, por la mezcla estabilizadora de cenizas. La combinación de ceniza en la masa del suelo logra una reducción del efecto de cambio de volumen típico de las arcillas expansivas puras, una disminución del límite líquido, un descenso de la gravedad específica, disminución del índice de expansión e incremento en la resistencia al corte y coeficiente de consolidación.

Palabras clave: Suelos, expansión, puzolana natural, mezcla estabilizante, ceniza volcánica, ceniza cascarilla de arroz.

Abstract

An expansive clay undergoes large variations in volume according to the changes in humidity to which it is exposed, producing an expansion with increasing humidity and a contraction with its reduction. This phenomenon generates significant problems in the works that must be founded on this type of soil. This experimental design consists of laboratory tests to determine the physical and mechanical properties of three samples of expansive clay compared to stabilized soil samples. Stabilization is obtained by replacing the soil with various percentages of ash to control its volume change. For this purpose, two types of ashes are used: the first one from the Tungurahua volcano and the other of organic origin (rice husk ash), combined in a proportion of equal parts (50% - 50% by weight). The tests were applied on soil samples with replacements of 10%, 20%, and 30% by weight of the clayey soil, by the ash stabilizing mixture. The combination of ash in the soil mass achieves a reduction of the volume change effect typical of pure expansive clays, a reduction in the liquid limit, a decrease of the specific gravity, a decrease of the expansion index, and an increase of the shear strength and consolidation coefficient.

Keywords: Soil, expansion, natural pozzolan, stabilizing mixture, replacement.

Introducción

En la construcción de obras civiles, el suelo es un elemento fundamental a tener en cuenta, ya que, el tipo de cimentación que se utilice y la estabilidad de la estructura dependerán de la capacidad portante del suelo y de las características físicas y mecánicas del material en donde han de emplazarse. Ecuador tiene una amplia variedad de suelos, cada uno con distintas propiedades, existen suelos cuyas características no permiten albergar los cimientos de una estructura de forma segura; uno de ellos es la llamada arcilla expansiva. En consecuencia, en las arcillas expansivas se da el fenómeno cíclico de hinchamiento/encogimiento, que implica que las arcillas se hinchan al humedecerse, luego se secan para encogerse (parcialmente o completamente), cuando se humedecen nuevamente se hinchan y al secarse se vuelven a encoger (Basma et al., 1996).

Debido a la variación de humedad en los suelos expansivos, se producen daños como afectación de tuberías, deformación y agrietamiento de pavimentos, fisuración en elementos estructurales e incluso rotura de la cimentación, entre otros. Estos daños en las estructuras afectan especialmente a las edificaciones ligeras como: casas, vertederos, muros y pavimentos (*NEC-SE-CM*, n.d.). Por esta razón, estos suelos requieren tratamientos para poder realizar una construcción sobre ellos.

Actualmente, se pueden estabilizar estas arcillas con diferentes productos, los más utilizados son cemento y/o cal, un ejemplo de los múltiples estudios que existen sobre el uso

de estos materiales es el de Ganta (2017), además se emplean mezclas de polímeros y puzolanas de origen natural junto con la acción de un agente alcalinizante (Cheng et al, 2018).

Materiales y Métodos

Materiales

Este estudio consistió en comparar las propiedades de la muestra de arcillas expansivas naturales y estabilizadas, con una combinación de ceniza de cascarilla de arroz (CCA) y ceniza del volcán Tungurahua (CV), en una proporción del 50% de cada una, y con esta combinación se reemplazó el suelo arcilloso en porcentajes del 10%, 20% y 30% en peso, compactado al 95% del proctor modificado (Bose, 2020) (Tabla 1).

Tabla 1

Porcentaje de reemplazo en peso de cenizas CV y CCA en arcillas

MUESTRA DE ARCILLA	% SUSTITUCIÓN SUELO POR CENIZAS EN PESO	COMBINACIÓN DE CENIZAS EN PESO	
		% CENIZA VOLCÁNICA	% CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ
M1	10	50	50
	20	50	50
	30	50	50
M2	10	50	50
	20	50	50
	30	50	50
M3	10	50	50
	20	50	50
	30	50	50

Las características físicas y mecánicas de las muestras de suelo en estado natural y suelo estabilizado, en condición compactada, se obtuvieron mediante pruebas estandarizadas por la Sociedad Americana de Ensayos y Materiales (ASTM) como contenido de humedad (ASTM D2216, 2010), Límites de Atterberg (ASTM D4318, 2017), Distribución del tamaño de partículas (gradación) de suelos mediante análisis por tamizado (ASTM D6913, 2017), Clasificación SUCS (ASTM D2487, 2017), Gravedad específica (ASTM D854, 2014), Compactación método proctor modificado (ASTM D1557, 2012), Permeabilidad (ASTM D2434, 2006), Índice de expansión (ASTM D4829, 2011), Consolidación (ASTM D2435, 2011) y Corte directo (ASTM D3080, 2011) (Kataoka et al, 2017).

Ceniza volcánica (CV)

La ceniza volcánica se obtuvo del volcán Tungurahua en la quebrada de Achupashal, donde se ubican múltiples depósitos de material piroclástico originados por la erupción del 14 de julio de 2013 (Manosalvas, 2014).

Para la extracción de la puzolana de ceniza volcánica, se realizó la trituration de rocas de ceniza. La muestra fue pulverizada en un gran porcentaje utilizando la máquina de los Ángeles, aplicando 500 revoluciones y 12 esferas. Posteriormente fue tamizada sobre el tamiz N°200 (0.075 mm).

Dado que la muestra que pasa el tamiz No. 200 se cataloga como puzolana de alto contenido de sílice (Cheng et al, 2018), para el estudio se utilizó el material de ceniza volcánica con tamaño menor que 0,075 mm. En cuanto a la composición mineralógica de la ceniza, esta puede observarse en la Tabla 2.

Ceniza de cascarilla de arroz (CCA)

Las muestras de cascarilla de arroz se obtuvieron de la Piladora de Arroz Andrango, situada en el Recinto Cupa del Cantón Quinindé en la Provincia de Esmeraldas.

El material utilizado fue sujeto a un proceso de molienda manual y tamizado sobre el tamiz N° 200 (0.075 mm), luego de ser sometido a acción térmica durante 2 horas, en un horno eléctrico a una temperatura controlada de 700 °C, para lograr un contenido de puzolana de buena calidad, (Cheng et al, 2018). El material utilizado fue aquel con tamaño menor que 0,075 mm. El análisis mineralógico se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2

Composición mineralógica de las cenizas CV y CCA

MINERAL	NOMENCLATURA	CENIZA VOLCÁNICA	CENIZA CASCARILLA DE ARROZ
		%	%
Óxido de silicio	SiO ₂	56,69	93,2
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	18,12	0,11
Óxido férrico	Fe ₂ O ₃	6,79	0,29
Óxido de sodio	Na ₂ O	4,38	0,15
Óxido de calcio	CaO	6,26	0,54
Óxido de potasio	K ₂ O	1,96	2,3
Óxido de magnesio	MgO	3,26	0,89
Óxido de titanio	TiO ₂	0,93	0,05
Óxido fosfórico	P ₂ O ₅	0,29	0,42
Óxido de manganeso	Mn ₂ O ₃	0,17	0,95

Muestras de arcilla

Las muestras de arcilla estudiadas provienen de la provincia de Manabí, ubicada en la costa ecuatoriana, específicamente de las zonas de las ciudades de Rocafuerte y Tosagua. (Tabla 3).

Tabla 3

Localización de las arcillas expansivas estudiadas

MUESTRA	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD
M1	0°55'36.5"S	80°28'48"W	29 m.s.n.m
M2	0°55'1.7"S	80°25'56.2"W	23 m.s.n.m
M3	0°47'45.1"S	80°15'01"W	19 m.s.n.m

Las características mineralógicas de las arcillas utilizadas pueden ser observadas en la Tabla 4 y los resultados mecánicos constan en la Tabla 5.

Tabla 4*Composición mineralógica de las arcillas estudiadas*

MINERAL	FÓRMULA	MUESTRA		
		M1	M2	M3
		%	%	%
Caolinita	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$	30	25	15
Montmorillonita	$(Na,Ca)_{0,3}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2$	2	2	5
Cuarzo	SiO_2	16	20	25
Grupo plagioclasas (albita, andesita, anorfita)	$(Na,Ca)Al(Si, Al)Si_2O_8$	13	15	24
Diópsido	$CaMgSi_2O_6$	12	13	11
Mordenita	$(Na_2,Ca,K_2)_4(Al_8Si_{40})O_{96}.28H_2O$	7	8	9
Muscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	6	5	3
Magnetita	Fe_3O_4	5	3	3
Gypsum	$CaSO_4.2H_2O$	5	2	2
Cordierita	$Mg_2Al_4Si_5O_{18}$	2	1	1
Hematita	Fe_2O_3	1	1	1
Pargasita	$NaCa_2(Mg_4Al)(Si_6Al_2)O_{22}(OH)_2$	1	4	2
Crossita	$Na_2(Mg,Fe)_3(Al,Fe)_2Si_8O_{22}(OH)_2$	1	1	1

Métodos***Ensayos físicos****Contenido de humedad*

El contenido de humedad es la relación entre la masa de agua contenida en el suelo y la masa del suelo seco y se realiza de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM D2216.

Límites de Atterberg

Los límites de consistencia de un suelo se dividen en límite líquido y límite plástico y la diferencia entre estos se denomina índice de plasticidad. El límite líquido se define como el contenido de humedad con el que un suelo cambia de estado plástico a líquido. El límite plástico es el contenido de humedad con el que un suelo cambia de estado semisólido a plástico.

El ensayo para determinar los límites de Atterberg de las muestras de suelo analizadas se realizó a base de lo indicado en la norma ASTM D4318.

Granulometría

El análisis granulométrico se refiere a la determinación de la cantidad en porcentaje de los diversos tamaños de las partículas que constituyen el suelo. El ensayo fue ejecutado acorde a la norma ASTM D6913.

Clasificación de suelos SUCS

Con los resultados de los ensayos enunciados anteriormente, se procedió a realizar la clasificación de las muestras en estado natural de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), siguiendo los procedimientos establecidos en la norma ASTM D2487. El tipo de suelo al que corresponden las muestras estudiadas, se indican en la Tabla 5.

Gravedad específica

La gravedad específica, también como densidad de sólidos o densidad relativa, se define como la relación entre la densidad de una sustancia con la densidad del agua a 20 °C.

(Das, 2015). En la Tabla 5, se señalan los valores obtenidos para esta propiedad, luego de haber ejecutado el ensayo de laboratorio según la norma ASTM D854.

Compactación

El ensayo de compactación fue realizado de acuerdo con la norma ASTM D1557 para conocer los valores de humedad óptima y densidad seca máxima de las muestras naturales, necesarios para remoldear las muestras sustituidas con puzolana.

Permeabilidad

La permeabilidad es un parámetro físico definido como la capacidad del suelo para permitir el paso del agua sin que ésta altere su estructura, se puede cuantificar mediante el coeficiente de permeabilidad, el cual se determina con la metodología planteada en la norma ASTM D2484.

Se pudo conocer el coeficiente de conductividad hidráulica o permeabilidad (K), mediante la aplicación de una carga constante. Los resultados obtenidos de permeabilidad se visualizan en la Tabla 5

Índice de expansión

El índice de expansión en suelos es un indicador que permite conocer que tan expansivo es un suelo. Se considera un parámetro fundamental para determinar si una arcilla expansiva se ha podido estabilizar. El potencial expansivo de un suelo se puede clasificar en función del valor de índice de expansión, la Tabla 5 indica los valores calculados para las muestras objeto de estudio. La prueba fue realizada según lo indicado en la norma ASTM D4829.

Ensayos mecánicos

Consolidación

La consolidación se define según como la reducción gradual de volumen del suelo por compresión debido a la aplicación de esfuerzos y es causada por la pérdida de aire, agua, o por un reajuste de las partículas sólidas del suelo (Das, 2015).

La prueba realizada consistió en la aplicación de una carga a una muestra de suelo confinado, para provocar una consolidación en una dimensión, siguiendo los procedimientos indicados en la norma ASTM D2435. Los valores de coeficientes de consolidación (C_v), resultado del ensayo, para las diferentes muestras se pueden observar en la Figura 1, Figura 2 y Figura 3.

Corte directo

La resistencia cortante de un suelo es aquella resistencia interna por unidad de área que la masa de suelo puede ofrecer a la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano en su interior. Para definir la resistencia al corte de suelos se utiliza la envolvente de falla de Mohr-Coulomb, la misma que permite conocer la cohesión y ángulo de fricción de los suelos. (Das, 2015).

Los ensayos de corte directo se ejecutaron acorde con la norma ASTM D3080 y los valores de cohesión y ángulo de fricción constan en la Tabla 5.

Microscopio electrónico de barrido

El microscopio electrónico de barrido es un equipo de gran versatilidad que permite obtener información estructural y química de la muestra. Su funcionamiento consiste en hacer incidir un haz de electrones sobre la muestra, los cuales al interactuar con ella generan partículas y radiación, que, al ser captadas por los detectores, permiten formar una imagen

ampliada o realizar un análisis químico de la muestra. En el presente trabajo se utilizó la señal de los electrones secundarios que son arrancados de los átomos de la muestra y proporcionan información de su superficie, incluyendo su morfología, obteniendo imágenes con resoluciones de 100 μm y 20 μm las cuales se presentan en la Tabla 6 (Goldstein, y otros, 2003).

Resultados y Discusión

Los resultados obtenidos de los ensayos físicos y mecánicos realizados en muestras naturales de arcillas expansivas y en suelos estabilizados, se muestran en la Tabla 5 y Figura 1, donde se puede evidenciar, que la combinación de las dos cenizas mejoró las propiedades de las tres muestras de suelo arcilloso de naturaleza expansiva analizadas (Atemimi, 2020).

Tabla 5

Resultados de los ensayos con reemplazo de mezcla de cenizas

Muestra	Sustitución (%)	Límite plástico	Límite líquido	Índice de plasticidad	Clasificación de suelos SUCS	Gravedad específica Gs	Coefficiente de permeabilidad	Índice de expansión	Potencial de expansión	Ángulo de fricción	Cohesión
		(%)	(%)	(%)		(g/cm^3)	K (cm/s)			ϕ ($^\circ$)	
M1	NATURAL	89	37	52	CH	2,78	4,2272E-06	175,53	Muy Alto	30,96	0,23
	10	44	74	30	MH	2,73	No permeable	102,925	Alto	41,67	1,027
	20	32	63	31	MH	2,68	No permeable	67,438	Medio	50,43	0,9
	30	34	61	27	MH	2,64	No permeable	57,288	Medio	51,34	0,87
M2	NATURAL	83	30	53	CH	2,75	1,605E-06	135,66	Muy Alto	18,26	0,3
	10	30	69	39	CH	2,62	No permeable	78,93	Medio	46,12	1,24
	20	31	67	36	CH	2,6	No permeable	73,55	Medio	50,89	0,975
	30	26	64	38	CH	2,58	No permeable	58,29	Medio	54,65	0,945
M3	NATURAL	67	24	42	CH	2,78	1,90685E-06	83,25	Medio	18,26	0,51
	10	30	69	39	CH	2,62	No permeable	67,04	Medio	31,8	0,95
	20	26	55	29	CH	2,58	No permeable	54,98	Medio	36,87	1,31
	30	25	57	32	CH	2,55	5,36E-09	48,58	Bajo	45	1,34

La nomenclatura ‘no permeable’ de la Tabla 5, según la norma ASTM D 2484, hace referencia a valores de coeficientes de permeabilidad menores a $1.00\text{E}-9$.

En los resultados obtenidos de las pruebas físicas y mecánicas llevadas a cabo (Tabla 5), se observa una mejora significativa en todas las propiedades del suelo estabilizadas con un reemplazo del 20% para las tres muestras. En comparación, con un 30% de reemplazo, las mejoras no fueron sustanciales, a partir de este porcentaje se estabilizan las propiedades, lo que significa que hay un límite donde el reemplazo será efectivo.

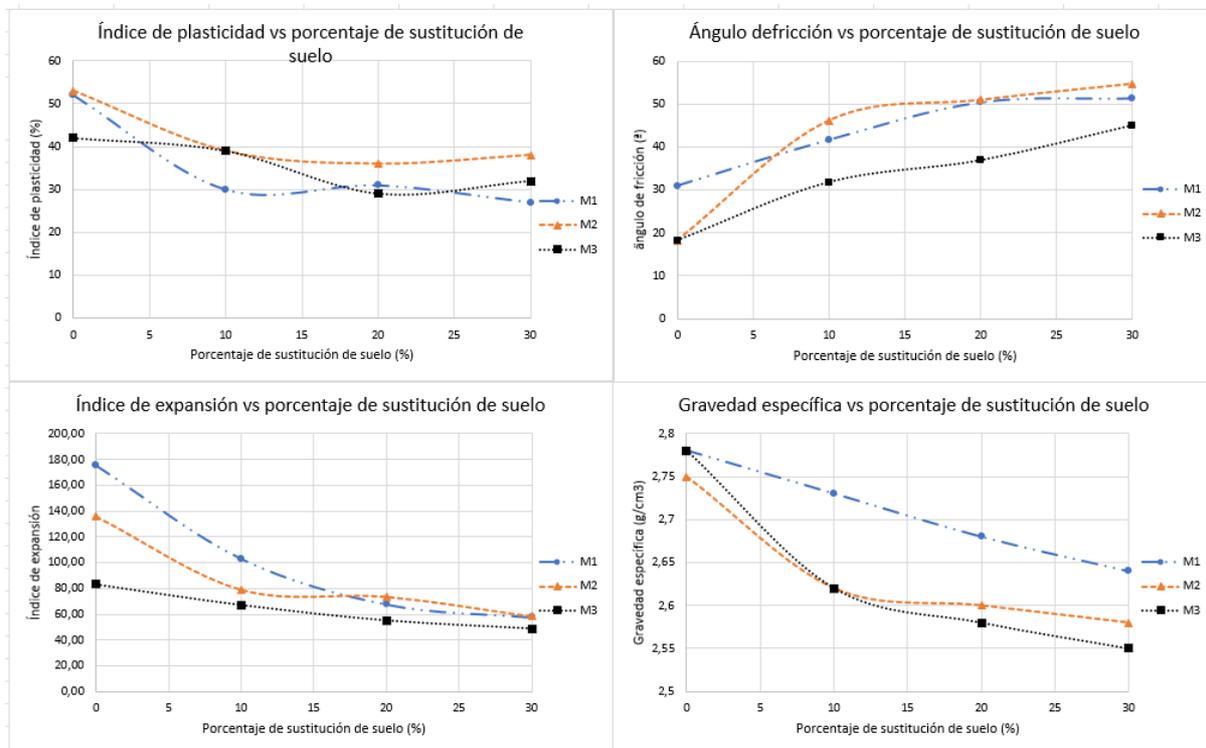
El límite líquido de las muestras estabilizadas disminuye considerablemente con el aumento del porcentaje de cenizas. Mientras que en el límite plástico se muestra un aumento entre la muestra natural y el reemplazo del 10% de ceniza, sin embargo, al aumentar el porcentaje de reemplazo, los valores del límite plástico disminuyen con respecto al primer porcentaje de reemplazo.

Se observa una disminución en el índice de plasticidad, resultando en una reducción en el índice de expansión y por ende en el potencial de expansión. Dado que la actividad expansiva

de las arcillas es directamente proporcional al índice plástico, según Skempton (Sridharan y Nagaraj, 2005).

Figura 1

Gráficos de propiedades analizadas



La disminución de la gravedad específica determina que existe una reducción del peso unitario de las partículas sólidas, esto se debe principalmente a la presencia de ceniza de cáscara de arroz, la cual tiene una densidad menor que la de las arcillas expansivas y la ceniza volcánica (Sivrikaya, et al, 2008).

Las cenizas actuaron cambiando las características del suelo generando una estructura más compacta e impermeable, esto fue evidenciado en la prueba de permeabilidad, donde se sometió a una presión constante de 3 kg/cm^2 durante 100 horas continuas, muestras cilíndricas de 3,5 cm de diámetro y 7 cm de altura. No se evidenció flujo de agua, excepto para la muestra M3-30%.

Los valores del índice de expansión disminuyen significativamente con el aumento de los porcentajes de sustitución de la mezcla de cenizas, cambiando de un potencial de expansión muy alto a medio para las muestras M1 y M2 y de un potencial medio a bajo para la muestra M3.

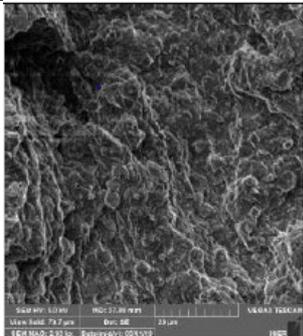
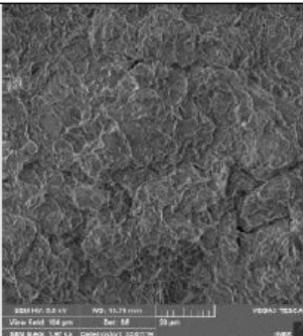
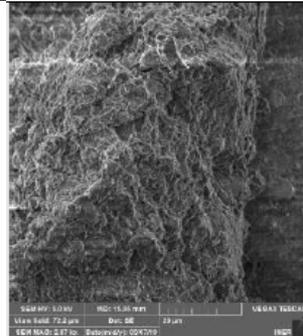
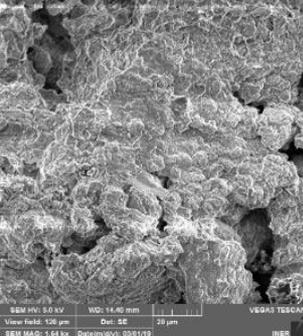
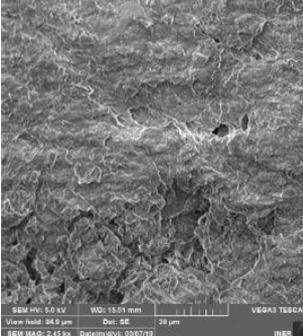
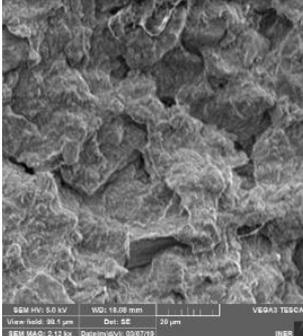
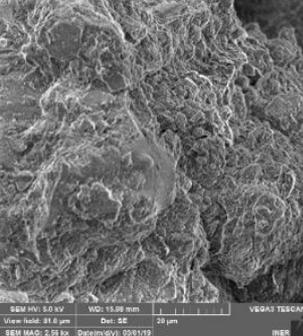
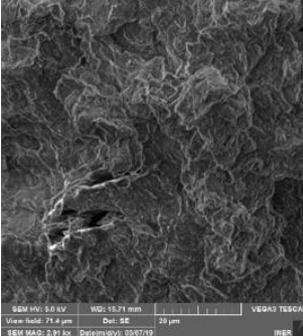
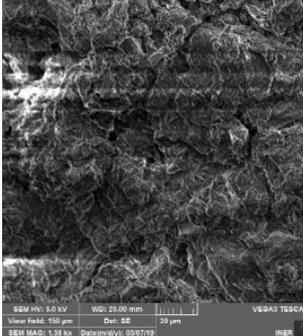
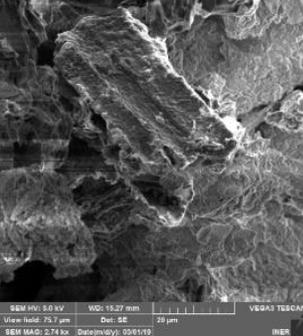
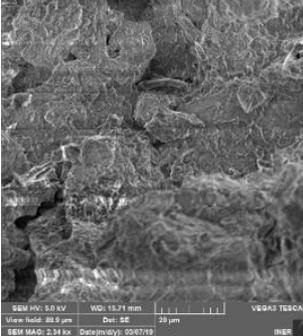
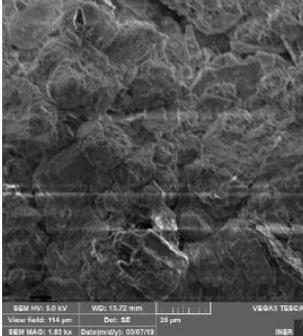
El ensayo de corte directo mostró una mejora significativa en sus parámetros de cohesión y ángulo de fricción, debido a la adición de mezcla de cenizas, las arcillas obtuvieron una excelente resistencia al cizallamiento (Tabla 5).

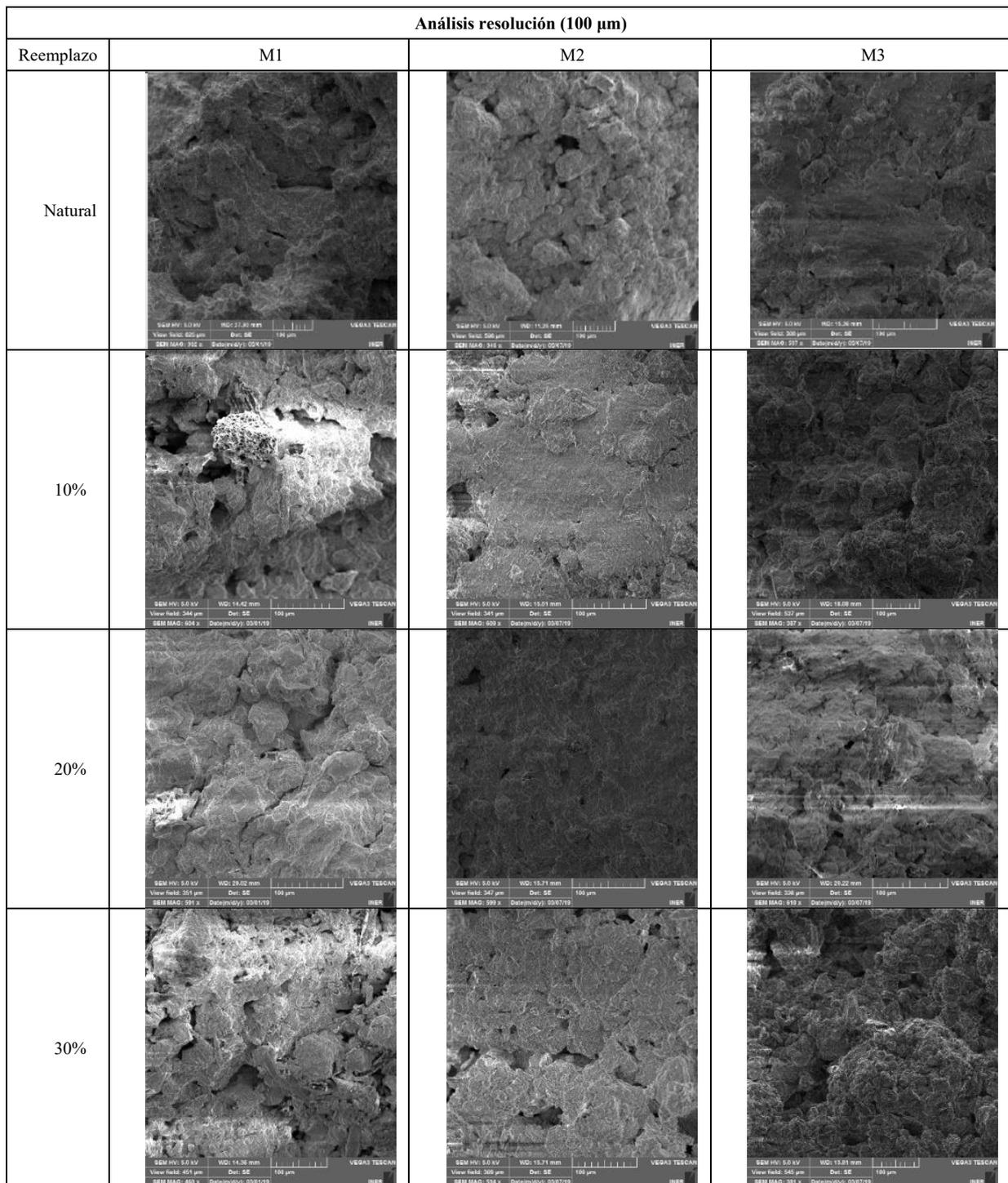
En las imágenes del microscopio electrónico de barrido (Tabla 6), se muestran cambios en la estructura de la arcilla, especialmente en el reemplazo del 20%, donde una estructura más compacta mostró que está en línea con la reducción del coeficiente de permeabilidad, lo que

influye en una disminución del potencial de expansión y a su vez, mejora la resistencia al corte (Tabla 5).

Tabla 6

Resultados con microscopio electrónico de barrido de las muestras de arcilla naturales y estabilizadas

Análisis resolución (100 µm)			
Reemplazo	M1	M2	M3
Natural			
10%			
20%			
30%			



Los coeficientes de consolidación C_v se incrementan a medida que aumenta el porcentaje de ceniza, se puede observar que, en los resultados del 10% de adición de la mezcla de cenizas, se consigue una disminución considerable del coeficiente de consolidación, en los porcentajes de 20 y 30% existe un aumento del valor de C_v . Estos valores están directamente relacionados con el hecho de que, a medida que aumenta el límite líquido del suelo, el C_v disminuye. El coeficiente de consolidación puede ser calculado en función de la permeabilidad del suelo, el coeficiente volumétrico de compresibilidad M_v y la densidad del agua, donde nuevamente se verifica el comportamiento de C_v . Lo anteriormente descrito permite concluir que a valores menores de C_v se llega a tener valores mayores de factor tiempo. Los resultados de las pruebas de consolidación, realizadas con cinco estados de carga y 3 de descarga (1, 2, 4, 8, 16, 4, 1 y 0) kg / cm^2 , se pueden observar en la Figura 2, Figura 3, Figura 4 y Tabla 7.

Tabla 7
Resultados de ensayo de consolidación

Muestra	Sustitución (%)	COEFICIENTE DE CONSOLIDACIÓN - C_v (mm ² /s)						
		ESTADOS DE CARGA (Kg/cm ²)						
		1	2	4	8	16	4	1
M1	NATURAL	2,768	2,89	5,185	7,57	8,639	3,528	1,633
	10%	13,33	5,743	2,554	1,005	0,559	0,676	0,257
	20%	13,61	9,498	5,938	0,854	0,569	0,393	0,473
	30%	25,77	19,02	10,47	0,3998	1,877	0,553	0,743
M2	NATURAL	9,587	8,3	8,315	2,349	5,512	1,185	0,098
	10%	19,49	4,296	7,004	9,103	0,405	1,484	0,149
	20%	9,305	4,574	10,34	3,927	1,81	4,888	0,437
	30%	32,64	9,023	14,74	12,84	0,944	4,295	0,741
M3	NATURAL	10,27	18,53	10,87	6,33	0,373	3,689	0,073
	10%	36,73	19,73	18,85	8,494	2,132	1,375	0,348
	20%	49,2	20	17,43	11,73	1,579	1,637	0,72
	30%	42,66	28	39,52	12,77	5,672	8,098	2,796

Figura 2

Resultados ensayo de consolidación, muestra M1

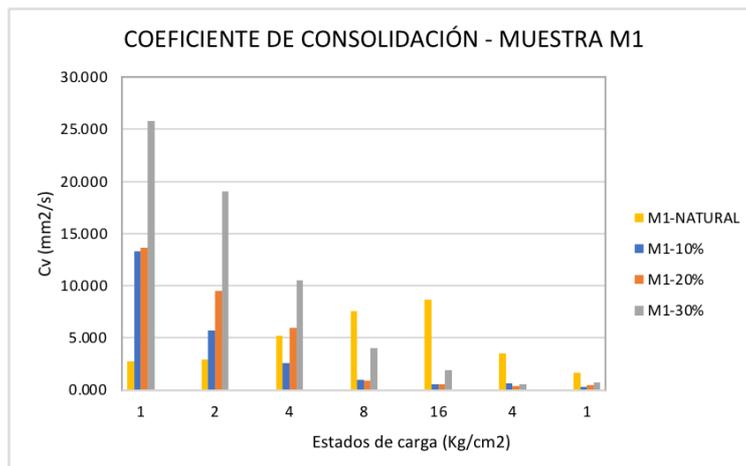


Figura 3

Resultados ensayo de consolidación, muestra M2

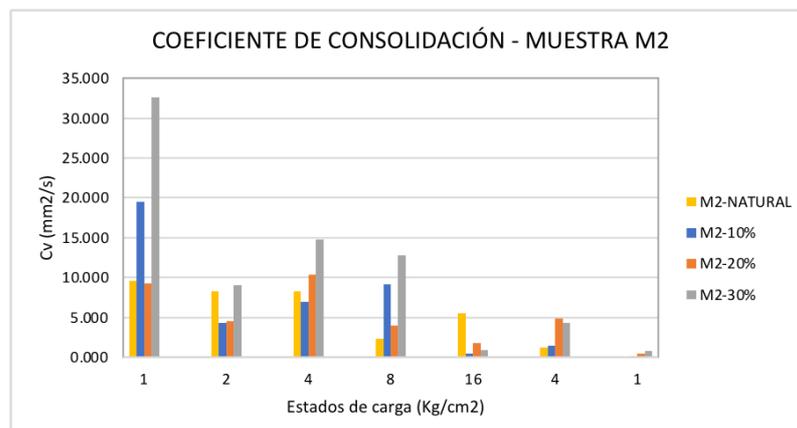
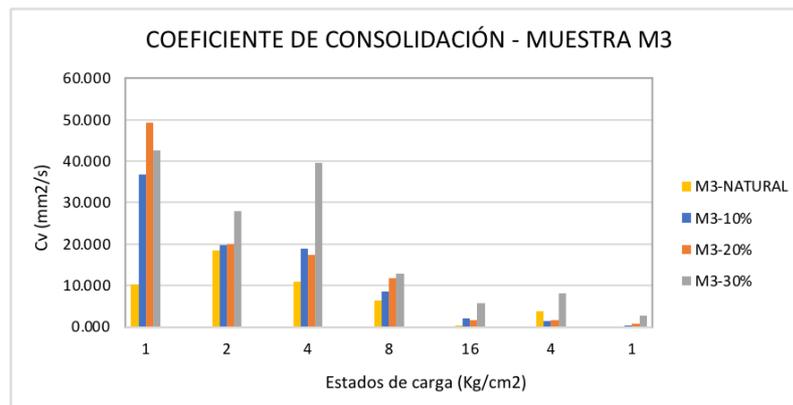


Figura 4*Resultados ensayo de consolidación, muestra M3*

Conclusiones

- A base de los resultados obtenidos, se puede afirmar que el uso de la combinación de las dos cenizas (ceniza volcánica y ceniza de cascarillas de arroz) mejora las propiedades físicas, mecánicas y composición de los suelos arcillosos de naturaleza expansiva.
- El porcentaje de sustitución óptimo de las cenizas constituye el 20%, ya que, para un porcentaje mayor, la mejora de las propiedades de las muestras no es representativa.
- Las muestras con reemplazo de ceniza exhiben una disminución en el índice de plasticidad, resultando una reducción en el índice y potencial de expansión.
- La gravedad específica en las muestras estabilizadas disminuye con la sustitución de cenizas, debido principalmente a la presencia de ceniza de cascarilla de arroz.
- Las cenizas generan una estructura más compacta e impermeable en el suelo, esto se puede visualizar en las fotografías del microscopio electrónico de barrido y comprobar en el ensayo de permeabilidad, donde el flujo de agua es nulo y extremadamente bajo, para las muestras M1, M2 y M3, respectivamente.
- Los valores del índice de expansión disminuyen significativamente con el aumento de los porcentajes de sustitución de la mezcla de cenizas y, por lo tanto, el potencial de expansión también se reduce.
- Las muestras estabilizadas presentan una mejora en su resistencia al corte, aumentando su cohesión y ángulo de fricción.

Reconocimientos

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Proyecto de Investigación “PIS17-11 Estabilización de arcillas esmectitas o expansivas mediante la mezcla de puzolana de la ceniza de arroz y ceniza volcánica del Tungurahua juntas y de forma individual”. Forma parte de la Tesis: Estabilización de arcillas esmectitas o expansivas mediante la mezcla de puzolana de la ceniza de arroz y ceniza volcánica del Tungurahua juntas y de forma individual.

Los autores agradecen el apoyo brindado por el Laboratorio de Ensayos de Materiales, Suelos y Rocas de la Escuela Politécnica Nacional de la ciudad de Quito-Ecuador, durante la ejecución de los ensayos necesarios para la elaboración de esta investigación.

Referencias

- ASTM D3080. (2011). *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*.
- ASTM D4318. (2017). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*.
Alonso, E. E., Vaunat, J., & Gens, A. (1999). Modelling the mechanical behaviour of expansive clays. *Engineering Geology*, 54(1), 173-183. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(99\)00079-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(99)00079-4)
- Angelone, S., Garibay, M., & Cauhapé, M. (2006). *Permeabilidad de Suelos*. Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario.
- ASTM D854. (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*.
- ASTM D1557. (2012). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*.
- ASTM D2216. (2010). *Test Method for Laboratory Determination of Water Content of Soil and Rock*.
- ASTM D2434. (2006). *Standard Test Method for Permeability of Granular Soils (Constant Head)*.
- ASTM D2435. (2011). *Standard Test Methods for One-Dimensional Consolidation Properties of Soils Using Incremental Loading*.
- ASTM D2487. (2017). *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*.
- ASTM D4829. (2011). *Standard Test Method for Expansion Index of Soils*.
- ASTM D6913. (2017). *Standard Test Methods for Particle-Size Distribution (Gradation) of Soils Using Sieve Analysis*.
- Atemimi, Y. K. (2020). *Effect of the grain size of sand on expansive soil*. doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.857.367
- Basma, A. A., Al-Homoud, A. S., Husein Malkawi, A. I., & Al-Bashabsheh, M. A. (1996). Swelling-shrinkage behavior of natural expansive clays. *Applied Clay Science*, 11(2), 211-227. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(96\)00009-9](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(96)00009-9)
- Bose, B. (2020). *Correlation of compressibility behaviour with activity of clay*. *International Journal on Emerging Technologies*, 11(3), 828-832. Retrieved from www.scopus.com
- Cheng, Y., Wang, S., Li, J., Huang, X., Li, C., & Wu, J. (2018). *Engineering and mineralogical properties of stabilized expansive soil compositing lime and natural pozzolans*. Elsevier, 187 Beijing, China. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.061.
- Das, B. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Cengage Learning Editores, S.A., México.
- Ganta, S. (2017). *Soil Stabilization with Rice Husk Ash and Lime Sludge*. *International Journal of Research*, 4(14): 1112 – 1119.
- Goldstein, J., Newbury, D., Echlin, P., Lyman, C., Lifshin, E., Sawyer, L., & Michael, J. (2003). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers.
- Kataoka, S., Shibuya, S., & Uematsu, S. (2017). *Ensayos de laboratorio y terraplen a gran escala de la mezcla de escoria y suelo de grano fino*. Paper presentado en la ICSMGE 2017 - 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 2017-September 939-942.
- Manosalvas, S. (2014). Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/detectores-de-lahares/content/18-tungurahua>.

- Moreno, S., & Rodríguez, J. (2013). *Determinación de las propiedades índices y mecánicas de los suelos expansivos en la vía San Mateo-Esmeraldas zona de Winchele, realizando los ensayos con agua potable y con agua de mar*. Repositorio digital PUCE (Pontificia Universidad Católica del Ecuador). Obtenido de <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/6236>
- NEC-SE-CM (s. f.). Recuperado 25 de noviembre de 2021, de <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/08/NEC-SE-CM.pdf>
- Sivrikaya, O., Togrol, E., & Kayadelen, C. (2008). *Estimating compaction behavior of fine-grained soils based on compaction energy*. Canadian Geotechnical Journal, 45(6), 877-887. DOI:10.1139/T08-022
- Sridharan, A., & Nagaraj, H. B. (2005). *Plastic limit and compaction characteristics of fine-grained soils*. Ground Improvement, 9(1), 17-22. doi:10.1680/grim.9.1.17.58544
- Syahril, S., Somantri, A. K., & Haziri, A. A. (2020). Estudios de las características del suelo arcilloso estabilizado utilizando cenizas volcánicas y relaves como capas de subrasante. Paper presentado en la IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 830(2) doi:10.1088/1757-899X/830/2/022043