

Use of rice husk ash and lime in low plasticity clay soils and its influence on mechanical and hydraulic properties

Erick Anderson Arias Melendez¹; Elder Sebastian Saldaña Diaz²; Gary Gary Duran Ramirez³
^{1,2,3} *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u20201a832@upc.edu.pe, u202022373@upc.edu.pe, pccigdur@upc.edu.pe*

Abstract– Clay soils can be problematic in construction due to their high deformability and low shear strength. Factors such as high humidity and the presence of clayey materials promote soil expansion and contraction, leading to deformations in civil structures. Several studies have shown that the use of rice husk ash and lime as stabilizers improves the properties of clayey soils. This article examines the use of rice husk ash (RHA) and lime to improve the mechanical and hydraulic properties of low-plasticity clayey soils (LC). Sieve Size Analysis, Liquid Limit, Moisture Content, Specific Gravity of Solids, Standard Proctor Compaction, Unconfined Compressive Strength, and Variable Load Permeability tests were performed to evaluate the influence of these stabilizers on soil performance. The results showed that the addition of CCA and lime modified the mechanical and hydraulic properties of the low-plasticity clayey soil after 5 days of curing, showing an increase in the unconfined compressive strength, an increase in the modulus of elasticity of the stabilized soils, as well as a decrease in the permeability coefficient. Among all the samples tested, the optimal percentage of CCA was determined to be 10% and that of lime was 5% of the total weight of the mixture, since this percentage presented the highest unconfined compressive strength and the value of the permeability coefficient decreased with respect to the natural soil.

Keywords-- Low plasticity clay, rice husk ash, lime, unconfined compressive strength, hydraulic conductivity.

Uso de la ceniza de cáscara de arroz y cal en suelos arcillosos de baja plasticidad y su influencia en las propiedades mecánicas e hidráulicas

Erick Anderson Arias Melendez¹; Elder Sebastian Saldaña Diaz²; Gary Gary Duran Ramirez³
^{1,2,3} Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, u20201a832@upc.edu.pe, u202022373@upc.edu.pe, pccigdur@upc.edu.pe

Resumen– Los suelos arcillosos pueden ser problemáticos en la construcción debido a su alta deformabilidad y bajos valores de resistencia al corte. Factores como la humedad elevada y la presencia de materiales arcillosos favorecen la expansión y contracción del suelo, lo que genera deformaciones en las estructuras civiles. Diversos estudios han demostrado que el uso de ceniza de cáscara de arroz y cal como estabilizadores mejora las propiedades de los suelos arcillosos. Este artículo examina el uso de ceniza de cáscara de arroz (CCA) y cal para mejorar las propiedades mecánicas e hidráulicas de suelos arcillosos de baja plasticidad (CL). Para ello, se realizaron ensayos de Análisis Granulométrico por Tamizado, Límite Líquido, Contenido de Humedad, Gravedad Específica de los Sólidos, Compactación tipo Proctor Estándar, Resistencia a la Compresión no Confinada y Permeabilidad por Carga Variable, con el fin de evaluar la influencia de estos estabilizadores en el comportamiento del suelo. Los resultados demostraron que la adición de CCA y cal modificaron las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo arcilloso de baja plasticidad tras 5 días de curado, evidenciando un aumento en la resistencia a la compresión no confinada, incremento en el módulo de elasticidad de los suelos estabilizados, así como una disminución en el coeficiente de permeabilidad. Entre todas las muestras ensayadas, se determinó que el porcentaje óptimo de CCA es del 10% y el de cal es del 5% del peso total de la mezcla, ya que este porcentaje presentó la mayor resistencia a la compresión no confinada y el valor del coeficiente de permeabilidad disminuyó con respecto al del suelo natural.

Palabras clave– Arcilla baja plasticidad, ceniza cáscara arroz, cal, resistencia a la compresión no confinada, conductividad hidráulica.

I. INTRODUCCIÓN

Las complicaciones en la construcción que generan los suelos arcillosos provienen principalmente de su alta deformación y baja resistencia al corte. Una de las principales causas de esta deformación es la alta humedad del suelo.

Los cambios de volumen de los "suelos expansivos" se deben a variaciones en la humedad o alteraciones de la presión total que actúa sobre el suelo, lo cual causa efectos perjudiciales en las obras construidas sobre ellos. Para entender la importancia de estabilizar los suelos arcillosos, debemos comprender la definición de este tipo de suelo y los riesgos que conllevan. Las arcillas se definen como suelos compuestos de partículas microscópicas y submicroscópicas resultantes de la descomposición química de los elementos que conforman la estructura de la roca. Además, estos tipos de suelo, dependiendo

de su composición mineralógica, se convierten en suelos expansivos.[1][2]

Con el tiempo, se han presentado una amplia variedad de propuestas de materiales para ser utilizados como estabilizadores de suelos. Enfocándonos en la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) como material estabilizador, Debido a la higroscopicidad de la CCA, los valores de resistencia a la compresión no confinada (UCS) alcanzan valores más altos que las muestras de suelo arcilloso no tratado [3].

La estabilización de suelos arcillosos ha sido ampliamente estudiada con el objetivo de mejorar sus propiedades mecánicas y su comportamiento en obras de ingeniería civil. En este sentido, se ha evaluado el uso de diferentes agentes estabilizantes para optimizar la resistencia y durabilidad de estos suelos. Un estudio analizó la estabilización de un suelo arcilloso (CS), clasificado según el sistema ISCS, utilizando una combinación de cal y ceniza de cáscara de arroz (CCA). Se determinó que las cantidades óptimas para este tipo de suelo eran un 20% de CCA y un 4% de cal, lo que permitió incrementar significativamente la resistencia al corte y mejorar los valores del CBR de las muestras tratadas. Asimismo, los valores de resistencia a la compresión no confinada (UCS) también mostraron un aumento considerable, evidenciando la efectividad de esta combinación de materiales en la mejora del comportamiento del suelo [4].

Por otro lado, otro estudio propuso una combinación similar de estabilizantes, pero con diferentes proporciones, específicamente un 10% de CCA y un 20% de cal. Los autores de esta investigación recomendaron estas proporciones para suelos con un contenido de partículas finas (limo o arcilla) superior al 90%, con límites líquidos alrededor del 60% e índices de plasticidad cercanos al 30. Esto sugiere que la dosificación de los estabilizantes debe ajustarse en función de las características del suelo a tratar, con el fin de obtener los mejores resultados en términos de resistencia y estabilidad [5].

Además de las combinaciones de cal con materiales puzolánicos como la CCA, también se ha explorado el uso exclusivo de la cal como estabilizante. En una investigación específica sobre suelos arcillosos de alta plasticidad (CH), se determinó que una adición del 6% de cal era suficiente para lograr mejoras significativas en la resistencia del suelo, especialmente después de un período de curado de 28 días. Este estudio destacó que la cal, por sí sola, puede ser un agente

estabilizante eficiente cuando se emplea en las proporciones adecuadas y se le permite el tiempo suficiente para reaccionar con los minerales del suelo [6].

Otro enfoque para la estabilización de suelos ha sido la incorporación de materiales alternativos y activadores alcalinos. Una investigación propuso el uso combinado de CCA y ceniza de cáscara de huevo (CEA), junto con hidróxido de sodio (NaOH) como activador alcalino. Esta mezcla fue comparada con muestras estabilizadas con cemento tradicional, y los resultados mostraron que la adición de estos materiales alternativos permitió alcanzar valores de resistencia significativamente más altos en comparación con las muestras tratadas únicamente con cemento. Esto sugiere que la combinación de residuos agroindustriales y activadores alcalinos puede representar una alternativa viable y sostenible para la estabilización de suelos arcillosos [7].

Este proyecto propone investigar el uso de ceniza de cáscara de arroz y cal para estabilizar suelos arcillosos de baja plasticidad, mejorando sus propiedades mecánicas e hidráulicas. Las pruebas incluirán los límites de Atterberg, clasificación del suelo, compresión no confinada y permeabilidad para caracterizar el suelo y evaluar los efectos de estos aditivos. La investigación busca proporcionar una solución sostenible y accesible para optimizar suelos en infraestructuras, especialmente en áreas rurales donde se podrían utilizar estos materiales alternativos.

La principal contribución de esta investigación radica en demostrar el uso de ceniza de cáscara de arroz y cal como estabilizadores en suelos arcillosos de baja plasticidad, evaluando su impacto en las propiedades mecánicas e hidráulicas de dichos suelos. Además, se busca identificar los porcentajes óptimos de mezcla para determinar una alternativa eficaz para estabilizar estos suelos utilizando estos materiales. Los resultados presentados corresponden a la estabilización del suelo arcilloso de baja plasticidad tras un periodo de curado de 5 días.

A largo plazo, este método representa una mejora significativa en las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo, lo que incrementa la durabilidad y resistencia de las construcciones frente a las condiciones climáticas y geológicas locales. Además, el proyecto fomenta el aprovechamiento de subproductos locales, como la ceniza proveniente de residuos agrícolas, alineándose con los principios de economía circular y la reducción de costos. Al proporcionar una solución viable para proyectos de infraestructura en áreas rurales, esta investigación no solo contribuye al desarrollo local, sino también a la conservación del medio ambiente.

II. MATERIALES

A. Suelo Arcilloso de Baja Plasticidad (SUCS: CL)

Las muestras de suelo se obtuvieron en el distrito de Monsefú, provincia de Chiclayo, departamento de Lambayeque en Perú. Mediante una excavación con una profundidad de 1.50 m se obtuvieron aproximadamente 80 Kg de material, hasta tal profundidad no se presentó nivel freático. El suelo tiene coloración marrón clara y no se observó presencia de gravas u otras partículas de mayor tamaño. Se utilizaron muestras intactas en las pruebas de laboratorio por lo que posterior a la extracción del material se procedió a almacenarlo en bolsas herméticas. La tabla I proporciona el resumen de las propiedades físicas del suelo

TABLA I
PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO NATURAL

Contenido de humedad natural (%)	Peso específico relativo	Límite líquido (%)	Límite plástico (%)	Índice de plasticidad
21.875	2.705	45.90	20.39	25.51

B. Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA)

La ceniza de cáscara de arroz se obtuvo de un molino de arroz ubicado en Chiclayo. En este molino, después de separar la cáscara de arroz durante el proceso de molienda, esta se acumula como un subproducto. Posterior al proceso de acumulación dejan secar la cáscara de arroz para disminuir su contenido de humedad para finalmente quemarla en hornos mediante quema controlada.

La CCA está compuesta principalmente por sílice, con un contenido aproximado del 71% en peso, el cual puede variar según las condiciones de combustión y el método de producción. La sílice está presente en formas amorfa y cristalina, siendo la forma amorfa predominante a temperaturas de combustión más bajas, como 600°C. La temperatura de combustión afecta significativamente la composición y propiedades de la CCA. A temperaturas de 600°C, la sílice es principalmente amorfa, lo que beneficia las aplicaciones puzolánicas. [8].

La CCA se utiliza como material cementante suplementario en la producción de morteros y concretos geopoliméricos, mejorando la resistencia a la compresión y la durabilidad frente a ataques químicos. [9].

C. Cal Viva

La adición de cal modifica la composición química del suelo, mejorando su resistencia y reduciendo su plasticidad. Se ha demostrado que la adición de cal en porcentajes que varían entre el 2% y el 15% puede mejorar significativamente la resistencia a la compresión y reducir el aumento del suelo. La cantidad óptima de cal necesaria para estabilizar un suelo depende de varios factores, incluyendo la mineralogía del suelo y su contenido de humedad. Estudios han demostrado que un contenido de cal del 5% es efectivo para estabilizar suelos con alto contenido de arcilla [10] [11] [12].

D. Mezclas

En la tabla II se muestran las proporciones de mezclas ensayadas para la investigación partiendo del peso del suelo arcilloso en su estado natural como referencia para la preparación de las respectivas mezclas.

TABLA II
PROPORCIONES DE MEZCLAS UTILIZADAS

Mezcla N°	Arcilla (CL)	Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA)	Cal
1	100%	0%	0%
2	90%	10%	0%
3	85%	15%	0%
4	85%	10%	5%
5	80%	15%	5%

III. METODOLOGÍA

Se evaluaron las propiedades físicas, mecánicas e hidráulicas del suelo arcilloso con los ensayos de Análisis granulométrico por tamizado ASTM D422 [13], Límites de Atterberg ASTM D4318 [14], Contenido de humedad ASTM D2216 [15], Gravedad específica de los sólidos ASTM D854 [16], Compactación tipo Proctor Estándar ASTM D698 [17], Resistencia a la compresión no confinada ASTM D2166 [18] y Permeabilidad a carga variable ASTM D5084-90 [19].

Las mezclas fueron evaluadas con los ensayos de Compactación tipo Proctor Estándar ASTM D698 [17], Resistencia a la compresión no confinada ASTM D2166 [18] y Permeabilidad a carga variable ASTM D5084-90 [19].

Para garantizar que los especímenes de Resistencia a la Compresión no Confinada [18] alcancen el óptimo contenido de humedad y máxima densidad seca obtenida en el ensayo de Compactación Proctor estándar [17] se determinó la humedad de la arcilla natural previo a la mezcla y posterior a la fabricación de los especímenes de ensayo estos fueron almacenados en bolsas herméticas las que finalmente se ubicaron en un ambiente seco a temperatura promedio de 21°C. Finalmente, para garantizar el óptimo contenido de humedad y la máxima densidad seca se analizó una porción del espécimen posterior a la realización del ensayo de Compresión No Confinada [18].

Las dimensiones de los especímenes para Compresión No Confinada fueron de 3" de diámetro por 6" de alto. Para la elaboración de los especímenes de la prueba se utilizó un molde cilíndrico bipartido de PVC el cual fue introducido en el molde cilíndrico de 4" del ensayo de Compactación tipo Proctor Estándar [17] y para garantizar la rigidez e integridad de la forma cilíndrica, con arena de grano fino se rellenó el vacío generado por la diferencia de dimensiones entre los moldes cilíndricos.

El tiempo de cura que se le proporcionó a los especímenes para la realización de los ensayos Resistencia a la Compresión No confinada [18] y Permeabilidad a carga variable [19] fue de 120 horas. El equipo que se utilizó para el ensayo de Resistencia a la Compresión No Confinada [18] se trata del Equipo

universal de compresión y tracción INSTRON 3382 y la velocidad utilizada fue de 3 mm/min.

IV. RESULTADOS

Después de realizar los diversos ensayos, los resultados fueron los siguientes: para el ensayo Análisis Granulométrico por Tamizado [13] se obtuvo que hasta el Tamiz N° 4 no se obtuvo ningún porcentaje de material retenido, para los tamices N (60° – 140° – 200°), los resultados de % de material pasante fueron de 92.781%, 67.500% y 61.594 % respectivamente. Para el ensayo Límites de Atterberg [14] se tuvieron tres muestras referenciales de 34, 29 y 18 golpes en el ensayo donde los resultados de contenido de humedad fueron de 42.15 %, 42.75 % y 49.78 % respectivamente, al final se obtuvo que el límite líquido es de 45.90%. Así mismo en este ensayo se determinó que el límite plástico es de 20.39% por lo que el índice de plasticidad del suelo es de 25.51. Para el ensayo Contenido de Humedad [15] se trabajó con el suelo natural y el porcentaje de humedad en su estado natural fue de 21.875%. Mediante el ensayo Gravedad Específica de los Sólidos [16] se determinó que el valor promedio de la gravedad específica relativa de los sólidos obtenidos es de 2.705 y la gravedad específica de la ceniza de cáscara de arroz es 2.202.

A. Compactación tipo Proctor Estándar

Para la muestra de solo suelo natural, se tuvo un 24.480 % de óptimo contenido de humedad (OCH) y 1.554 g/cm³ de máxima densidad seca (MDS). Mientras que para la mezcla de 90% de suelo natural y 10 % de ceniza de cáscara de arroz el óptimo contenido de humedad aumentó a 28.700 % y la máxima densidad seca disminuyó a 1.416 g/cm³. Al adicionar más cantidad de CCA para la mezcla de 85 % de suelo natural y 15% de ceniza de cáscara de arroz, el OCH aumentó a 31.100% mientras que la MDS disminuyó a 1.377 g/cm³.

Cuando se adicionó cal para la muestra con 85% de suelo natural, 10% de ceniza de cáscara de arroz y 5% de cal el OCH aumento con respecto al suelo natural y por el contrario la máxima densidad seca disminuyó, los resultados fueron 25.800 % de OCH y 1.426 de MDS. Por último, se observó que al agregar más cantidad de CCA y manteniendo el mismo porcentaje de cal para la mezcla de 80% de suelo natural, 15% de ceniza de cáscara de arroz y 5% de cal se obtuvo un aumento a 26.500 % de OCH y disminución a 1.367 de MDS.

La Tabla III muestra el resumen de los resultados obtenidos en el ensayo Proctor Estándar.

TABLA III
RESULTADOS ENSAYO PROCTOR ESTANDAR

N°	Mezcla	Óptimo contenido de humedad (%)	Máxima densidad seca (g/cm ³)
1	100% CL	24.480	1.554
2	90% CL 10% CCA	28.700	1.416
3	85% CL 15% CCA	31.100	1.377
4	85% CL 10% CCA 5% CAL	25.800	1.426
5	80% CL 15% CCA 5% CAL	26.500	1.367

En la Fig. 1 se observa la variación en la máxima densidad seca de las mezclas. La mayor MDS se obtuvo en el suelo natural mientras que las otras mezclas presentaron pequeñas variaciones.

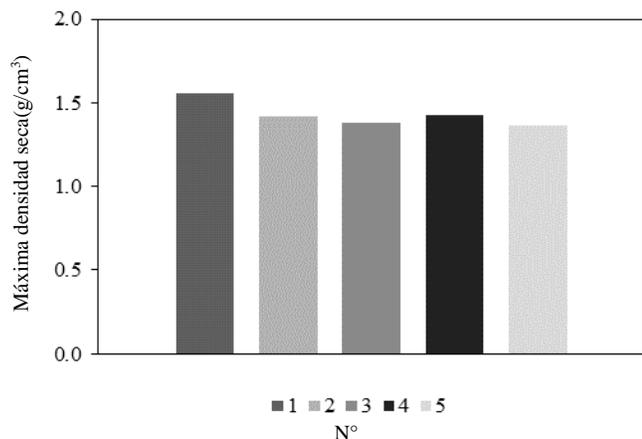


Fig. 1 Variación de la máxima densidad seca en las mezclas

B. Resistencia a la Compresión No Confinada

Para la muestra con solo suelo natural se obtuvo una resistencia máxima a la compresión ($Q_{u_{max}}$) de 1.155 kg/cm². Para la mezcla de 90% de suelo natural y 10 % de ceniza de cáscara de arroz se obtuvo un aumento a 1.282 kg/cm² de $Q_{u_{max}}$ con respecto a la mezcla de suelo natural. Mientras que al agregar más cantidad de CCA en la mezcla de 85 % de suelo natural y 15% de ceniza de cáscara de arroz se presentó una ligera disminución a 1.250 kg/cm² de $Q_{u_{max}}$.

Cuando se incorporó cal para la muestra con 85% de suelo natural, 10% de ceniza de cáscara de arroz y 5% de cal los resultados fueron 1.474 $Q_{u_{max}}$ siendo este el mayor valor obtenido con respecto a todas las mezclas y por último para la mezcla de 80% de suelo natural, 15% de ceniza de cáscara de arroz y 5% de cal se obtuvo 1.360 kg/cm² de $Q_{u_{max}}$.

La Tabla IV muestra el resumen de los resultados obtenidos en el ensayo de compresión no confinada para las 5 mezclas evaluadas.

TABLA IV
RESULTADOS ENSAYO COMPRESIÓN NO CONFINADA

N°	Mezcla	$Q_{u_{max}}$ kg/cm ²	So kg/cm ²
1	100% CL	1.155	0.578
2	90% CL 10% CCA	1.282	0.641
3	85% CL 15% CCA	1.250	0.625
4	85% CL 10% CCA 5% CAL	1.474	0.737
5	80% CL 15% CCA 5% CAL	1.360	0.680

En la Fig. 2 se observa la variación en la resistencia máxima a la compresión de las mezclas. El mayor valor se obtuvo con la mezcla N°4 con un valor de 1.474 kg/cm².

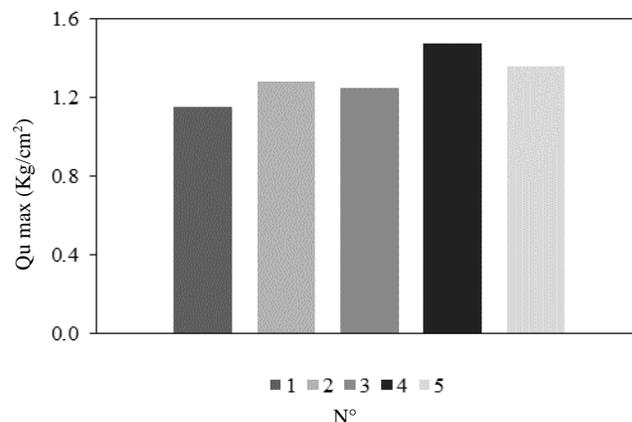


Fig.2 Variación de resistencia máxima a la compresión no confinada de las mezclas

El módulo de elasticidad del suelo natural es de 7.249 kg/cm² mientras que este valor aumento a 13.513 kg/cm² al incluir CCA en la mezcla de 90% CL y 10% CCA. El módulo de elasticidad disminuyo en la mezcla de 85% CL y 15% CCA a 12.598 kg/cm².

Al agregar cal en la mezcla 85% de arcilla de baja plasticidad combinada con 10% de ceniza de cáscara de arroz y 5% de cal se obtuvo el mayor valor del módulo de elasticidad con un valor de 18.268 kg/cm². Finalmente, la mezcla de 80% de CL con 15% de CCA y 5% de cal tiene como módulo de elasticidad 13.142 kg/cm² el cual refleja una disminución en el valor con respecto a la mezcla N°2 y N°4.

La Tabla V muestra el resumen de los módulos de elasticidad obtenidos para las diferentes mezclas por medio del ensayo de compresión no confinada.

TABLA V
MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE LAS MEZCLAS

N°	Mezcla	E kg/cm ²
1	100% CL	7.249
2	90% CL 10% CCA	13.513
3	85% CL 15% CCA	12.598
4	85% CL 10% CCA 5% CAL	18.268
5	80% CL 15% CCA 5% CAL	13.142

En la Fig. 3 se observa la variación en el módulo de elasticidad de las mezclas. El mayor valor se obtuvo con la mezcla de 85% de arcilla de baja plasticidad combinado con 10% de ceniza de cáscara de arroz y 5% de cal con un valor de 18.268 kg/cm²

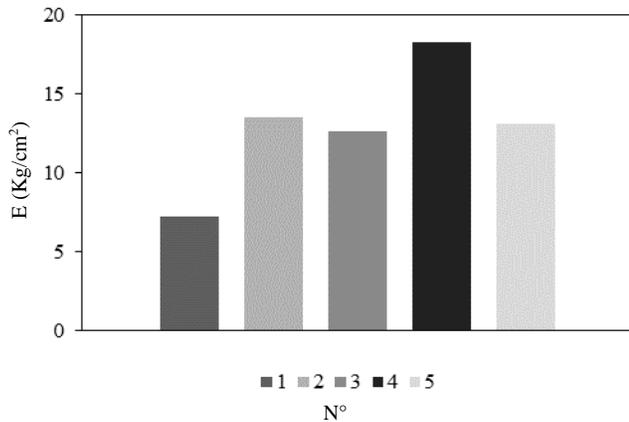


Fig. 3 Variación del módulo de elasticidad de las mezclas

C. Permeabilidad a carga variable

El coeficiente de permeabilidad k a 21°C en el suelo natural (100% CL) es de $9.82 \text{ E-}07$ (cm/s) mientras que en la mezcla de 85% de CL con 10% de CCA y 5% de cal el valor disminuyó a $4.25 \text{ E-}07$ (cm/s).

TABLA VI
RESULTADOS ENSAYO DE PERMEABILIDAD A CARGA VARIABLE

N°	Mezcla	Coefficiente de permeabilidad k a 21°C (cm/s)
1	100% CL	$9.82 \text{ E-}07$
2	85% CL 10% CCA 5% CAL	$4.25 \text{ E-}07$

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el ensayo de compactación tipo estándar, cada mezcla de suelo natural y aditivos mostró un comportamiento particular en términos de óptimo contenido de humedad (OCH) y máxima densidad seca (MDS). Para el suelo natural puro, se obtuvo un OCH de 24.480% y una MDS de 1.554 g/cm^3 . Al incorporar 10% de ceniza de cáscara de arroz en una mezcla con 90% de suelo natural, el OCH aumentó a 28.700% y la MDS disminuyó a 1.416 g/cm^3 , evidenciando que la ceniza de cáscara de arroz reduce la densidad compactada del suelo, aunque contribuye a una mayor retención de humedad. Con una mezcla de 85% suelo natural y 15% ceniza de cáscara de arroz, se observó un mayor OCH de 31.100% y una MDS menor de 1.377 g/cm^3 ; esta proporción de ceniza aumentó aún más la capacidad de absorción de agua y disminuyó la densidad, sugiriendo una compactación menos eficiente debido a la naturaleza porosa de la ceniza.

Este comportamiento puede explicarse por la naturaleza porosa y ligera de la CCA, la cual tiende a absorber agua y reducir la densidad del material compactado. Estudios previos han reportado resultados similares, donde la incorporación de ceniza de cáscara de arroz en suelos arcillosos incrementa la demanda de agua para la compactación debido a su alta capacidad de absorción y baja densidad [20].

La adición de 5% de cal a una mezcla de 85% de suelo natural y 10% de ceniza de cáscara de arroz resultó en un OCH de 25.800% y una MDS de 1.426 g/cm^3 , donde la cal ayudó a reducir la humedad óptima y aumentó ligeramente la densidad, mejorando la compactación al estabilizar el suelo. Finalmente, la combinación de 80% de suelo natural, 15% de ceniza de cáscara de arroz y 5% de cal mostró un OCH de 26.500% y una MDS de 1.367 g/cm^3 , en la que la cal aportó estabilidad al suelo, aunque la mayor cantidad de ceniza continuó reduciendo la densidad compactada. Esto sugiere que la cal contribuye a una reacción de floculación y aglomeración en las partículas de arcilla, reduciendo la cantidad de agua necesaria para la compactación. Además, la densidad seca máxima se incrementa levemente en comparación con las mezclas solo con CCA.

Varios estudios han demostrado que la cal mejora la compactabilidad del suelo al reducir su plasticidad y promover la formación de estructuras más estables mediante reacciones puzolánicas a largo plazo [21]. Este efecto es particularmente notable cuando la cal se combina con materiales de carácter silíceo o aluminiceo, como la CCA, ya que estas reacciones producen compuestos cementantes que mejoran la densidad y estabilidad del suelo.

Los resultados del ensayo de compresión no confinada (UCS) muestran cómo los aditivos afectan la resistencia del suelo natural y permiten explicar el comportamiento de cada mezcla en términos de sus propiedades químicas y físicas. Para el suelo natural puro, se obtuvo una resistencia máxima de 1.155 kg/cm^2 , una base inicial sin aditivos en la que no se observa estabilización adicional. Al añadir un 10% de ceniza de cáscara de arroz, la resistencia aumentó a 1.282 kg/cm^2 , lo que se explica porque la ceniza de cáscara de arroz, rica en sílice, reacciona con la humedad del suelo, mejorando su estructura interna y aumentando la cohesión, aunque a niveles moderados. Con un 15% de ceniza de cáscara de arroz, la resistencia es de 1.250 kg/cm^2 , levemente inferior al 10% de ceniza, ya que un mayor contenido de ceniza incrementa la porosidad, lo que puede disminuir la resistencia si el contenido de aditivo supera el nivel óptimo.

La adición del 5% de cal a la mezcla compuesta por 85% de suelo natural y 10% de ceniza de cáscara de arroz produjo la mayor resistencia registrada, alcanzando los 1.474 kg/cm^2 , lo que representa un incremento del 27.6% en la resistencia máxima a la compresión en comparación con el suelo natural. Este incremento se debe a que la cal funciona como un estabilizante potente, provocando la floculación de las partículas finas del suelo y aumentando la cohesión entre las partículas de arcilla, lo que solidifica y refuerza la mezcla. Además, la combinación de ceniza de cáscara de arroz y cal no solo densifica la estructura, sino que también optimiza la capacidad de carga.

En la última mezcla, compuesta por un 80% de suelo natural, 15% de ceniza de cáscara de arroz y 5% de cal, la resistencia alcanzó 1.360 kg/cm^2 , una disminución leve en comparación con la mezcla anterior. Este cambio sugiere que el aumento de la ceniza de cáscara de arroz a 15% genera una

porosidad adicional que limita la cohesión y disminuye ligeramente la resistencia.

La adición de cal promueve reacciones de floculación y aglomeración en las partículas de arcilla, formando compuestos cementantes que mejoran la resistencia del suelo. La combinación de CCA y cal potencia estas reacciones, resultando en mezclas con mayores resistencias. Investigaciones han demostrado que la sinergia entre la CCA y la cal puede mejorar significativamente las propiedades mecánicas de suelos arcillosos [22].

La incorporación de ceniza de cáscara de arroz (CCA) y cal en suelos arcillosos de baja plasticidad mostró un notable incremento en el módulo de elasticidad respecto al suelo natural, que presentó un valor de 7.249 kg/cm². La mezcla con 10% de CCA duplicó prácticamente esta rigidez, alcanzando los 13.513 kg/cm², gracias a la presencia de sílice reactiva que mejora la estructura interna del suelo. Sin embargo, al aumentar la CCA a 15%, el módulo se redujo ligeramente a 12.598 kg/cm², lo que sugiere que un exceso de CCA incrementa la porosidad y reduce la eficacia del refuerzo. La adición de 5% de cal a la mezcla con 10% de CCA generó el mayor módulo de elasticidad (18.268 kg/cm²), resultado de las reacciones puzolánicas entre la cal y la CCA, que producen compuestos cementantes y aumentan la rigidez del suelo. No obstante, una mayor proporción de CCA (15%) en combinación con cal reduce este efecto, evidenciando que existe un contenido óptimo de aditivos para maximizar la mejora mecánica del suelo.

En cuanto a los ensayos de permeabilidad, se observó que la arcilla de baja plasticidad sin aditivos presenta un coeficiente de permeabilidad de 9,82 E-07 cm/s. Al agregar 10% de CCA y 5% de cal, este valor disminuye a 4.25 E-07 cm/s, lo que representa una reducción de aproximadamente el 57% en el coeficiente de permeabilidad del suelo.

Esta disminución en la permeabilidad puede atribuirse a las reacciones químicas que ocurren entre la cal y los componentes de la arcilla, así como a la interacción con la CCA. La cal induce procesos de floculación y aglomeración de las partículas arcillosas, lo que reduce el tamaño de los poros y, por ende, la capacidad del suelo para transmitir agua. Además, la CCA, al actuar como material puzolánico, contribuye a la formación de compuestos cementantes que densifican la estructura del suelo, disminuyendo aún más su permeabilidad.

En un estudio sobre la estabilización de suelos arcillosos con CCA y cal, se observó que la permeabilidad disminuyó en un 50-70% debido a la formación de compuestos cementantes y la reducción de la porosidad [23]. Otro estudio encontró que la adición de cal a suelos arcillosos redujo la permeabilidad en un orden de magnitud, atribuyendo este efecto a la floculación de partículas y la formación de estructuras más densas [24].

VI. CONCLUSIONES

- En conjunto, los resultados muestran que la ceniza de cáscara de arroz, al ser un material de baja densidad y alta porosidad, aumenta la humedad óptima y reduce la densidad. Por otro lado, la cal ayuda a estabilizar la

mezcla y mejora su capacidad de compactación, haciendo de cada combinación una opción de ingeniería distinta según las necesidades del proyecto. Los resultados indican que la combinación de CCA y cal puede ser efectiva en la estabilización de suelos arcillosos de baja plasticidad.

- Los resultados del ensayo de compresión no confinada (UCS) muestran cómo los aditivos afectan la resistencia del suelo natural y permiten explicar el comportamiento de cada mezcla en términos de sus propiedades químicas y físicas. Para el suelo natural puro, se obtuvo una resistencia máxima de 1.155 kg/cm², una base inicial sin aditivos en la que no se observa estabilización adicional. Al añadir un 10% de ceniza de cáscara de arroz, la resistencia aumentó a 1.282 kg/cm², lo que se explica porque la ceniza de cáscara de arroz, rica en sílice, reacciona con la humedad del suelo, mejorando su estructura interna y aumentando la cohesión, aunque a niveles moderados. Con un 15% de ceniza de cáscara de arroz, la resistencia es de 1.250 kg/cm², levemente inferior al 10% de ceniza, ya que un mayor contenido de ceniza incrementa la porosidad, lo que puede disminuir la resistencia si el contenido de aditivo supera el nivel óptimo.
- La adición de 5% de cal a la mezcla de 85% de suelo natural y 10% de ceniza de cáscara de arroz resultó en la máxima resistencia observada, de 1.474 kg/cm². Este incremento se debe a que la cal funciona como un estabilizante potente, provocando la floculación de las partículas finas del suelo y aumentando la cohesión entre las partículas de arcilla, lo que solidifica y refuerza la mezcla. En la última mezcla, compuesta por un 80% de suelo natural, 15% de ceniza de cáscara de arroz y 5% de cal, la resistencia alcanzó 1.360 kg/cm², una disminución leve en comparación con la mezcla anterior. Este cambio sugiere que el aumento de la ceniza de cáscara de arroz a 15% genera una menor densidad que limita la cohesión y disminuye ligeramente la resistencia.
- Con respecto a los resultados del ensayo de permeabilidad a carga variable, estos indican que, en el caso de la arcilla pura, el coeficiente de permeabilidad es de 9.82 E-07 cm/s, lo cual característico de un material de textura fina y con alta retención de agua debido a su baja porosidad conectada al tratarse de una arcilla de baja plasticidad. Sin embargo, al incorporar ceniza de cáscara de arroz al 10% y cal al 5% en peso, el coeficiente disminuye significativamente a 4.25 E-07 cm/s, lo que indica una notable reducción en la capacidad del agua para fluir a través del suelo.
- Se concluye que la mezcla compuesta por 85% de suelo tipo CL, 10% de ceniza de cáscara de arroz y 5% de cal, en proporción en peso, presenta una reducción del 57% en el coeficiente de permeabilidad

en comparación con el suelo natural. Esta disminución indica que el suelo permite un menor paso de agua, lo cual resulta favorable en aplicaciones que requieren evitar la infiltración, como en presas de tierra o capas impermeables para pavimentos.

- La reducción en la permeabilidad del suelo estabilizado tiene implicaciones prácticas significativas en proyectos de ingeniería civil. Un menor coeficiente de permeabilidad indica una mayor resistencia al flujo de agua a través del suelo, lo que es beneficioso para aplicaciones donde se requiere minimizar la infiltración, como en la construcción de cimientos, presas de tierra y revestimientos de canales.
- Es fundamental equilibrar la reducción de la permeabilidad con otras propiedades mecánicas del suelo, como la resistencia a la compresión y al corte. La adición de CCA y cal no solo puede reducir la permeabilidad del suelo hasta en un 57 %, sino que también contribuye a un incremento del 27.6 % en la resistencia máxima a la compresión, además de mejorar la resistencia al corte, como se ha evidenciado en los resultados de los ensayos de compresión no confinada. Cabe destacar la importancia del tiempo de curado —en este caso, de cinco días— para que las reacciones puzolánicas se desarrollen adecuadamente y alcancen su máximo efecto estabilizador

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Erick Arias: Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi madre, Elda Meléndez; a mi padre, Ernesto; a mis hermanos, Nicole, Derek e Irving; a mi profesor asesor, y a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, por su invaluable apoyo económico, emocional y sabiduría, los cuales me han permitido afrontar este gran reto

Sebastian Saldaña: Este trabajo está dedicado a mi familia, que siempre creyó en mí, y a mi querida novia I. Hernández, por su confianza incondicional en mí y en mis capacidades.

REFERENCIAS

[1] E. Pousada., Deformabilidad de las arcillas expansivas bajo succión controlada [Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]. <https://doi.org/10.20868/UPM.thesis.508>

[2] Terzaghi, K., Peck, R. B. y Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. (3a ed.). New York: Jhon Wiley & Sons.

[3] Ma, J., Su, Y., Liu, Y., & Tao, X. (2020). Strength and Microfabric of Expansive Soil Improved with Rice Husk Ash and Lime. *Advances in Civil Engineering*, 2020-9646205. <https://doi.org/10.1155/2020/9646205>

[4] Muthu Lakshmi, S., Geetha S., Selvakumar, M., & Divya Susanna, K. (2021). Strength enhancement of Clayey Sand subgrade using lime and rice husk ash. *Materials Today: Proceedings*, 46(17), 7430-7435. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.039>

[5] Pushpakumara, B. H. J., & Mendis, W. S. (2022). Suitability of Rice Husk Ash (RHA) with lime as a soil stabilizer in geotechnical applications. *International Journal of Geo-Engineering*, 4, 4. <https://doi.org/10.1186/s40703-021-00169-w>

[6] Saidate, I., Berga, A. E. y Rikioui, T. (2022). Stabilization of Gypsum Clay Soil by Adding Lime. *Civil Engineering Journal*, 8(11). 10.28991/CEJ-2022-08-11- 010

[7] Behak, L. (2017). *Estabilización de suelos con cenizas*. Facultad de Ingeniería, Universidad de la República Uruguay. Recuperado de [doi:10.5772/66311](https://doi.org/10.5772/66311)

[8] I. J. Fernandes et al., "Characterization of rice husk ash produced using different biomass combustion techniques for energy," *Fuel*, vol. 165, pp. 351-359, 2016. doi: 10.1016/j.fuel.2015.10.086.

[9] G. Ogwang et al., "Experimental evaluation of rice husk ash for applications in geopolymer mortars," *Journal of Bioresources and Bioproducts*, vol. 6, no. 2, pp. 160-167, 2021. doi: 10.1016/j.jobab.2021.02.008

[10] I. Saidate, A. E. Berga, and T. Rikioui, "Stabilization of Gypsum Clay Soil by Adding Lime," *Civil Engineering Journal*, vol. 8, no. 11, pp. 2511-2520, 2022. doi: 10.28991/CEJ-2022-08-11-010

[11] M. Arun Kumar, P. Kulanthaivel, S. Selvapraveen, S. Vinodkumar and V. Naveenraj, "Strength Behavior of Clay Soil Stabilized With Lime," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 961, no. 1, p. 012003, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/961/1/012003

[12] C. Cherian and D. N. Arnepalli, "A critical appraisal of the role of clay mineralogy in lime stabilization," *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, vol. 1, no. 8, pp. 1-20, 2015. doi: 10.1007/s40891-015-0009-3

[13] ASTM D422-63(2007), *Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2007

[14] ASTM D4318-17, *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017

[15] ASTM D2216-19, *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019

[16] ASTM D854-14, *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014

[17] ASTM D698-12, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

[18] ASTM D2166/D2166M-16, *Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

[19] ASTM D5084-16a, *Standard Test Methods for Measurement of Hydraulic Conductivity of Saturated Porous Materials Using a Flexible Wall Permeameter*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.

[20] S. A. Naeini and S. M. Sadjadi, "Effect of waste polymer materials on shear strength of unsaturated clays," *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, vol. 13, no. 1, pp. 1-12, 2008

[21] R. S. Sharma, B. R. Phanikumar, and B. V. Rao, "Engineering behavior of a remolded expansive clay blended with lime, calcium chloride, and rice husk ash," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 20, no. 8, pp. 509-515, 2008.

[22] A. Basha, R. Hashim, H. Mahmud, "Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement," *Construction and Building Materials*, vol. 19, no. 6, pp. 448-453, 2005.

[23] A. Moale Quispe, "Estabilización química de suelos arcillosos con cal para su uso en subrasantes de pavimentos flexibles," *Repositorio Académico UPC*, 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/648846/MoaleQ_A.pdf

[24] J. Piedra, J. Vásquez, y G. Arriola, "Evaluación de la estabilización de un suelo expansivo utilizando ceniza de cáscara de arroz, distrito de Jaén, Cajamarca, Perú," *Revista INGENIERÍA: Ciencia, Tecnología e Innovación*, vol. 8, no. 2, pp. 125-134, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/356400845>.