

Evaluación de la cascarilla de arroz caolinizada como alternativa para el mejoramiento de materiales de rellenos o capas de rodamiento sin tratamiento superficial

Sara Lucia Guayan y Stephanie Julieth González Oñate

Trabajo de grado para optar el título de Ingeniero Civil

Director

German Hernando Acevedo Calderón

Magíster en Ingeniería Estructural y Arquitectura

Universidad Santo Tomás, Bucaramanga

División de Ingenierías y Arquitectura

Facultad de Ingeniería

2023

Dedicatoria

Querida yo de hace unos años,

Si hoy te dijera que somos ingeniera civil, sé que te costaría creerlo. Recuerdo cómo te fascinaba jugar con Legos y construir todo tipo de estructuras imaginarias. Ahora, juntas, estamos haciendo realidad todo aquello que dibujábamos y soñábamos. Quiero agradecerte, mi pequeña y creativa versión pasada, por tu espíritu incansable, por nunca dejar de imaginar y por creer en la magia de convertir ideas en realidad. Gracias por ayudarme a perseguir mis sueños y por recordarme la importancia de mantener vivo ese niño interior que sigue emocionado ante cada logro.

En este gran triunfo, como lo este proyecto el cual marca el final de mi carrera, quiero dedicárselo a las personas que han sido fundamentales en este recorrido. A ti, mamá Claudia, mi apoyo incondicional, mi roca en momentos de duda y mi mayor admiradora, gracias por creer en mí y en mis capacidades. A mis abuelos Oralia y Achedo, quienes desde el comienzo me inculcaron la importancia del esfuerzo y la dedicación, su legado y sabiduría han sido pilares en mi formación. A ti, tío Oscar, por ser un modelo de perseverancia y constancia. Tus consejos y tu apoyo han sido un faro que me ha guiado hacia el éxito. A mi abuelita María, aunque físicamente no esté presente, sé que su amor y cuidado me han acompañado desde el cielo. A Wiltman y Alejo, gracias por creer en mis sueños y por estar a mi lado en cada paso del camino.

Este logro, también es tuyo, pequeña yo. Eres la semilla que plantaste en mi corazón, la que me recordó que no hay límites para la imaginación y que podemos convertir nuestros sueños en realidad.

Sara Lucia Guayan

Dedicatoria

El sentido de mi ser va en la naturaleza de mis sentimientos puros y sensibles, en mi espíritu protector de mi existencia y en mi origen y compañía, mi familia. Hoy llena de euforia resalto todo el crecimiento personal y profesional que he tenido con este logro y exalto el gran apoyo de mis padres, Adolfo David Gonzáles Mendoza y Leila Cecilia Oñate Daza quienes desde mi nacimiento han optado por cuidarme, apoyar mis sueños y aspiraciones, y sobre todo dejarme volar y descubrir mis propios mundos. Hoy sé que están orgullosos de sus hijos, Juan David Gonzáles Oñate y Stephanie Julieth Gonzáles Oñate.

Familia Gonzáles Mendoza y Oñate Daza, hoy estoy a poco de cumplir mi meta de ser profesional, comparto mi alegría y satisfacción con ustedes gracias por el sentimiento que desde la distancia siempre ha estado y me motiva a ser cada día mejor. Mis abuelos y líderes de mi familia desde el cielo celebran todo lo que hemos logrado. Con todo el cariño de mi corazón hoy dedico a ustedes, mi familia, mi nuevo logro, solo gratitud.

Stephanie Julieth Gonzáles Oñate

Agradecimientos

Queremos agradecerle a Dios y la Virgen por ser nuestra guía constante a lo largo de este proceso. A nuestras familias expresarles nuestra gratitud por su apoyo inquebrantable, sin su amor y respaldo, esta meta no habría sido posible. A nuestros profesores por su dedicación y compromiso, en especial a nuestro director de proyecto, quien creyó en nuestra idea y nos alentó a dar lo mejor de nosotras mismas. También queremos reconocer y agradecer al personal de la universidad y al laboratorista que han estado a nuestro lado en cada paso del camino.

Por eso hoy con una mezcla de emociones, gratitud y alivio, expresamos nuestros más profundos agradecimientos, por el apoyo incondicional y la ayuda que nos brindaron en el proceso de finalización de nuestra carrera y nuestro proyecto de grado. Este ha sido un camino lleno de desafíos, pero gracias a su compañía, fe y dedicación, hemos logrado culminar esta etapa tan significativa en nuestras vidas académicas.

Contenido

Introducción.....	18
1. Evaluación de la cascarilla de arroz caolinizada como alternativa para el mejoramiento de materiales de relleno o capas de rodamiento sin tratamiento superficial.....	20
1.1 Planteamiento del problema.....	20
1.2 Justificación.....	21
1.3 Objetivos	22
1.3.1 Objetivo general.....	22
1.3.2 Objetivos específicos.....	22
2. Marco referencial.....	23
2.1 Antecedentes	23
2.2 Marco teórico	26
2.2.1 Preparación de terrenos	27
2.2.2 Estabilización de suelos.....	27
2.2.3 Suelos granulares	27
2.2.4 Suelos finos.....	28
2.2.5 Tipo de estabilización.....	30
2.2.6 Cascarilla de arroz.....	31
2.2.7 Propiedades de la cascarilla de arroz.....	31
2.2.8 Propiedades de la cascarilla de arroz.....	32
2.2 Marco conceptual.....	33
2.3.1 Cascarilla de Arroz Caolinizada.....	33
2.3.2 Aplicaciones industriales de la cascarilla de arroz caolinizada.	35

2.3.3 Ventajas y desafíos en el uso de la cascarilla de arroz caolinizada.....	37
2.3.4 Consideraciones de salud y seguridad.....	38
3. Proceso y análisis.....	39
3.1 Metodología de análisis	39
3.1.1 Preparación de muestra.....	39
3.1.2 Caolinización de la cascarilla.....	40
3.1.3 Mezcla de materiales	42
3.1.4 Mineralogía de la cascarilla de arroz caolinizada	43
3.1.5 Caracterización mecánica de suelos	44
3.1.6 Comparación de las propiedades mecánicas de suelos	47
3.2 Análisis y discusión	49
3.2.1 Mineralogía de la cascarilla de arroz caolinizada (CC).....	49
3.2.2 Rayos X – Ensayo FRX-02.....	49
3.2.3 Rayos X – Ensayo DRX-03.....	52
3.3 Caracterización de suelos	54
3.3.1 Granulometría	54
3.3.2 Límite líquido.....	55
3.3.3 Límite plástico.....	55
3.3.4 Clasificación sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)	56
3.3.5 Gravedad específica	58
3.4 Comparación de suelos naturales y mezclados	60
3.4.1 Proctor	60
3.4.2 Proctor arena arcillosa (SC).....	65

3.4.3 Suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada (CBR).....	67
3.4.4 CBR Arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL)	68
3.4.5 CBR Arena arcillosa (SC)	70
3.4.6 Compresión encofinada	72
3.4.7 Correlación de los datos	77
4. Conclusiones	86
Referencias	88

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Materiales</i>	39
Tabla 2. <i>Fusión de suelos</i>	42
Tabla 3. <i>Resultados FRX de CC</i>	49
Tabla 4. <i>Compuestos y nombres</i>	50
Tabla 5. <i>Ensayo DRX-03 Fases cristalinas de la CC.</i>	52
Tabla 6. <i>Porcentaje granulométrico del suelo granular (SG)</i>	54
Tabla 7. <i>Porcentaje granulométrico del suelo granular (SG)</i>	54
Tabla 8. <i>Valores típicos de la gravedad específica</i>	58
Tabla 9. <i>Gravedad específica de las partículas suelo SC</i>	59
Tabla 10. <i>Gravedad específica de las partículas suelo CL</i>	59
Tabla 11. <i>Optimización de las propiedades del suelo CI (Proctor)</i>	63
Tabla 12. <i>Optimización del contenido de humedad</i>	66
Tabla 13. <i>CBR al 98% de capacidad (%)</i>	71
Tabla 14. <i>Inconfinada suelo granular</i>	75

Lista de figuras

Figura 1. <i>Clasificación de suelos SUCS</i>	29
Figura 2. <i>Tipo de estabilización</i>	30
Figura 3. <i>Línea térmica</i>	41
Figura 4. <i>Clasificación SUCS suelos granulares</i>	46
Figura 5. <i>Carta de Atterberg</i>	46
Figura 6. <i>Métodos para el ensayo modificado de compactación</i>	48
Figura 7. <i>Métodos para el ensayo modificado de compactación</i>	55
Figura 8. <i>Gráfica de clasificación suelo fino (CL)</i>	58
Figura 9. <i>Proctor suelo fino CL</i>	62
Figura 10. <i>Proctor suelo granular</i>	65
Figura 11. <i>CBR Suelo fino (CL)</i>	68
Figura 12. <i>CBR Suelo granular (SB)</i>	70
Figura 13. <i>Inconfinada suelo fino CL</i>	73
Figura 14. <i>Inconfinada suelo granular</i>	77
Figura 15. <i>Dispersión CBR versus resistencia a compresión inconfinada suelo CL</i>	78
Figura 16. <i>Dispersión CBR versus resistencia a compresión inconfinada suelo areno arcilloso</i>	79
Figura 17. <i>Dispersión CBR versus contenido de humedad</i>	80
Figura 18. <i>Dispersión CBR versus contenido de humedad</i>	81
Figura 19. <i>Dispersión resistencia a compresión inconfinada versus contenido de humedad</i>	82
Figura 20. <i>Dispersión resistencia a compresión inconfinada versus contenido de humedad</i>	83

Lista de apéndices

Apéndice A. <i>prototipo “Mejora de suelos arcillosos de baja plasticidad (CL) con cascarilla de arroz caolinizada.”</i>	93
Apéndice B. <i>cartilla “Evaluación de la cascarilla de arroz caolinizada para el mejoramiento de suelos.”</i>	94

Nota: véase archivos en fuentes externas

Resumen

El presente proyecto busca abordar la reutilización de la cascarilla de arroz (C), un subproducto abundante en la industria arrocera de Colombia, como una solución efectiva para potenciar las propiedades de materiales de relleno y capas de rodamiento, sin la necesidad de recurrir a tratamientos superficiales. El enfoque principal radica en contrarrestar la problemática ambiental derivada de la quema al aire libre de la cascarilla de arroz, a través de la evaluación del impacto de su versión caolinizada (CC) en la mejora de propiedades mecánicas en suelos granulares y finos. Esta evaluación adquiere relevancia dada la diversidad de estos tipos de suelos en Colombia, que presentan desafíos tanto en el tráfico vehicular en capas de rodamiento sin tratamiento superficial como en la construcción de infraestructuras viales.

Con el objetivo de cumplir con este propósito, se pretende caracterizar las propiedades químicas relacionadas con la cascarilla de arroz caolinizada, validando su capacidad aglutinante. Una vez confirmada su viabilidad, se aspira a posicionar la CC como una alternativa amigable con el entorno, lo que contribuirá a reducir la generación de residuos, mejorar la calidad del aire y aprovechar un excedente de subproducto agrícola. Los resultados obtenidos en este análisis proporcionarán la base para implementar concretamente esta técnica, generando un impacto en una gestión más sostenible de los desechos agrícolas en Colombia. En este proceso, se plantea una secuencia lógica de ideas, comenzando por la identificación del problema de contaminación derivado de la quema de cascarilla de arroz, proponiendo como supuesto la utilidad de la cascarilla de arroz caolinizada como alternativa beneficiosa. La metodología implica caracterización química y evaluación de propiedades mecánicas, seguida por la implementación y validación de la técnica. Cabe destacar que la propuesta se enfoca en mejorar materiales de relleno y capas de rodamiento sin necesidad de tratamientos superficiales adicionales. Sin embargo, se debe considerar la

posibilidad de requerir ciertos tratamientos complementarios para optimizar la efectividad de la cascarilla de arroz caolinizada en determinados contextos.

Adicionalmente, se debe resaltar la relevancia de la economía circular en esta iniciativa, ya que la reutilización de un subproducto agrícola abundante no solo aborda problemas ambientales, sino que también contribuye a un enfoque más sostenible y eficiente en la gestión de recursos.

Palabras clave: Cascarilla de arroz, Caolinización, Materiales de relleno, Medio ambiente, Capas de rodamiento, Subrasante.

Abstract

This project seeks to address the reuse of rice husk (RH), an abundant by-product of the rice industry in Colombia, as an effective solution to enhance the properties of filler materials and bearing layers, without the need to resort to surface treatments. The main focus lies in counteracting the environmental problems derived from the open air burning of rice husks, through the evaluation of the impact of its kaolinized version (KC) in the improvement of mechanical properties in granular and fine soils. This evaluation acquires relevance given the diversity of these types of soils in Colombia, which present challenges both in vehicular traffic in bearing layers without surface treatment and in the construction of road infrastructures.

In order to fulfill this purpose, the aim is to characterize the chemical properties related to kaolinized rice husks, validating their binding capacity. Once its viability is confirmed, the aim is to position CC as an environmentally friendly alternative, which will contribute to reduce waste generation, improve air quality and take advantage of a surplus agricultural by-product. The results obtained in this analysis will provide the basis for the concrete implementation of this technique, generating an impact on a more sustainable management of agricultural waste in Colombia. In this process, a logical sequence of ideas is proposed, starting with the identification of the contamination problem derived from rice husk burning, proposing as an assumption the usefulness of kaolinized rice husk as a beneficial alternative. The methodology involves chemical characterization and evaluation of mechanical properties, followed by the implementation and validation of the technique. It should be noted that the proposal focuses on improving filler materials and bearing layers without the need for additional surface treatments. However, the possibility of requiring certain complementary treatments to optimize the effectiveness of kaolinized rice husk in certain contexts should be considered.

Additionally, the relevance of the circular economy in this initiative should be highlighted, as the reuse of an abundant agricultural by-product not only addresses environmental issues, but also contributes to a more sustainable and efficient approach to resource management.

Keywords: Environment, Fill materials, Kaolinization, Rice husk, Road layers, Subgrade.

Glosario

Cal: Es el producto que se obtiene calcinando la piedra caliza por debajo de la temperatura de descomposición del óxido de calcio [1].

Cascarilla de arroz: la cascarilla de arroz es el revestimiento exterior que protege al grano de arroz y se separa durante el proceso de descascarillado. Se compone principalmente de sílice y lignina, y puede variar en grosor y características físicas según la variedad de arroz y el proceso de producción. Es un subproducto abundante en la industria del arroz y su reutilización o valorización ha sido objeto de investigaciones para encontrar aplicaciones beneficiosas en diferentes sectores industriales [2].

Cemento: el cemento es un polvo fino y suave que se utiliza como conglomerante debido a que se endurece después de estar en contacto con el agua. Se produce a partir de una mezcla de caliza y arcilla, calcinadas y posteriormente molidas [1].

Clasificación de suelo S.U.C: El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Unified Soil Classification System (USCS), fue presentado por Arthur Casagrande, usado para describir la textura y el tamaño de las partículas de un suelo. Este sistema de clasificación puede ser aplicado a la mayoría de los materiales sin consolidar y se puede clasificar suelos con tamaños menores de tres (3) pulgadas; se representa mediante un símbolo con dos letras [3].

Compactación: adecuada consolidación de un suelo, capa de áridos u hormigón mediante técnicas mecánicas [1].

Estabilización de suelos: la estabilización del suelo es un término general que designa cualquier método físico, químico, mecánico, biológico o combinado para modificar un suelo natural con el fin de cumplir un objetivo de ingeniería [4].

Gravedad específica: la “gravedad específica” es la densidad de un material en relación con el agua. Dado que las rocas constan de varias fases distintas de mineral, no tienen una gravedad específica fija [5].

Humedad optima: porcentaje de humedad para el cual un suelo sometido a una energía de compactación determinada presenta su máxima densidad (DMCS) [6].

Índice de plasticidad: Diferencia numérica entre el Límite Líquido y el Límite Plástico de un suelo [6].

Rayos X (FRX): el análisis mediante fluorescencia de rayos X (FRX) permite la determinación multielemental simultánea en diversos materiales. Una de las características más destacables de esta técnica es su rapidez, siendo una de las técnicas más potentes en el campo del análisis químico instrumental. Este hecho se basa en la posibilidad de analizar de forma cualitativa y/o cuantitativa diversos tipos de muestras (sólidas, líquidas) sin ocasionar ningún tipo de alteración en las mismas (método no destructivo) [7].

Material de relleno: el material de relleno puede ser cualquier cosa, desde tierra hasta grava, y normalmente se compacta para proporcionar apoyo y estabilidad. El relleno también puede utilizarse para aislar los cimientos o mejorar el drenaje [8].

Mecánica de suelos: estudio detallado y sistemático de las propiedades físicas y la utilización de los suelos, especialmente en relación con la ingeniería de carreteras y de cimentaciones y con el estudio de los problemas asociados a la estabilidad de taludes y laderas [6].

Mineralogía: rama de la geología que estudia las propiedades y características de los minerales y de sus cristales y sus estructuras internas [1].

Plasticidad: propiedad por la cual un material sólido deformado mantiene parte de estas deformaciones en forma permanente, una vez retiradas las acciones que la produjeron [1].

Subrasante: capa fundamental en la estructura de una obra vial encargada de soportar los esfuerzos necesarios para el tráfico [1].

Introducción

La cascarilla de arroz, una capa externa y robusta que recubre el grano de arroz [2], se convierte en un subproducto abundante en la industria arroceras durante el proceso de molienda, representando un componente distintivo de los desechos agrícolas [9]. Su composición principal de sílice brinda oportunidades para transformar su utilidad a través de un proceso de caolinización, el cual modifica sus propiedades físicas y químicas con el propósito de ampliar su aplicabilidad en diversas industrias y en el ámbito de la construcción. El proceso de caolinización induce cambios en su estructura y composición mineral, incluida la disolución parcial de la sílice. Se especula que esta cascarilla de arroz caolinizada podría adquirir cualidades aglutinantes, lo que motiva la exploración de cómo su incorporación afecta positivamente las propiedades mecánicas de suelos granulares y finos. Estos tipos de suelos encuentran aplicaciones frecuentes en la formación de rellenos y capas de rodamiento, sin requerir tratamientos superficiales adicionales.

Es pertinente destacar que, en Colombia, la producción de arroz ejerce un impacto económico significativo, representando cerca del 90% de la economía en aproximadamente 211 municipios [10]. Sin embargo, estos mismos municipios enfrentan la problemática de deshacerse inadecuadamente de grandes volúmenes del subproducto agrícola (C) anualmente [10]. Esta práctica de desecho tiene repercusiones ambientales perjudiciales para el entorno y la salud pública. Las emisiones tóxicas, humo y cenizas provenientes de esta actividad contaminan el aire, el agua y el suelo. Por lo tanto, surge la imperiosa necesidad de reutilizar la cascarilla de arroz caolinizada como una estrategia para mejorar las propiedades mecánicas de suelos granulares y finos. Esta iniciativa no solo aborda el mejoramiento de materiales de construcción, sino que también se alinea con los principios de la economía circular al revalorizar un subproducto agrícola

en desuso, contribuyendo así a la gestión más sostenible de los recursos y reduciendo el impacto ambiental negativo.

1. Evaluación de la cascarilla de arroz caolinizada como alternativa para el mejoramiento de materiales de relleno o capas de rodamiento sin tratamiento superficial

1.1 Planteamiento del problema

En Colombia la producción de arroz representa el 90% de la economía en aproximadamente 211 municipios, convirtiéndose así en uno de los productos con mayor oferta y demanda en el país, ya que al año se siembran entre 392.648 a 394.421 hectáreas en arroz [10]. Dicha producción de arroz genera anualmente grandes cantidades de desechos orgánicos como lo es la cascarilla que cubre el grano de arroz, la cual al no ser utilizada y depositada adecuadamente ocasiona problemas ambientales y de salud en las personas que habitan en los municipios donde se siembra, según diversos estudios como lo es el de la “evaluación del uso de la cascarilla de arroz como agregado orgánico en morteros de mampostería de la Universidad de San Carlos de Guatemala” [11].

Puesto que la cascarilla de arroz al contar con una baja tasa de degradación natural y densidad genera grandes volúmenes y al no contar con los espacios adecuados para la disposición de esta, simplemente se sitúan en vertedero a cielo abierto o es quemada, produciendo así emisiones de material particulado fino que quedan en suspensión en la atmosfera afectando gravemente la calidad del aire y generan desertificación en los suelos [12]. Debido a esto, se hace necesario hallar nuevas formas para utilizar de la cascarilla de arroz y evitar así la contaminación ambiental y las enfermedades respiratorias en las personas por la mala calidad del aire que genera la quema de esta, por lo tanto, se propone la utilización de la cascarilla de arroz como una alternativa para el mejoramiento de materiales de rellenos y de capas de rodamiento sin tratamiento

superficial en suelos fino y granulares teniendo en cuenta, que Colombia posee una diversidad geológica y climática, por lo que sus suelos se caracterizan por tener propiedades diferentes, es decir, los suelos finos son ampliamente encontrados y conocidos por su alta capacidad de retención de agua y plasticidad, lo que puede llevar a problemas de expansión y contracción [13], mientras que los suelos granulares son característicos de las regiones costeras y algunas áreas de llanura, estos presentan baja capacidad de retención de agua y pueden presentar una baja capacidad portante [14].

1.2 Justificación

La cascarilla de arroz es un subproducto abundante y de bajo costo de la industria arrocera, que se encuentra fácilmente en grandes cantidades debido a la alta demanda del arroz en el país. En este proyecto, se propone utilizar la cascarilla de arroz mediante un proceso de caolinización para mejorar de manera sostenible y respetuosa con el medio ambiente las propiedades mecánicas de los suelos granulares y finos. El objetivo es utilizar estos suelos como materiales de relleno o capas de rodadura sin tratamiento superficial. Esta propuesta busca mejorar las propiedades mecánicas de los suelos y mitigar el impacto ambiental y la desertificación causada por la inadecuada deposición o quema de la cascarilla de arroz en vertederos a cielo abierto. Se busca aportar nuevos métodos y conocimientos para la utilización de la cascarilla de arroz en la ingeniería civil, al tiempo que se contribuye al crecimiento económico del sector arrocero.

La utilización de la cascarilla de arroz en la construcción es importante debido a su carácter sostenible y renovable, ya que se produce en grandes cantidades como subproducto de la producción de arroz, reduciendo el desperdicio de materiales y optimizando el uso de los recursos disponibles. Además, la cascarilla de arroz posee propiedades aislantes y estructurales beneficiosas

para la construcción, siendo utilizada en la fabricación de paneles de pared, techos, pisos y bloques de construcción, entre otros productos. En relación con los vacíos presentes en la utilización de la CC en los suelos empleados como rellenos y capas de rodadura sin tratamiento superficial, son los factores como la compactación, la porosidad y la textura del suelo son relevantes, a su vez es importante destacar que no existe una única forma de caolinizar la cascarilla, lo que genera vacíos en el conocimiento científico actual. Mediante este estudio, se espera contribuir con nuevos métodos y conocimientos para la utilización de la cascarilla de arroz en el ámbito de la ingeniería civil, reduciendo estas lagunas y proporcionando un nuevo método o forma de caolinizar la cascarilla que pueda ser replicado. Además, se espera fomentar una economía circular en el sector arrocero, convirtiendo los residuos de la siembra del arroz en una nueva fuente de ingreso.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar la influencia de la cascarilla de arroz caolinizada para el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos granulares y finos utilizados como materiales de rellenos o capas de rodamiento sin tratamiento superficial.

1.3.2 Objetivos específicos

- Determinar las propiedades químicas asociadas a la cascarilla de arroz caolinizadas, para establecer su condición como elemento aglutinante.
- Caracterizar mecánicamente las propiedades de un material granular y fino, a fin de determinar las muestras que serán mezclada con la cascarilla de arroz caolinizada.

- Realizar el contraste del comportamiento mecánico de muestras de suelos mezclada con cascarilla de arroz caolinizada, cal y cemento, con el propósito de determinar la viabilidad como material de mejoramiento de rellenos o capa de rodamiento sin tratamiento superficial.

2. Marco referencial

2.1 Antecedentes

En sus tesis de grado titulada “Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cascará de arroz para el mejoramiento de subrasante,” Cuadra [15], introduce una innovadora solución ambiental para la estabilización de suelos arcillosos utilizando la ceniza de cáscara de arroz, con el fin de evaluar la influencia que tendrá en las propiedades físicas y mecánicas de este suelo. Para esto, el autor se propone realizar ensayos del suelo arcilloso natural, conocer el comportamiento del suelo arcilloso con diferentes porcentajes de adición de ceniza de cáscara de arroz, para encontrar el valor óptimo para que pueda tener una adecuada resistencia, realizar un análisis comparativo de las propiedades mecánicas del suelo arcilloso natural y el suelo arcilloso con diferentes adiciones de ceniza de cáscara de arroz y por último, conocer si la cáscara de arroz puede ser usado como agente estabilizador primario y/o secundario.

En análisis, luego de la etapa experimental se aprecia una mejora debida la presencia de ceniza de cáscara de arroz, sin embargo, en paralelo la combinación de suelo arcilloso, ceniza de cáscara de arroz y cal lograron mayores ventajas que la combinación de suelo arcilloso y ceniza de cáscara de arroz. Además, el autor resalta un incremento del valor de soporte de california (CBR) de un valor de 5% hasta 19,4% realizando combinaciones de suelo arcilloso y ceniza de cáscara de arroz, teniendo la mezcla un 20% de ceniza de cáscara de arroz. No obstante, el

incremento del valor de soporte de california (CBR) para las combinaciones de suelo arcilloso, ceniza de cáscara de arroz y cal lograron incrementar de 5% hasta 38,5% con un 20% de contenido de ceniza de cáscara de arroz. En análisis de la resistencia a la compresión no confinada les muestra un incremento de 6.91 kg/cm² hasta 8.77 kg/cm², para la combinación de suelo arcilloso con 20% de ceniza de cáscara de arroz. La resistencia a la compresión no confinada para la combinación de suelo arcilloso con 10% de ceniza de cáscara de arroz y cal genera un incremento de 6.91 kg/cm² hasta 9.96 kg/cm². Finalmente, resaltan el alto porcentaje de material silícico que presenta la ceniza de cáscara de arroz y que gracias a esto garantiza su funcionabilidad como agente estabilizador de suelos primario y secundario. Entre sus ventajas sobresale al ser un material orgánico y que contribuye a la conservación del ambiente, además de que promete buenos resultados siendo más favorables cuando se utiliza como agente estabilizador secundario.

En su investigación L. Y. Llamoga Vásquez [16], llevan a cabo una serie de actividades y procesos sobre la utilización de ceniza de cascarilla de arroz objetivo de evaluar el potencial de expansión y la capacidad portante de suelos arcillosos, para ser usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz estabilizante en la provincia de Cajamarca. Ya que, los proyectos de construcción de carreteras y edificios ha sido un problema histórico en esta región debido a su alta expansión y baja capacidad portante. La incorporación de ceniza de cascarilla de arroz como estabilizante en suelos arcillosos ha sido objeto de estudio para mejorar las condiciones de las subrasantes y reducir los costos de construcción. El estudio muestra que la incorporación de ceniza de cascarilla de arroz reduce significativamente el potencial de expansión de los suelos arcillosos y aumenta su capacidad portante. Además, la utilización de ceniza de cascarilla de arroz como estabilizante es una alternativa económica y sostenible para la construcción de subrasantes.

En el trabajo de E.A. Chicaiza [17], se realiza un estudio detallado sobre la utilización de puzolana de ceniza de cascarilla de arroz en la estabilización de arcillas expansivas en la provincia de Manabí, ubicada en una zona con suelo altamente expansivo y arcillas expansivas que han sido responsables de daños costosos a las estructuras construidas en la zona. La estabilización de las arcillas expansivas es un desafío importante en la construcción de infraestructura rural y urbana en Manabí. La utilización de ceniza de cascarilla de arroz como puzolana en la estabilización de arcillas expansivas se presenta como una solución efectiva y sostenible que puede reducir los costos de construcción en la zona. La investigación muestra que la mezcla de arcilla-puzolana tiene un efecto disminuyente en el coeficiente de expansión y que mejora las propiedades físicas de la arcilla tratada. Además, el estudio concluye que la utilización de la puzolana de ceniza de cascarilla de arroz en la estabilización de arcillas expansivas es una alternativa sostenible y efectiva para reducir los costos de construcción en la zona.

En su tesis [18], los autores K.K. Flores Isminio y K. Kassandra presenta un estudio sobre la utilización de puzolánico de cascarilla de arroz y cal para mejorar la capacidad portante de subrasantes realizado en San Martín, Perú. La estabilización de suelos es un tema importante en la construcción de carreteras y edificios, ya que mejora la resistencia y durabilidad de la estructura. Además, la utilización de materiales alternativos y sostenibles para la estabilización de suelos en proyectos de construcción es una tendencia en la industria. En este sentido, la utilización de puzolánico de cascarilla de arroz y cal como estabilizante es una alternativa económica y sostenible para la construcción de subrasantes. Sin embargo, se especifica que es necesario continuar investigando sobre la eficacia de la técnica de estabilización a largo plazo y su resistencia a diferentes condiciones climáticas y geotécnicas. Como conclusión el estudio muestra que la

utilización de puzolánico de cascarilla de arroz y cal mejora significativamente la capacidad portante de los suelos, lo que puede reducir los costos de construcción.

F.A. Tunque Cruz [19], “Estabilización de subrasantes blandos empleando resina natural de pino, trocha carrozable Mayupata, San Pablo, Cusco, Perú” Enfatiza en demostrar la influencia de la resina natural de pino para mejorar las propiedades físicas y mecánicas (CBR), la plasticidad y límite líquido de la subrasante blanda en la trocha carrozable Mayupata, Cusco. Inicialmente generalizan la importancia de la infraestructura vial resaltando que los daños que suelen presentarse son debido a que los materiales que se utilizan no son los más idóneos. En suma, proponen emplear resinas y polímeros para formar una estructura impermeable al agua; ciertas resinas naturales orgánicas aumentan la resistencia mecánica de suelos mejorando su cohesión que conforman la subrasante de una carretera. En el proceso experimental se realizó la observación directa de la subrasante blandas, posteriormente se emplean diferentes porcentajes de resina natural de pino con la finalidad de estabilizar, finalmente, si se logra la estabilización utilizando una adición de 4% de la resina natural de pino cuyos valores óptimos para la máxima densidad seca es de 1.801 g/cm³ así mismo para contenido de humedad es 12.27%; mientras tanto para límites de consistencia el límite líquido es de 21.29%, límite plástico 17.29% y índice de plasticidad es 4.01%; y finalmente para California Bearing Ratio 19.90% del CBR 0.1” para el 100 de la DMS.

2.2 Marco teórico

El suelo es la representación de minerales y materias orgánicas que se encuentra en la superficie de la tierra. Entre sus funciones, es soportar las obras que el hombre a lo largo de la historia de la civilización ha construido. Debido a lo anterior se ha caracterizado de gran interés el

estudiar los suelos desde las diferentes ópticas y necesidades dentro de las prácticas de la Ingeniería Civil [20].

2.2.1 Preparación de terrenos

Identificado como la preparación y adecuación del terreno: el proceso comprendido entre las fases de allanar, nivelar y compactar se realiza con el propósito de obtener una mejor disposición del terreno para su fin último. Cuando la explanación maneja pendientes naturales mayores o iguales a 20% se construyen terrazas. Sin embargo, cuando el terreno natural de la explanación no posee la calidad requerida se sugiere estabilizar o en caso ultimo reemplazarlo para que la obra sea estable [21].

2.2.2 Estabilización de suelos

En base a un análisis realizado por J. F. Rivera, A. Aguirre-Guerrero, R. Mejía de Gutiérrez y A. Orobio [22] las deformaciones que puede sufrir un suelo van de acuerdo con las cargas aplicadas, si este no posee la resistencia exigida. Los valores generados no deben exceder en ninguna circunstancia los que exigen las cargas que ha de soportar. Sin embargo, existen varias particularidades, entre ellas algunos tipos de suelos varían ampliamente su resistencia al cambiar la proporción del agua que contiene produciendo cambios volumétricos, de permeabilidad, durabilidad y la relación esfuerzo deformación. El proceso de estabilización tiene como propósito obtener unas condiciones normales del suelo, y que brinde seguridad a la obra civil.

2.2.3 Suelos granulares

Son conocidos principalmente por la separación de sus granos, cuyas muestras no pasa más del 5% la malla número 200. Entre los suelos granulares se tienen los no cohesivos identificados por la poca presencia de limos y arcillas son: GW, GP, SW y SP. (Grava bien gradada, grava pobremente gradada, arena bien gradada, arena pobremente gradada) Su análisis puede ser realizado mediante análisis el ensayo granulométrico por tamizado ya sea en su forma húmeda o seco (menos del 5% pasa la malla N° 200). Los suelos granulares no cohesivos generalmente suelen presentar características físicas y mecánicas, que dificultan los procesos de diseño y construcción de las diversas infraestructuras que se ejecutan sobre ella, requiriendo un tipo de manejo especial para garantizar la eficiencia y seguridad del proyecto [23]. Al estabilizar este tipo de suelo se pretende obtener aumento en los pesos específicos, disminuir los espacios vacíos y aumentar la permeabilidad.

2.2.4 Suelos finos

En los suelos finos las partículas son pequeñas, con alto porcentaje de arcilla y limo, lo cual le da características de adherencia a sí mismo. Sin embargo, se le conoce como suelos expansivos porque tienen la capacidad de sufrir cambios volumétricos en presencia de humedad. Como producto de lo anterior es posible decir que las obras civiles pueden presentar daños por asentamiento y también por esparcimiento del terreno, generando deformaciones producto de los aumentos de carga sobre el suelo que los soporta causando daños en las estructuras [24] El ingeniero Castro A. en su tesis de grado [15] explica los criterios que se deben tener para realizar una estabilización son:

- Suelos a nivel de subrasante calificada como pobre o inadecuada de acuerdo con el Manual Carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos (aquellos suelos que presente CBR menor o igual a 6).
- Así mismo, cuando la capa de subrasante sea arcillosa o limosa, y cuando se humedezcan puedan penetrar las capas granulares del pavimento.
- Para establecer un tipo de estabilización de suelos es necesario determinar el tipo de suelo existente. Los suelos que predominantemente se encuentran en este ámbito son: los limos, las arcillas, o las arenas limosas o arcillosas.

La importancia de una estabilización enfatiza en un ahorro de tiempo y calidad ya que permite usar el suelo presente en el pavimento, además permite el acceso a los lugares donde los terrenos son intransitables, obteniendo una localización estable que trabaja adecuadamente, esto permite evitar el uso de materiales de préstamo que son necesarios de llevar a la zona donde el pavimento estará emplazado. Se trata de una técnica enfocada claramente a lograr una mayor sostenibilidad, a cuyas ventajas medioambientales y técnicas, se suman importantes beneficios económicos.

Figura 1. Clasificación de suelos SUCS



2.2.5 Tipo de estabilización

Existen diversos tipos de estabilización y mejoramientos de suelos, en donde es importante tener conocimiento de conceptos teóricos, prácticos y experimentales sobre características y propiedades de los suelos en especial el comportamiento de los suelos finos, con la finalidad de obtener el método apropiado de estabilización que puede ser mecánica o química, para un tipo de suelo en especial teniendo en cuenta consideraciones climatológicas, regionales, criterios técnicos de resistencia durabilidad y aspectos económicos [22].

Figura 2. Tipo de estabilización



2.2.5.1 Estabilización mecánica. La estabilización mecánica consiste en mezclar suelos con dos o más graduaciones, obteniendo como resultado un nuevo material que podría ser utilizado en base, subbase o cualquier otro propósito deseado. El fin último es balancear las características de ambos suelos para complementar sus características en cuanto a graduación. Además, se mejora

la plasticidad, es decir se opta por disminuir la susceptibilidad del material a la humedad y mejorar su capacidad de drenaje, lo cual influye directamente en su resistencia, trabajabilidad y la compactación.

Para el diseño de una estabilización mecánica se requiere conocer los porcentajes de retención en el laboratorio de granulometría, y los límites de Atterberg. Posteriormente, se realizan cálculos de los porcentajes que se irán a utilizar de cada suelo teniendo en cuenta sus características actuales y las características que se quieren lograr [25].

2.2.6 Cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es la base fundamental con la que se realizara este proyecto, por lo tanto, esta es el principal objeto de estudio, posteriormente se debe conocer a detalles las propiedades mecánicas de los suelos granulares y finos que serán utilizados como materiales de rellenos o de capas de rodamiento sin tratamiento superficial, así mismo se hace necesario conocer las normativas ambientales que advierten sobre la contaminación atmosférica y la normativa de carreteras.

2.2.7 Propiedades de la cascarilla de arroz

La cascarilla de arroz es la base fundamental con la que se realizara este proyecto, por lo tanto, esta es el principal objeto de estudio, posteriormente se debe conocer a detalles las propiedades mecánicas de los suelos granulares y finos que serán utilizados como materiales de rellenos o de capas de rodamiento sin tratamiento superficial, así mismo se hace necesario conocer las normativas ambientales que advierten sobre la contaminación atmosférica y la normativa de carreteras.

2.2.8 Propiedades de la cascarilla de arroz

La cáscara de arroz es un subproducto de la molienda de los granos de arroz de las tierras de cultivo. Se encuentra en el exterior del grano de arroz maduro y consta de dos capas, llamadas corteza y pericarpio, conectadas por dos membranas, entre la cáscara y el endospermo, que representan el desprendimiento total del grano después de quitar la cáscara, pulir hasta el grano está listo para la comercialización [26].

La cascarilla de arroz cuando es sometida a altas temperaturas desarrolla una propiedad aglomerante que la transforma en una pasta sólida "Grumo de cascarilla al rojo vivo" difícil de romper [27]. Entre los porcentajes más relevantes de la composición química de la cascarilla de arroz se encuentran en gran porcentaje la sílice, que favorece y promueve el crecimiento erecto de las plantas y le da resistencia al volcamiento. Aumenta la resistencia a altas y bajas temperaturas de las plantas. Disminuye el estrés por sequía (eficiencia en el uso del agua) y salinidad de las plantas. La aplicación de Silicio al suelo acompleja el Aluminio tóxico y mejora la disponibilidad del fósforo retenido en el suelo para que quede realmente disponible para las plantas.

Entre sus principales propiedades fisicoquímicas tenemos que es un sustrato orgánico de baja tasa de descomposición, es liviano, de buen drenaje, buena aireación y su principal costo es el transporte. La cascarilla de arroz es el sustrato más empleado para los cultivos hidropónicos en Colombia bien sea cruda o parcialmente carbonizada. El principal inconveniente que presenta la cascarilla de arroz es su baja capacidad de retención de humedad y lo difícil que es lograr el reparto homogéneo de la misma, de tal modo que se ha innovado a la mezcla de este material con la arcilla generando la cascarilla de arroz caolinizada.

La producción de arroz mecanizado en Colombia es de aproximadamente 1.558.044 toneladas, de las cuales 389.511 corresponden a cascarilla [10] estas son cantidades apreciables de desechos que se producen a nivel nacional y que deben ser aprovechados eficientemente para reducir la contaminación por este residuo.

2.2 Marco conceptual

2.3.1 *Cascarilla de Arroz Caolinizada*

2.3.1.1 Composición química. La cascarilla de arroz caolinizada es un material compuesto principalmente por sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3). La presencia de estas dos fases es el resultado de la caolinización de la cascarilla de arroz, que es un proceso en el cual se somete a altas temperaturas para transformar su composición química. Además de la sílice y la alúmina, la cascarilla de arroz caolinizada puede contener pequeñas cantidades de otros elementos como hierro, calcio y potasio.

2.3.1.2 Propiedades química. La cascarilla de arroz caolinizada es un material compuesto principalmente por sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3). La presencia de estas dos fases es el resultado de la caolinización de la cascarilla de arroz, que es un proceso en el cual se somete a altas temperaturas para transformar su composición química. Además de la sílice y la alúmina, la cascarilla de arroz caolinizada puede contener pequeñas cantidades de otros elementos como hierro, calcio y potasio.

2.3.1.2.1 Resistencia a la corrosión. La cascarilla de arroz caolinizada exhibe una buena resistencia a la corrosión debido a su composición principalmente basada en sílice y alúmina. Esto la hace adecuada para su uso en entornos donde se requiere resistencia a la corrosión, como en aplicaciones industriales o en sistemas de purificación de agua.

2.3.1.3 Estructura física y morfología. La cascarilla de arroz caolinizada presenta una estructura física porosa y una morfología caracterizada por partículas finas y granulometría uniforme. Debido al proceso de caolinización, la estructura original de la cascarilla de arroz se transforma, resultando en una mayor densificación y una reducción en la porosidad.

2.3.1.4 Propiedades físicas y mecánicas.

2.3.1.4.1 Densidad aparente. La densidad aparente de la cascarilla de arroz caolinizada puede variar según el grado de caolinización y el proceso de fabricación utilizado. En general, se caracteriza por tener una densidad relativamente baja debido a su naturaleza porosa.

2.3.1.4.2 Porosidad. La caolinización de la cascarilla de arroz reduce significativamente su porosidad, lo que puede mejorar su resistencia y durabilidad. La porosidad restante puede estar compuesta por poros microscópicos que pueden influir en propiedades como la absorción de agua y la permeabilidad.

2.3.1.4.3 Resistencia a la compresión. La resistencia a la compresión de la cascarilla de arroz caolinizada puede variar según su composición y estructura. En general, debido a la

reducción de porosidad y la mayor densificación durante el proceso de caolinización, se espera que la resistencia a la compresión sea mejorada en comparación con la cascarilla de arroz sin caolinizar.

2.3.1.5 Propiedades térmicas.

2.3.1.5.1 Conductividad térmica. La cascarilla de arroz caolinizada exhibe una conductividad térmica baja debido a su estructura porosa y la presencia de aire atrapado en los poros. Esto le confiere propiedades de aislamiento térmico, lo que puede ser beneficioso en aplicaciones donde se requiere minimizar la transferencia de calor.

2.3.1.5.2 Estabilidad térmica. La cascarilla de arroz caolinizada es estable térmicamente hasta ciertas temperaturas, generalmente superiores a los 700 °C. Esta estabilidad térmica es importante para garantizar el rendimiento del material en aplicaciones de alta temperatura, como en la industria cerámica.

2.3.2 Aplicaciones industriales de la cascarilla de arroz caolinizada.

2.3.2.1 Industria de la construcción

2.3.2.1.1 Materiales de construcción sostenible. La cascarilla de arroz caolinizada se utiliza en la fabricación de materiales de construcción sostenibles, como bloques y paneles, debido a su bajo impacto ambiental y su capacidad de mejorar las propiedades físicas de los materiales.

2.3.2.1.2 Aislamiento térmicos y acústico. Debido a su estructura porosa y baja conductividad térmica, la cascarilla de arroz caolinizada se utiliza como material de aislamiento térmico y acústico en la construcción, ayudando a reducir la transferencia de calor y sonido.

2.3.2.2 Industria cerámica.

2.3.2.2.1 Aditivo en la producción de ladrillos y baldosas. La cascarilla de arroz caolinizada se utiliza como aditivo en la fabricación de ladrillos y baldosas cerámicas para mejora de la resistencia y durabilidad de cerámicas: La adición de cascarilla de arroz caolinizada a las formulaciones de cerámica puede mejorar la resistencia mecánica, la resistencia al desgaste y la durabilidad de los productos cerámicos finales.

2.3.2.3 Industria del papel.

2.3.2.3.1 Agente de carga en la fabricación de papel. La cascarilla de arroz caolinizada cumple una función esencial como agente de carga en la fabricación de papel, mejorando aspectos físicos fundamentales como la opacidad, la resistencia y la capacidad de retención de tinta del papel resultante.

2.3.2.3.2 Mejora de las propiedades físicas del papel. Al introducir la cascarilla de arroz caolinizada en el proceso de producción de papel, se logra un aumento notable en la resistencia al rasgado del material, además de mejorar su capacidad de absorción de agua y su textura superficial suave.

2.3.2.4 Industria del plástico.

2.3.2.4.1 Reforzante en la producción de compuestos de plástico. En el ámbito de la producción de compuestos plásticos, la cascarilla de arroz caolinizada actúa como refuerzo y aditivo, mejorando las propiedades mecánicas y térmicas de los productos plásticos, lo que incrementa su resistencia y rendimiento.

2.3.2.4.2 Reducción del uso de plásticos convencionales. Al añadir cascarilla de arroz caolinizada a compuestos de plástico, se abre la posibilidad de reducir el uso de plásticos convencionales, generando un aporte significativo a la sostenibilidad y reduciendo la dependencia de recursos no renovables.

2.3.2.5 Industria del ambiental.

2.3.2.5.1 Uso como material filtrante en sistemas de purificación de agua. La cascarilla de arroz caolinizada encuentra aplicación como material filtrante en sistemas de purificación de agua, logrando la eliminación de impurezas y la mejora sustancial de la calidad del agua tratada.

2.3.2.5.2 Reciclaje y reutilización de residuos agrícolas. La integración de la cascarilla de arroz caolinizada como subproducto de la industria agrícola desencadena un proceso de reciclaje y reutilización de los desechos agrícolas, aportando así a una gestión sostenible de los recursos.

2.3.3 Ventajas y desafíos en el uso de la cascarilla de arroz caolinizada

2.3.3.1 Beneficios ambientales.

2.3.3.1.1 Reducción de residuos agrícolas. La incorporación de la cascarilla de arroz caolinizada contribuye a la disminución de los desechos agrícolas y al fomento de la economía circular.

2.3.3.1.2 Sustitución de materiales no renovables. La cascarilla de arroz caolinizada tiene el potencial de sustituir materiales no renovables en diversas aplicaciones, lo que resulta en un aporte concreto a la sostenibilidad y a la preservación de los recursos naturales.

2.3.3.2 Consideraciones técnicas y económicas.

2.3.3.2.2 Disponibilidad y costos. La disponibilidad y los costos de la cascarilla de arroz caolinizada pueden variar según la ubicación geográfica y la demanda del mercado.

2.3.3.2.2 Procesamientos y manipulación. La manipulación y el procesamiento de la cascarilla de arroz caolinizada pueden plantear desafíos técnicos, que van desde el requerimiento de equipamiento especializado hasta la necesidad de optimizar los procesos de fabricación.

2.3.4 Consideraciones de salud y seguridad

2.3.4.1 Exposición a polvos y partículas finas. Al manejar la cascarilla de arroz caolinizada, resulta esencial tener en cuenta medidas adecuadas, como la utilización de equipos de

protección personal (EPP) y la instalación de sistemas de ventilación apropiados, con el propósito de mitigar los riesgos para la salud de los trabajadores.

2.3.4.1.1 Evaluación de riesgos y medidas de control. Realizar una evaluación exhaustiva de los riesgos y establecer medidas de control apropiadas resulta crucial para asegurar la seguridad en la manipulación y aplicación de la cascarilla de arroz caolinizada. Este proceso engloba la formación de los trabajadores, el acatamiento de las normativas de seguridad y la adopción de prácticas óptimas de gestión.

3. Proceso y análisis

3.1 Metodología de análisis

Este estudio cuenta con un tipo de metodología correlacional ya que se investiga la relación e influencia entre diversas variables, siendo las dos más importantes la cascarilla de arroz caolinizada y las propiedades mecánicas de los suelos granulares y finos que son utilizados como rellenos o capas de rodamiento sin tratamiento superficial. Estas variables principales dan cabida a la formación de un patrón de variables que van en torno al problema a tratar y la solución y manejo de este estudio.

3.1.1 Preparación de muestra

3.1.1.1 Materiales utilizados.

Tabla 1. Materiales

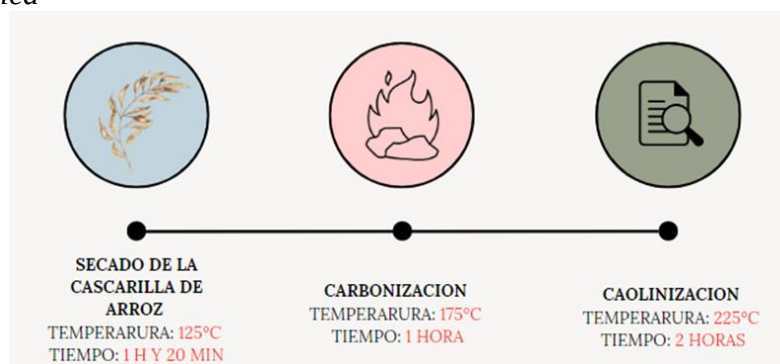
Materiales	Siglas	Descripción
------------	--------	-------------

Cascarilla de arroz caolinizada	CE	Finca arrocera en el municipio de Distracción, La Guajira.
Cemento	CEM	Un bulto de 50kg marca CEMEX.
Cal	CAO	Un bulto de 50kg.
Suelo granular: Arcilla arcillosa	SC	200kg extraídos de una finca en la Mesa de los Santos.
Suelo fino: Arcillas inorgánicas de baja comprensibilidad	CL	200kg extraídos del intercambiador Guatiguara del Municipio de Piedecuesta, Santander.

Nota: Encuesta desarrollada en Google Formularios (2021-2022). Fuente: Elaborada por los autores.

3.1.2 Caolinización de la cascarilla

El proceso de caolinización de la cascarilla de arroz se lleva a cabo en un período de aproximadamente 2 meses, durante el cual se procesaron diariamente entre 4 y 5 kg de cascarilla utilizando una línea térmica (Figura 3) y un El horno Humboldt de referencia 5DNX8 es un horno de convección de gravedad diseñado para su uso en aplicaciones de laboratorio. Con una potencia de 1600W, este horno ofrece un rendimiento confiable y consistente para una amplia variedad de aplicaciones de calentamiento y secado. Una vez completado el procesamiento de 150 kg de cascarilla de arroz caolinizada, el producto resultante fue almacenado en una bodega para su posterior uso.

Figura 3. Línea térmica

Se tomó una muestra de 3 kg de cascarilla y se trituró utilizando un martillo. Posteriormente, se tamizó la muestra a través del tamiz #100. La muestra resultante se utilizó para la determinación mineralógica de la cascarilla mediante el análisis de rayos X, llevado a cabo en un laboratorio especializado en este tipo de análisis. Este procedimiento permite identificar los componentes minerales de la cascarilla de manera precisa y detallada.

La línea térmica proporcionada y explicada en detalle de manera anterior, muestra un proceso en tres etapas: secado, carbonización y caolinización, aplicado a la cascarilla de arroz. A partir de esta información y considerando los datos de temperatura y tiempo proporcionados, es posible analizar si la cascarilla de arroz ha experimentado únicamente la carbonización o si también ha alcanzado la etapa de caolinización.

La cascarilla de arroz, al ser sometida a 125°C durante 1 hora y 2 minutos en la primera etapa, experimenta un proceso de secado. Este paso tiene como objetivo eliminar la humedad presente en la cascarilla. Posteriormente, en la etapa de carbonización a 175°C durante 1 hora, la cascarilla sufre una descomposición térmica parcial, liberando gases y agua, y dejando residuos carbonizados.

La etapa clave es la caolinización a 225°C durante 2 horas. La caolinización es un proceso en el cual los minerales arcillosos presentes en la cascarilla se transforman en minerales de tipo caolinita, modificando así sus propiedades físicas y químicas. La caolinita es un mineral arcilloso que se caracteriza por su estructura laminar y su capacidad de retener agua. En este contexto, si la cascarilla de arroz ha sido sometida a la temperatura de 225°C durante 2 horas en la etapa de caolinización, es plausible afirmar que se ha alcanzado esta fase de transformación mineral. Sin embargo, si el proceso se detiene antes de alcanzar esta temperatura o duración, es probable que la cascarilla no haya experimentado una caolinización completa.

3.1.3 Mezcla de materiales

Se mezclaron los dos tipos de suelo (CL y SC) con diferentes porcentajes de adiciones de materiales con respecto al peso, como lo son el 5% y 15% de CC, CAO y CEM. Los detalles de la mezcla se encuentran especificados en la Tabla 2. Este procedimiento se llevó a cabo con el objetivo de mejorar las propiedades mecánicas de los suelos y aumentar su capacidad de soporte.

Tabla 2. *Fusión de suelos*

Suelo	Material	Porcentaje de peso	Sigla
Arena arcillosa	Cascarilla de arroz	5%	SC-CC5
	caolinizada	15%	SC-CC15
	Cemento	5%	SC-CEM5
		5%	SC-CEM15
	Cal	5%	SC-CAO5
		15%	SC-CAO15
Arcilla de baja plasticidad	Cascarilla de arroz	5%	CL-CC5
	caolinizada	15%	CL-CC15
	Cemento	5%	CL-CEM5

	15%	CL-CEM15
Cal	5%	CL-CAO5
	15%	CL-CAO15

Nota: Encuesta desarrollada en Google Formularios (2021-2022). Fuente: Elaborada por los autores.

3.1.4 Mineralogía de la cascarilla de arroz caolinizada

Para obtener información sobre las propiedades químicas de la CC, se deben realizar dos ensayos en el laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander (UIS): DRX - 03 y FRX - 02. Ambos ensayos utilizan un equipo de difracción de rayos X (DRX) y fluorescencia de rayos X (FRX) de alta calidad, el D8 Discover, producido por la empresa alemana Bruker. Este equipo es uno de los sistemas más avanzados y eficientes disponibles en el mercado, y permite obtener información precisa y detallada sobre la composición química de la CC.

3.1.4.1 Ensayo FRX-02. Este método de ensayo se fundamenta en el análisis de la fluorescencia de rayos X, el cual permite determinar la composición mineral y los elementos químicos presentes en la cascarilla de arroz caolinizada mediante la medición de los porcentajes de concentración de cada compuesto. Esta técnica proporciona información detallada acerca de la estructura química de la muestra.

3.1.4.2 Ensayo DRX-03. Este método de ensayo es capaz de brindar información detallada acerca de la estructura cristalina de la muestra en cuestión. Esto se logra gracias a la utilización de un sistema que consta de un tubo de rayos X y un detector de alta sensibilidad, lo cual garantiza una excelente calidad de los datos obtenidos durante el ensayo.

3.1.5 Caracterización mecánica de suelos

Mediante la implementación de las normas del INVIAS se llevó a cabo la caracterización mecánica de los suelos CL y SC en su forma natura, a través de muestras representativas de cada uno de ellos.

3.1.5.1 INV-E 123-13 Determinación de los tamaños de las partículas de los suelos. La correcta caracterización de las propiedades de los suelos es un aspecto fundamental para su adecuado uso en diversos ámbitos, como la agricultura, la ingeniería civil, entre otros. En este sentido, la determinación cuantitativa de la distribución de los tamaños de las partículas de los suelos se presenta como un procedimiento clave para la clasificación de estos. En este contexto, el método de tamices establecido en la norma INV-E-123-13 resulta ser una herramienta esencial para la evaluación de la distribución de las partículas de los suelos de tamaño mayor a 75µm. Este método permite la identificación del porcentaje de partículas que corresponden a las categorías de partículas finas, arenas y gravas, permitiendo así su adecuada clasificación [28].

3.1.5.2 INV-E 125-13 Determinación del límite líquido de los suelos. Para lograr una clasificación adecuada de las muestras de suelo, se lleva a cabo un ensayo de límite líquido. Este ensayo es de gran importancia en la caracterización de la fracción fina de los suelos, y se utiliza la norma INV E-125-13 como referencia para su realización. Dicha norma describe dos métodos para la preparación de las muestras de suelo, ambos utilizando el método por vía húmeda, y aplicables a los suelos de tipo CL y SC [29].

3.1.5.3 INV E-126-13 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos. El límite plástico es un parámetro crucial en la clasificación de los suelos, ya que permite la caracterización

de la fracción fina presente en los mismos. Este valor es utilizado en conjunto con el límite líquido y el índice de plasticidad, para determinar el comportamiento que los suelos pueden presentar en diversas aplicaciones. El conocimiento del límite plástico es fundamental para entender las propiedades físicas y mecánicas de los suelos, como su compresibilidad, permeabilidad, compactibilidad, expansión, contracción y resistencia al corte. Estas características son de gran importancia en áreas como la ingeniería civil y la construcción, donde es necesario conocer las propiedades del suelo para poder diseñar estructuras y obras civiles adecuadas [30].

3.1.5.4 INV 128 – Gravedad específica. La norma INVIAS para la medición de la gravedad específica se enfoca en la evaluación de la densidad de los materiales utilizados en la construcción de proyectos viales en Colombia, tales como carreteras y puentes. La gravedad específica se define como la relación entre la densidad de un material y la densidad del agua.

La norma establece los procedimientos y equipos necesarios para realizar la medición de la gravedad específica de materiales como el suelo, la piedra triturada y el asfalto. La medición precisa de la gravedad específica es crucial para garantizar la calidad y uniformidad de los materiales de construcción, asegurando así la eficiencia y durabilidad de las obras viales.

En este sentido, la norma INVIAS establece límites de tolerancia aceptables para la gravedad específica de los materiales de construcción, con el fin de garantizar la calidad y uniformidad de estos [31].

3.1.5.5 Clasificación sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS). La clasificación SUCS se utiliza ampliamente para clasificar los suelos en función de su granulometría y características de plasticidad. Esta clasificación se basa en la combinación de los resultados obtenidos en los ensayos de tamizado, límite líquido y límite plástico, los cuales se mencionaron anteriormente. Una vez realizados los ensayos correspondientes, se pueden utilizar la Figura 4 y Figura 5, presentes en la norma INV E-123-13, para clasificar los suelos de manera adecuada. Estas ilustraciones proporcionan una guía visual para la identificación de las diferentes clases de suelo, en función de su tamaño de partícula y sus características de plasticidad.

Figura 4. Clasificación SUCS suelos granulares

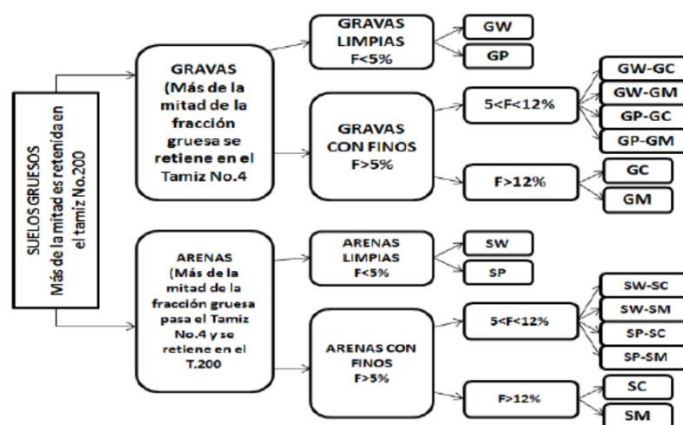
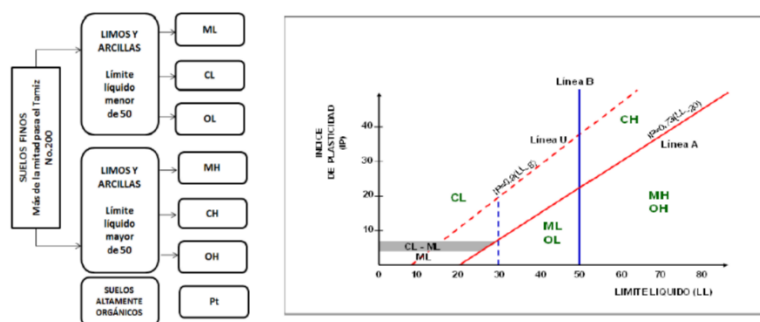


Figura 5. Carta de Atterberg



3.1.6 Comparación de las propiedades mecánicas de suelos

Para comparar los suelos mezclados de la Tabla 2 con los suelos iniciales CL y SC, se realiza los ensayos de compactación de Proctor modificado, el ensayo de encofinada y el ensayo de California Bearing Ratio (CBR), mencionados anteriormente. En base a ellos se determinó la máxima densidad seca y la humedad óptima de compactación para cada tipo de suelo, la resistencia a la deformación del suelo bajo diferentes niveles de esfuerzos y la resistencia a la penetración de los suelos, los resultados de los suelos mezclados son comparados entre ellos y entre los suelos iniciales, para así determinar que mejoría presentan con cada aditivo y si la CC es más eficiente que la CAO y el CEM.

3.1.6.1 INV E-142-13 Ensayo modificado de compactación. La norma INV E-142-13 [32] establece el procedimiento para determinar la densidad máxima y contenido de humedad óptimo de un suelo, mediante el ensayo de compactación de Proctor modificado. En el caso del suelo SC, se utilizó el ensayo tipo C, que implica una mayor energía y número de capas en comparación con el suelo CL, para el cual se utilizó el ensayo tipo A, que usa menos energía y número de capas. Esta diferencia se debe al tamaño de partículas de cada suelo, tal y como se especifica en la Figura 6.

Figura 6. *Métodos para el ensayo modificado de compactación*

MÉTODO	A	B	C
GOLPES/CAPA	25	25	56
USO	Si 25 % o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 4.75 mm (No. 4). Sin embargo, si en este tamiz queda retenida entre 5 y 25 % de la masa, se puede usar el Método A, pero se requerirá la corrección por sobretamaños (Ver numeral 1.4) y, en este caso, el uso del Método A no reportará ninguna ventaja	Si 25 % o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 9.5 mm (3/8"). Sin embargo, si en este tamiz queda retenida entre 5 y 25 % de la masa, se puede usar el Método B, pero se requerirá la corrección por sobretamaños (Ver numeral 1.4). En este caso, la única ventaja de usar el Método B en lugar del Método C, es que se necesita menos cantidad de muestra y el molde pequeño es más fácil de usar	Si 30 % o menos de la masa del material queda retenida en el tamiz de 19.0 mm (3/4") (Ver numeral 1.4)
OTRO USO	Si este requisito de granulometría no se puede cumplir, se deben usar los Métodos B o C	Si este requisito de granulometría no se puede cumplir, se debe usar el Método C	

Nota: Los métodos por utilizar son los A y el C, el A para el suelo fino y el C para el suelo granular. Fuente [32].

3.1.6.2 INV E-148-13 CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada. La norma INV E-148-13 describe el procedimiento para realizar el ensayo de Índice de Resistencia de California (CBR) en suelos compactados en laboratorio y sobre muestra inalterada con un tamaño de partículas igual o menor a 19 mm (3/4"), los cuales son utilizados como subrasante, subbase y base en proyectos de construcción de carreteras y otras infraestructuras viales. Este ensayo consiste en medir la relación porcentual entre el esfuerzo requerido por un pistón para penetrar una muestra de suelo a una profundidad de 2.54 o 5.08 mm y el esfuerzo necesario para penetrar a la misma profundidad una muestra de grava bien graduada. La preparación de las muestras de compactación para ambos tipos de suelo se realiza mediante el método C especificado en la norma [33].

3.1.6.3 INV E-152-07 Compresión encofinada. La resistencia de los suelos CL y SC se evalúa según la norma INV E-152-07, utilizando el método de muestra compactada y ajustando la velocidad del aparato de compresión a un 2% de la altura de cada muestra preparada [34].

3.2 Análisis y discusión

3.2.1 Mineralogía de la cascarilla de arroz caolinizada (CC)

La cascarilla no se caolinizo.

3.2.2 Rayos X – Ensayo FRX-02

La Tabla 3 que se exhibe a continuación presenta los porcentajes de óxidos y elementos que han sido cuantificados a través de un ensayo en una muestra representativa de cascarilla de arroz previamente sometida a caolinización.

Tabla 3. Resultados FRX de CC

Elemento	Concentración	Compuesto	Concentración
Si	31.94%	SiO ²	68.33%
K	1.70%	K ² O	2.05%
P	0.24%	P ² O ⁵	0.55%
Ca	0.23%	CaO	0.32%
Mg	0.15%	MgO	0.25%
Al	0.08%	Al ² O ³	0.15%
Fe	0.07%	Fe ² O ³	0.10%
Mn	0.05%	MnO	0.06%
Zn	0.03%	ZnO	0.04%
S	0.03%	SO ³	0.04%

		CHO	28.00%
Elementos minoritarios			
Elemento	Concentración	Compuesto	Concentración
Ti	63 PPM	TiO ²	0.01%
Cu	47PPM	Cuo	58 PPM
Cr	36 PPM	Cr ² O ³	53 PPM
Ni	33 PPM	NiO	42 PPM
Sr	19 PPM	SrO	23 PPM
Rb	18 PPM	Rb ² O	19 PPM

Nota: Todos los compuestos están ordenados según su composición elemental. Se emplea CHO para compensar la matriz de cuantificación y normalizar los datos. Se identifica Pd, Cl y Zr pero no son cuantificables.

Tabla 4 permite establecer que la CC es un elemento aglutinante de orden conglomerante, debido a la presencia de compuestos como la CAO y el CEM, que son típicos de los elementos aglutinantes.

Tabla 4. *Compuestos y nombres*

Compuesto	Nombre de compuesto
SiO ²	Óxido de silicio
KO	Óxido de potasio
P ² O ⁵	Óxido de fósforo
CaO	Óxido de calcio
MgO	Oxido de Mangnesio
Al ² O ³	Óxido de alumino
Fe ² O ³	óxido de hierro (III)
MnO	Oxido de Mangneso (II)
SO ³	Óxido de azufre
TiO ²	Óxido de titanio (IV)
SrO	Óxido de estroncio

Nota: En el perfil de difracción experimental se observaron reflexiones que pudieron ser asignadas a una fase conocida.

La Tabla 4 presenta resultados de relevancia en el análisis, donde sobresale la presencia de silicio (Si) como componente primordial, constituyendo un 31.94% de la muestra. La presencia de silicio en la cascarilla de arroz proviene de su capacidad para absorber ácido monosilícico (Si(OH)_4) durante el crecimiento, transformándolo en óxido de silicio (SiO_2) una vez que se vuelve inmóvil. En la muestra de la CC, este óxido de silicio representa un 68.33% de los componentes. Aunque el silicio no es considerado un micronutriente esencial para la agricultura, su presencia en la planta de arroz está relacionada con una mejora en la calidad y el rendimiento de la cosecha. Dado que el óxido de silicio posee características de alta resistencia, durabilidad, estabilidad térmica y aislamiento eléctrico, similares a las del cemento y la cal, es factible considerar que la CC puede actuar como un agente aglutinante y conglomerante que exhibe propiedades similares a los materiales convencionales.

Otro compuesto destacado en la muestra es el hidrato de carbono (CHO), que proviene principalmente de los carbohidratos presentes en el arroz y, por ende, en su cáscara.

Los resultados de la Tabla 4 fueron comparados con un estudio previo realizado por Amin (2017) en la revista "Construction and Building Materials" [35]. Este estudio se centra en la producción de un material refractario de alta resistencia utilizando arcilla y sílice, incorporando residuos agrícolas como la ceniza de cascarilla de arroz. A través de un análisis mediante Fluorescencia de Rayos X (FRX), el estudio previo encontró que, en contraste con los resultados presentes en la Tabla 4, el dióxido de silicio (SiO_2) fue el compuesto de mayor concentración en la ceniza de cascarilla, con un notable 92.81%. La divergencia se debe a los distintos procesos a los que se sometieron los materiales, ya que la CC experimentó una línea térmica de tres etapas con temperatura máxima de 225°C , mientras que la ceniza de cascarilla fue incinerada directamente a 500 y 600°C . No obstante, es importante resaltar que el dióxido de silicio (SiO_2)

es el compuesto predominante en ambos casos, lo que indica que un mayor contenido de SiO_2 conlleva una contribución significativa de propiedades beneficiosas. En el caso de la CC, con un contenido de SiO_2 superior al 50%, es posible emplearla como agente aglutinante y conglomerante, mejorando la resistencia de suelos granulares y finos.

Al analizar la Tabla 4, se observa la presencia de otros componentes como óxido de silicio (SiO_2), óxido de potasio (K_2O), óxido de fósforo (P_2O_5), óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO), óxido de aluminio (Al_2O_3), óxido de hierro (Fe_2O_3), óxido de manganeso (MnO), óxido de azufre (SO_3), óxido de titanio (TiO_2) y óxido de estroncio (SrO). Estos compuestos también están presentes en el CEM y la CAO. Por tanto, se concluye que la CC puede actuar como agente aglutinante y conglomerante, exhibiendo características comparables a las de los materiales convencionales como el CEM y la CAO.

3.2.3 Rayos X – Ensayo DRX-03

La sección presenta los resultados de un ensayo de Rayos X, que se reflejan en la Tabla 5 y muestran las fases de cristalización en una muestra representativa de la CC.

Tabla 5. Ensayo DRX-03 Fases cristalinas de la CC.

	<i>Nombre</i>	<i>Cuantitativo</i>
<i>Cristalino</i>	<i>Cristobalita</i>	79.09%
	<i>Tridimita</i>	20.70%
	<i>Sulfato de níquel hidratado</i>	<1%

Nota: En el perfil de difracción experimental se observaron reflexiones que no pudieron ser asignadas a una fase conocida.

La caracterización cristalina de la muestra de la CC reveló la presencia de tres fases cristalinas principales: Cristobalita, Tridimita y la de Sulfato de Níquel Hidratado. Es importante destacar que la presencia de estas fases cristalinas está altamente relacionada con el contenido de

silicio y óxido de silicio en la muestra, ya que estos compuestos tienen un papel fundamental en la formación de estructuras cristalinas. Por tanto, se puede afirmar que la fase cristalina de la CC está directamente influenciada por la composición química de la muestra. Es importante tener en cuenta que las diferencias en la fase cristalina pueden ser influenciadas por factores como el método de preparación de la muestra, la temperatura de caolinización, y la presencia de otros elementos en la muestra.

Con esto entonces, la identificación de tres fases cristalinas principales, a saber, cristobalita, trimidita y sulfato de níquel hidratado, en la muestra de la CC, establece una perspectiva intrigante sobre su naturaleza cristalina. La estrecha vinculación entre la presencia de estas fases cristalinas y el contenido de silicio y óxido de silicio en la muestra es destacable, ya que estos componentes desempeñan un papel esencial en la formación de las estructuras cristalinas. Esto respalda la hipótesis de que la fase cristalina en la CC está directamente influenciada por su composición química [45].

Sin embargo, la diversidad de fases cristalinas puede verse afectada por una serie de factores, tales como el método de preparación de la muestra, la temperatura de caolinización y la posible presencia de otros elementos en la matriz. Para discernir si la cascarilla de arroz ha experimentado una caolinización completa o parcial, es crucial considerar estos factores y referencias científicas pertinentes que respalden la discusión. La justificación de la idea sobre la caolinización de la cascarilla de arroz se basa en estudios previos que examinen la influencia de la temperatura y el tiempo de tratamiento térmico en la transformación mineral y la formación de fases cristalinas. Un enfoque que respaldando la afirmación de que la variación en las condiciones de tratamiento puede generar distintas fases cristalinas [46].

3.3 Caracterización de suelos

3.3.1 Granulometría

De acuerdo con el análisis de datos llevado a cabo según las especificaciones de la norma INV-E 123-13, se procede a determinar el porcentaje granulométrico en los dos suelos iniciales.

En la Tabla 6 se puede observar que más del 50% de las partículas presentes en el suelo analizado corresponden a fracciones de tamaño de arena, lo que sugiere la clasificación del suelo como un suelo granular.

Tabla 6. *Porcentaje granulométrico del suelo granular (SG)*

% Grava	% Arena	% Fino
8.56	62.00	29.44

Por otro lado, de acuerdo con la información proporcionada en la Tabla 7, se evidencia que más del 50% de las partículas corresponden a fracciones de tamaño fino, lo que indica que se trata de un suelo fino. Estas categorizaciones se establecen en función de la proporción relativa de partículas de distintos tamaños presentes en la muestra de suelo.

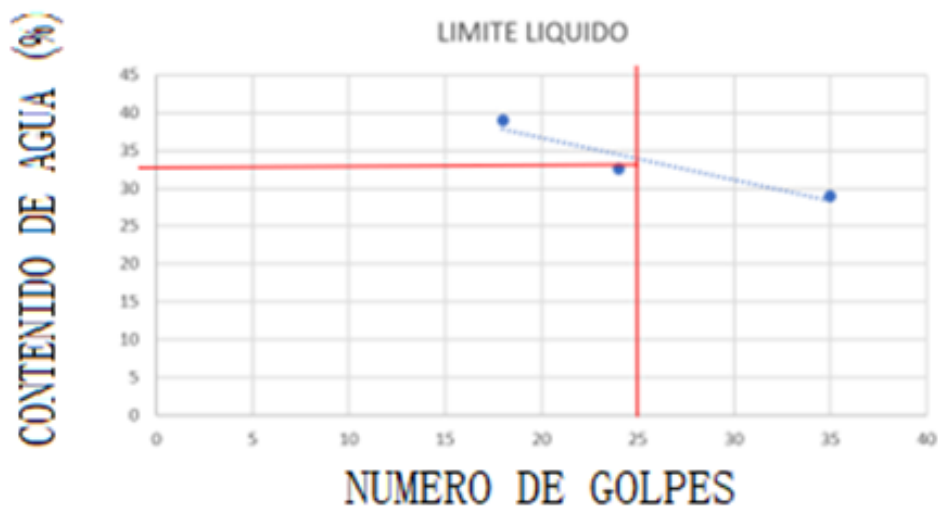
Tabla 7. *Porcentaje granulométrico del suelo granular (SG)*

% Grava	% Arena	% Fino
0.00	36.27	63.73

3.3.2 Límite líquido

De acuerdo con los resultados de los análisis realizados anteriormente, se puede observar que el suelo estudiado, que está compuesto principalmente por partículas finas (SF), presenta un límite líquido de 33,8%. Esto indica que el suelo tiene una consistencia plástica, lo que significa que es maleable y puede ser moldeado sin romperse. Es importante destacar que, en contraste con el suelo granular (SG) que no presentó límite líquido, el suelo fino se comporta de manera diferente al ser sometido a esfuerzos y presiones.

Figura 7. Métodos para el ensayo modificado de compactación



3.3.3 Límite plástico

En el contexto geotécnico, la presencia del "límite plástico" es una propiedad importante que define la capacidad de un suelo para comportarse como un material plástico o deformable bajo ciertas condiciones de humedad. Esta propiedad es especialmente relevante en la clasificación y caracterización de los suelos, ya que permite comprender su comportamiento mecánico y su potencial para sufrir cambios volumétricos en función de las variaciones en la humedad. El "límite

plástico" (LP) es el contenido de humedad en el cual un suelo pasa del estado plástico al estado semisólido. En otras palabras, representa la humedad crítica en la que un suelo deja de ser moldeable y se convierte en un material más rígido y quebradizo. El valor del límite plástico proporciona información sobre la plasticidad y cohesión de un suelo, lo que es fundamental para la ingeniería geotécnica y la construcción.

Desde el análisis realizado, se menciona que en el suelo granular predominante de arena no se identificó la presencia del límite plástico. Esto sugiere que el suelo en cuestión es menos propenso a presentar cambios en su consistencia y deformación debido a fluctuaciones en la humedad. Los suelos granulares, como la arena, tienden a tener baja plasticidad y cohesión debido a la falta de finos y minerales arcillosos que puedan conferirles esas propiedades. Por lo tanto, estos suelos no muestran un comportamiento plástico característico y no exhiben un límite plástico discernible.

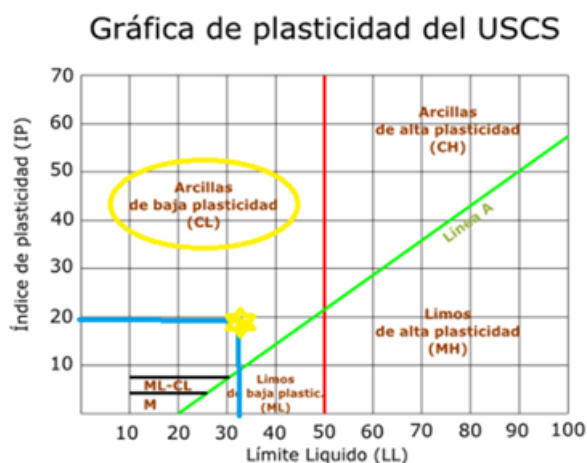
Por otro lado, se indica que el suelo fino demostró la presencia del límite plástico, con un resultado del 13.38%. Esto significa que el suelo fino es capaz de exhibir un comportamiento plástico cuando su contenido de humedad se encuentra en torno al 13.38%. Los suelos finos, como las arcillas, tienen partículas más pequeñas y pueden retener agua en sus espacios intersticiales, lo que les confiere cohesión y la capacidad de deformarse plásticamente en condiciones adecuadas de humedad.

3.3.4 Clasificación sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS)

La clasificación del suelo granular se verifica utilizando los datos arrojados en la Tabla 4 para obtener información sobre los porcentajes de grava, arena y finos presentes en el suelo granular. Además, se utiliza la Figura 2 para observar cómo el suelo se comporta al pasar por cada

paso y filtro de la clasificación granulométrica. En este caso, se determina que más del 50% del suelo pasa por el tamiz #4 y que el suelo cuenta con más del 12% de finos, según la Tabla 6. A partir de esta información, se identifican dos posibles tipos de suelo, una arena arcillosa (SC) y una arena limosa (SM), ya que el suelo cumple con los filtros para ambas clasificaciones. Sin embargo, al tener en cuenta las características físicas del suelo, como su color rojizo y su viscosidad cuando está mojado, se concluye que el suelo granular se asemeja más a un suelo arcilloso, por lo que se clasifica como una arena arcillosa (SC).

Por otro lado, para la clasificación del suelo fino en cuestión, se utilizan varios elementos. En primer lugar, se emplea la Tabla 7 para conocer los porcentajes de partículas presentes en el suelo fino (SF). Luego, se observa la gráfica de la Figura 6, donde se consideran los límites líquidos y plásticos del suelo para determinar su índice plástico. En este caso, se encuentra que el índice plástico del suelo es de 19.97 y su límite líquido es de 33.8. A partir de estos datos, se puede concluir que el suelo fino corresponde a Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad. Es importante tener en cuenta que la clasificación de suelo fino puede ser un proceso complejo y requiere de varios elementos para llegar a una conclusión precisa. En general, la clasificación de suelos es fundamental para caracterizar un suelo y tomar decisiones sobre su uso y manejo. Por lo tanto, es crucial contar con personal capacitado y experimentado en el campo de la clasificación de suelos para obtener resultados precisos y confiables.

Figura 8. Gráfica de clasificación suelo fino (CL)

3.3.5 Gravedad específica

En la Tabla 8, se presentan los valores de la gravedad específica que la norma específica para diferentes tipos de suelos, mientras en la Tabla 9 se e presenta la gravedad del suelo SC y Tabla 10 del suelo CL.

Tabla 8. Valores típicos de la gravedad específica

Tipo de suelo	Gravedad especificada (Gs)
Grava	2.65
Arena gruesa a media	2.65
Arena fina (limosa)	2.65
Loess, polvo de piedra y limo arenoso	2.67
Arena algo limosa	2.65
Limusina	2.66
Arena arcillosa	2.67 – 2.7
limo arcillo arenoso	2.67
Arcilla arenosa	2.7
Arcilla limosa	2.75

Arcilla	2.72 – 2.8
Limo con trozos de materia orgánica	2.3
Lodos aluviales orgánicos	2.13 – 2.6
Turba	1.5 – 2.15

Fuente: GMS Ingenieros Consultores S.A.S, 2020, p. 55.

La gravedad específica de las partículas sólidas de un suelo, según describe la norma es la relación entre la masa de un cierto volumen de sólidos a una temperatura dada y la masa del mismo volumen de agua destilada libre de gas a igual temperatura.

En análisis de los datos arrojados del ensayo de gravedad específica se obtuvieron y tabularon los siguientes datos:

Tabla 9. Gravedad específica de las partículas suelo SC

<i>Ps</i>	<i>Pw,t (g/cm³)</i>	<i>Ms</i>	<i>Mpws, t</i>	<i>Gs (g/cm³)</i>
1766,09773	0,99754	100.03	721.62	2,68033226

Tabla 10. Gravedad específica de las partículas suelo CL

<i>Ps</i>	<i>Pw,t (g/cm³)</i>	<i>Ms</i>	<i>Mpws, t</i>	<i>Gs (g/cm³)</i>
1693,9287	0,99754	100.03	720,03	2,5708044

Donde:

ps: Densidad de las partículas sólidas, g/cm³;

pw,t: Densidad del agua a la temperatura de ensayo, g/cm³;

Ms: Masa de los sólidos del suelo secado en el horno, g;

$M_{pws,t}$: Masa del picnómetro con agua y sólidos a la temperatura de ensayo, g

G_s : Gravedad específica de las partículas de suelo

El suelo de arena arcillosa tiene una gravedad específica en un rango de 2.67 a 2.70 g/cm³ según la Tabla 8, mientras que el suelo estudiado en este estudio SC tiene un valor de 2.68 Tabla 9. Por lo tanto, el suelo SC cumple con los valores de gravedad específica establecidos en la norma para un suelo arcilloso. Con relación al suelo CL, se ha determinado que su gravedad específica es de 2.5, valor que se encuentra dentro de los rangos establecidos por las normativas vigentes para los suelos arcillosos.

3.4 Comparación de suelos naturales y mezclados

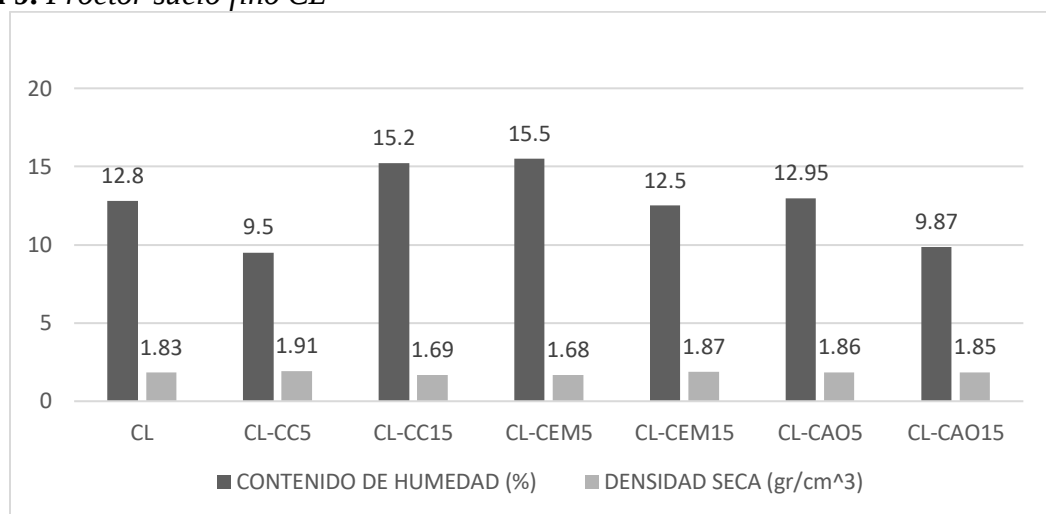
En este estudio se están analizando los datos recopilados de 42 ensayos, divididos en tres categorías distintas: 14 ensayos de Proctor, 14 ensayos de CBR (California Bearing Ratio) y 14 ensayos de compresión inconfiada. Cada ensayo ha sido subdividido en dos grupos de igual tamaño, siendo siete ensayos realizados en suelo fino de arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL) y siete ensayos en suelo granular de arena arcillosa (SC). El objetivo de este estudio es llevar a cabo un análisis comparativo y obtener información científica sobre el comportamiento y las propiedades de los suelos estudiados, considerando diferentes tipos de ensayos y características específicas de cada tipo de suelo.

3.4.1 Proctor

El propósito de estos ensayos es evaluar la capacidad de los suelos naturales y mezclados para determinar el grado óptimo de compactación y observar qué materiales agregado al suelo y en qué porcentaje de mezcla optimizan las propiedades mecánicas de los suelos naturales.

Para llevar a cabo este objetivo, se están comparando dos variables clave: el contenido de humedad y la densidad máxima del suelo. Se ha observado que cuanto menor sea el contenido de humedad, mejor será el grado de compactación del suelo. Por otro lado, se ha encontrado que una mayor densidad del suelo está asociada con una optimización mejorada de sus propiedades mecánicas, por lo tanto, se puede decir que el contenido de humedad es inversamente proporcional con respecto a la densidad.

3.4.1.1 Proctor arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL). En la Figura 9, se observa que el contenido de humedad del suelo natural CL es del 12,8% con una densidad de 1,83 gr/cm³. Entre los seis tipos de suelos mezclados, se encuentra que el suelo CL-CC5 muestra la mayor mejora, con un contenido de humedad del 9,5% y una densidad aumentada de 1,91 gr/cm³ en comparación con el suelo natural. Por otro lado, el suelo CL-CC15 empeora las propiedades de compactación y densidad, con un contenido de humedad del 15% y una densidad de 1,69 gr/cm³. Se puede afirmar que a medida que aumenta el porcentaje de CC, las propiedades del suelo disminuyen.

Figura 9. Proctor suelo fino CL

Nota: En el perfil de difracción experimental se observaron reflexiones que no pudieron ser asignadas a una fase conocida.

En la Figura 9, se observa que el segundo mejor resultado es el suelo CL-CAO15, con un contenido de humedad del 9,87% y una densidad de 1,85 gr/cm³. Aunque los suelos arcillosos generalmente se estabilizan con CAO, se puede inferir que la adición de CC al 5% proporciona mejores resultados que el uso de CAO al 5% y al 15%. Considerando la Figura 9, se puede observar que el suelo fino CL-CC5 mejora un 26% en comparación con el suelo CL, mientras que el suelo CL-CAO15 solo mejora un 23%. Esto indica que la CC es un 3% óptima que la CAO en los suelos finos.

Por otro lado, el CL-CEM15 muestra el tercer mejor resultado en la Figura 9. Sin embargo, al compararlo con el suelo natural CL, se observa que la diferencia es mínima. Según la Tabla 11, el porcentaje óptimo del contenido de humedad mejora en un 2% con el CL-CEM15, mientras que con el 5% de CEM, el porcentaje óptimo de contenido de humedad empeora en un 21%. Por lo tanto, se puede inferir que el cemento no es un buen estabilizante para suelos arcillosos.

Tabla 11. Optimización de las propiedades del suelo CI (Proctor)

<i>Nombre suelo</i>	<i>Contenido de humedad (%)</i>	<i>Densidad seca (gr/cm³)</i>	<i>Optimización del contenido de humedad (%)</i>	<i>Optimización de la densidad seca (%)</i>
CL	12,8	1,83	0,00%	0,00%
CL-CC5	9,5	1,91	25,78%	4,37%
CL-CC15	15,2	1,69	-18,75%	-7,65%
CL-CEM5	15,5	1,68	-21,09%	-8,20%
CL-CEM15	12,5	1,87	2,34%	2,19%
CL-CAO5	12,95	1,86	-1,17%	1,64%
CL-CAO15	9,87	1,85	22,89%	1,09%

Nota. En el perfil de difracción experimental se observaron reflexiones que no pudieron ser asignadas a una fase conocida.

Los resultados obtenidos en la presente investigación se compararon con tres estudios relevantes. En el primer estudio realizado por [36] se investigó el efecto de la cascarilla de arroz (Rice Husk Ash, RHA) en las propiedades geotécnicas de suelos arcillosos. Se llevaron a cabo pruebas de laboratorio utilizando diferentes porcentajes de RHA (5%, 10%, 15% y 20%) mezclados con el suelo. Se evaluaron propiedades como la densidad seca, la plasticidad y la resistencia al corte. En este estudio se encontró que el porcentaje óptimo de humedad para la compactación de los suelos arcillosos mezclados con cascarilla de arroz RHA fue del 5%, lo cual resultó en la mejor humedad de compactación. Este resultado concuerda con los resultados obtenidos en la presente investigación, donde el suelo CL-CC5 mostró la mejor humedad de compactación al utilizar un 5% CC, pero al ser diferentes materiales y tener diferentes porcentajes de composición química se procedió a evaluar un segundo estudio realizado por [37] donde también se investigó sobre el uso de ceniza de cascarilla de arroz para mejorar las propiedades de suelos arcillosos expansivos. Según este estudio, se determinó que el porcentaje óptimo de ceniza

de cascarilla de arroz para lograr los mejores resultados de compactación fue del 20%. Estos dos estudios resultan ser un poco contradictorios, esto tal vez se debe a la diferencia de suelo y la diferencia de porcentaje de composición química que tiene la cascarilla dependiendo de cómo sea su forma de transformación en ceniza. A su vez se puede decir que la ceniza de la cascarilla de arroz puede tener un porcentaje óptimo entre 5% y 20%.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la Tabla 11 y Figura 9 de la presente investigación, se puede afirmar que la CC presenta mejores propiedades de compactación en comparación con la ceniza de cascarilla de arroz. Además, se observa que al tener menor cantidad de SiO_2 la CC tiene un menor rango de porcentaje óptimo de compactación en suelo finos, ya que con 15% de Cascarilla de arroz caolinizada el suelo arcilloso en vez de mejorar aumenta su porcentaje óptimo de contenido de humedad, disminuyendo así la densidad ocasionando un deterioro más grande en suelo CL.

En un estudio relevante adicional realizado por [38] se investigó el porcentaje óptimo de cal para estabilizar suelos arcillosos. Los resultados revelaron que un porcentaje del 8% de cal proporcionó la mejor estabilización, mejorando la resistencia y la compactación del suelo arcilloso. Al comparar estos resultados con los obtenidos en la Tabla 11 de la presente investigación, se observa que el porcentaje óptimo de cal fue mayor en el estudio anterior (15%) en comparación con el presente estudio (8%). Esta diferencia podría atribuirse a posibles variaciones en la composición de los suelos arcillosos evaluados en ambos estudios.

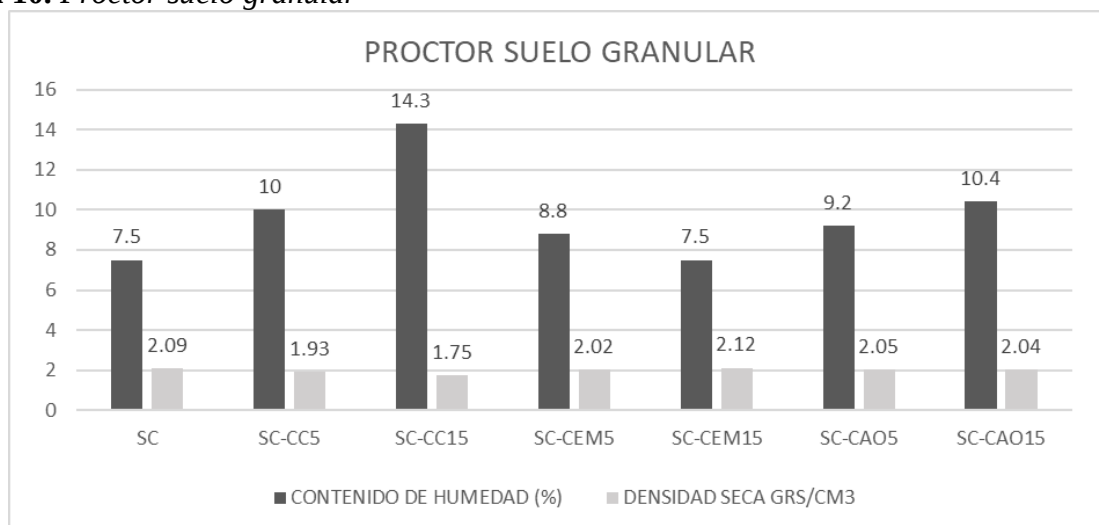
Por lo tanto, se puede decir que se necesita una menor cantidad de CC para mejorar las propiedades de los suelos expansivos, en comparación con la CAO y la ceniza de cascarilla de arroz, y que el cemento es un material de poca relevancia a la hora de estabilizar suelos expansivos como lo es la CL.

3.4.2 Proctor arena arcillosa (SC)

En la presente práctica se analiza un suelo “arena arcillosa” de humedad óptima 7.5 y de densidad máxima seca 2.09. Los valores óptimos buscados en un ensayo de Proctor son aquellos que permiten alcanzar una alta densidad y resistencia del suelo, sin comprometer la durabilidad a fin de mejorar la eficiencia de estos. La práctica tiene como objetivo evaluar los suelos para verificar su eficacia, por lo que se adicionan los porcentajes de cascarilla de arroz caolinizada, cemento y cal en cantidad de 15% y 5% para comparar su utilidad al mejorar propiedades de este tipo de suelo.

En la figura 10 se observa que de los tres materiales las humedades optimas siempre aumentan, excepto del SC-CEM5% de adición que mantiene el mismo porcentaje de humedad optima 7.5%, respecto a las densidades máximas se mantuvieron en un rango de 1.75% - SC-CC15 a 2.12% SC-CEM15.

Figura 10. Proctor suelo granular



La figura 10 proporciona información sobre diferentes adiciones al suelo SC y sus porcentajes de humedad óptima y densidad máxima. A fin de complementar, en la Tabla 12, se representa el suelo SC con los porcentajes de optimización de la humedad y la densidad seca para analizar la viabilidad que tiene adicionarle cal, cemento o cascarilla.

Tabla 12. *Optimización del contenido de humedad*

<i>Nombre del suelo</i>	<i>Contenido de humedad (%)</i>	<i>Densidad seca GRS/CM3</i>	<i>Optimización de contenido de humedad (%)</i>	<i>Optimización de la densidad seca (%)</i>
SC	7.5	2.09	0.00%	0.00%
SC-CC5	10	1.93	-33.33%	-7.66%
SC-CC15	14.3	1.75	-90.67%	-16.27%
SC-CEM5	8.8	2.02	-17.33%	-3.35%
SC-CEM15	7.5	2.12	0.00%	1.44%
SC-CAO5	9.2	2.05	-22.67%	-1.91%
SC-CAO15	10.4	2.04	-38.67%	-2.39%

Analizando los datos arrojados en la práctica se observa que la adición de cal, cemento y cascarilla de arroz caolinizada en los porcentajes trabajados no realizan modificaciones en los tipos de suelos SC. Se afirma que la poca eficiencia es porque sus características físicas, como el color, la masa y volumen de este tipo de suelos varían porque las partículas de cemento y cal reaccionan con una adición de agua óptima formando nuevos compuestos que la unen. De estos, en comparación con el suelo natural, se tiene una humedad óptima del suelo+cemento15 de 7.5%, permanece igual, mientras que del suelo+cemento5 aumenta a 8.8%. Al evaluar los resultados del suelo+cal15 aumenta significativamente a 10.4% y para suelo+cal5% tiene una humedad óptima de 9.2%.

Por otro lado, la cascarilla de arroz caolinizada facilita la aglomeración de ambas partículas para una buena compactación. Los resultados arrojan que la cascarilla de arroz caoliniza cumplan su función se necesita mayor cantidad de agua, es decir, la humedad optima del suelo+CC15 tiene una humedad optima de 14.3 y el suelo+CC5 tiene una de 10.0. Además, al realizar el laboratorio se apreció que 15% de cascarilla de arroz caolinizada genera mucho volumen.

Además, se tiene en cuenta que la mezcla de suelo SC con los materiales trabajados, no tiene una compactación inmediatamente después de la adición de agua y de la homogeneización, por lo que no realiza modificaciones considerables en su textura con rapidez. Las reacciones entre estos son lentas, dependientes del tiempo, mientras que en los suelos finos se hace posibles las reacciones rápidas entre los minerales arcillosos y los tipos de adiciones.

3.4.3 Suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada (CBR)

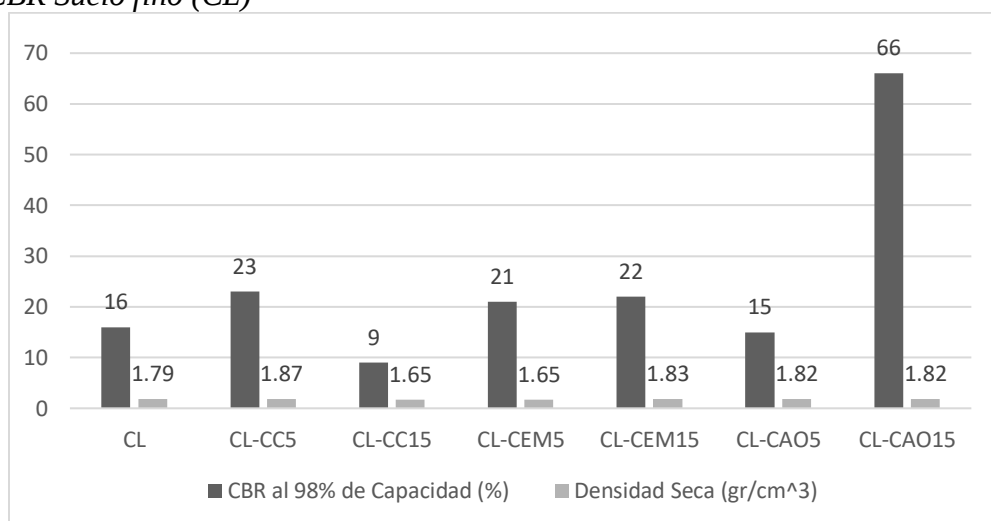
El CBR (California Bearing Ratio) es una medida adimensional que se expresa como un porcentaje. No tiene unidades específicas, ya que representa una relación entre la resistencia del suelo ensayado y la resistencia de un suelo de referencia estándar. Se mide la carga requerida para penetrar un pistón en el suelo y se compara con la carga requerida para penetrar el pistón en un suelo de referencia estandarizado. En cuanto al valor óptimo de CBR para caminos y carreteras destapadas y a rellenos, pueden variar según las especificaciones del proyecto, las condiciones del suelo y los estándares locales.

Si embargo, se puede clasificar los valores de CBR de la siguiente manera: CBR muy bajo (valores inferiores a 2%), CBR bajo (valores entre 2% y 4%), CBR medio (valores entre 4% y 8%), CBR alto (valores entre 8% y 15%), y CBR muy alto (valores superiores a 15%). Es

importante tener en cuenta que estos rangos son utilizados como una guía general y pueden variar dependiendo de las condiciones específicas del proyecto y las recomendaciones de diseño vial [33]

3.4.4 CBR Arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL)

Figura 11. CBR Suelo fino (CL)



Nota: Se ha seleccionado un valor de CBR del 98% con el fin de simular de manera más precisa las condiciones de un caso real, donde el suelo no se someterá al mismo proceso y cuidado que se tiene en el laboratorio. El significado de las siglas se encuentra en la Tabla 2. *Fuente:* Elaborada por los autores, 2023.

Como se puede observar en la Figura 11, el suelo CL-CAO15 exhibe la mayor efectividad, alcanzando un CBR del 66%. Esto se debe a que la CAO posee propiedades que reducen la plasticidad y mejoran diversas propiedades mecánicas, como la cohesión, la compresibilidad, la permeabilidad y la capacidad de drenaje. Esto conduce a una mayor estabilidad y menor deformación del suelo. La CAO actúa como un agente deshidratante al absorber el exceso de agua presente en el suelo y ayudar a controlar los cambios de humedad. Esto resulta especialmente útil en suelos con alta plasticidad y propensos a la contracción y expansión excesiva como lo es el

suelo CL. Estas afirmaciones encuentran respaldo en estudios realizados por [39] donde se demuestra que la CAO puede mejorar las propiedades de drenaje de los suelos arcillosos al reducir su permeabilidad, evitando así la acumulación excesiva de agua y mejorando la estabilidad del suelo. Otro estudio realizado por [40] muestra que la cal reacciona químicamente con los componentes arcillosos, formando productos de hidratación que aumentan la resistencia y la capacidad de soporte del suelo, lo cual respalda la razón por la cual el suelo estabilizado con cal presenta un CBR más alto.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el porcentaje de adición de CAO juega un papel crucial en los resultados. En el caso del suelo CL-CAO5, que se estabilizó con un 5% de cal, no se observó ninguna mejora e incluso se registró una disminución del 1% en el CBR en comparación con el suelo natural. Esto indica que el porcentaje de cal tiene una influencia significativa en el rendimiento del suelo CL estabilizado.

Además, se puede observar en la Figura 8 que la CC al 5% actúa como el segundo agente aglutinante más efectivo, proporcionando un CBR del 23%. Este valor se encuentra dentro del rango de CBR considerado como muy alto, lo que indica una alta capacidad de resistencia a cargas. Un estudio realizado por [41] investiga la viabilidad de utilizar la CC como material para mejorar la subrasante de pavimentos. Los resultados indican un aumento significativo en la resistencia al CBR, cumpliendo con los requisitos de diseño para su uso en la construcción de pavimentos.

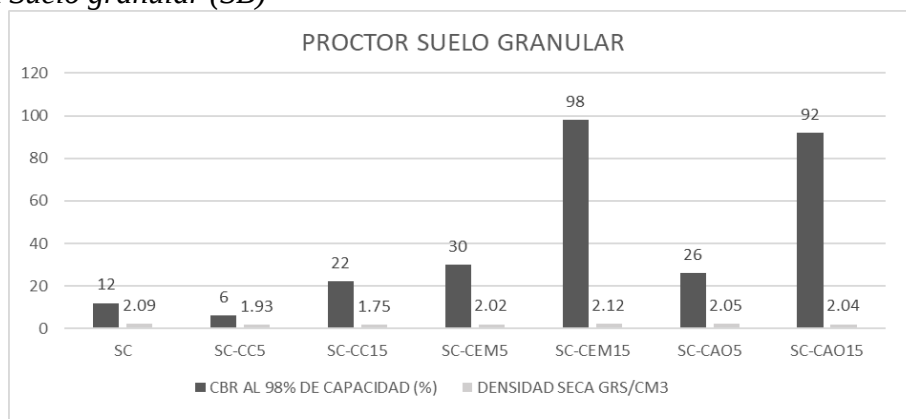
Por otro lado, un artículo de [42] demuestra que la estabilización con CAO y CC puede mejorar significativamente el CBR de suelos lateríticos. Se resalta la importancia de determinar los porcentajes óptimos de adición para lograr los mejores resultados en términos de resistencia y capacidad de soporte. Los autores realizan pruebas de laboratorio en suelos lateríticos estabilizados

con diferentes porcentajes de CAO y CC, midiendo los valores de CBR para evaluar la resistencia y la capacidad de soporte del suelo estabilizado.

3.4.5 CBR Arena arcillosa (SC)

En argumento, la composición de una arena arcillosa hace que el CBR pueda variar dependiendo de la proporción de arcilla presente en la mezcla. La arena arcillosa se compone de partículas de arena y partículas de arcilla [14] y la cantidad relativa de cada una afectará las propiedades y la resistencia del suelo. Es decir, la presencia de arcilla en una arena puede proporcionar cierta cohesión y plasticidad al suelo [1] lo que puede aumentar su resistencia. Sin embargo, la arcilla también puede hacer que el suelo sea más susceptible a la expansión y contracción debido a cambios en la humedad, lo que puede afectar su estabilidad a largo plazo. Es importante destacar que el CBR proporciona una medida relativa de la resistencia de un suelo y se utiliza principalmente para comparar diferentes materiales o para evaluar cambios en la resistencia del suelo, por lo que se procede a examinar CBR en un suelo de arenosa arcillosa realizados con adición de cascarilla de arroz caolinizada, cemento y cal. En la figura 12 se muestran los resultados obtenidos, donde se obtiene un mayor valor de CBR con adición de cemento en un 15% y el menor con un 5% de cascarilla de arroz caolinizada.

Figura 12. CBR Suelo granular (SB)



Los datos presentados en la figura 12 corresponden a los valores del CBR al 98% de capacidad y densidad seca de diferentes tipos de adiciones al suelo SC. Estos valores son indicadores importantes en la evaluación de la capacidad portante y la resistencia relativa de un suelo. Los valores de densidad seca indican la cantidad de material presente en el suelo por unidad de volumen, lo que se relaciona con la resistencia del suelo. Los suelos más densos son más resistentes. De acuerdo con la tabla proporcionada, se puede observar que el CBR al 98% de capacidad de los suelos varía entre 6 y 98%. También se puede observar que la densidad varía entre 1.75 g/cm³ y 2.12 g/cm³, siendo los suelos con mayor densidad los que presentan mayor resistencia.

A fin de complementar, en la figura 12, se representa el suelo SC con los porcentajes de optimización de la humedad y la densidad seca para analizar la viabilidad que tiene adicionarle cal, cemento o cascarilla de arroz caolinizada

Tabla 13. CBR al 98% de capacidad (%)

<i>Nombre suelo</i>	<i>CBR al 98% de capacidad (%)</i>	<i>Densidad seca GRS/CM3</i>
SC	12	2,09
SC-CC5	6	1,93
SC-CC15	22	1,75
SC-CEM5	30	2,02
SC-CEM15	98	2,12
SC-CAO5	26	2,05
SC-CAO15	92	2,04

De acuerdo con los resultados de las prácticas mostrados en Tabla 13 se afirma que la densidad es proporcional al porcentaje de capacidad de CBR, ya que el cemento con una adición de 15% SC-CEM15 tiene valor de CBR de 98% y una densidad de 2,12. Además, se observa que la cal con adición de 15% tiene un comportamiento similar, su valor de CBR 92 y de densidad 2,04.

Un artículo publicado en la Universidad Politécnica de Valencia, en el área de Ingeniería de la construcción, especifica que la utilización de cal y cemento es una alternativa de resultado ideal para obtener las consecuencias deseadas en la hora de desarrollar proyectos viales, ya que estos materiales aportan ligantes, reducen el contenido en humedad y aumentan su resistencia.

Por otra parte, se estima que la cascarilla de arroz caolinizada aun siendo un aglutinante no funciona como estabilizantes en arenas arcillosas debido a que estos materiales no tienen las propiedades para proporcionar cohesión, formar compuestos químicos y modificar las propiedades mecánicas de los suelos.

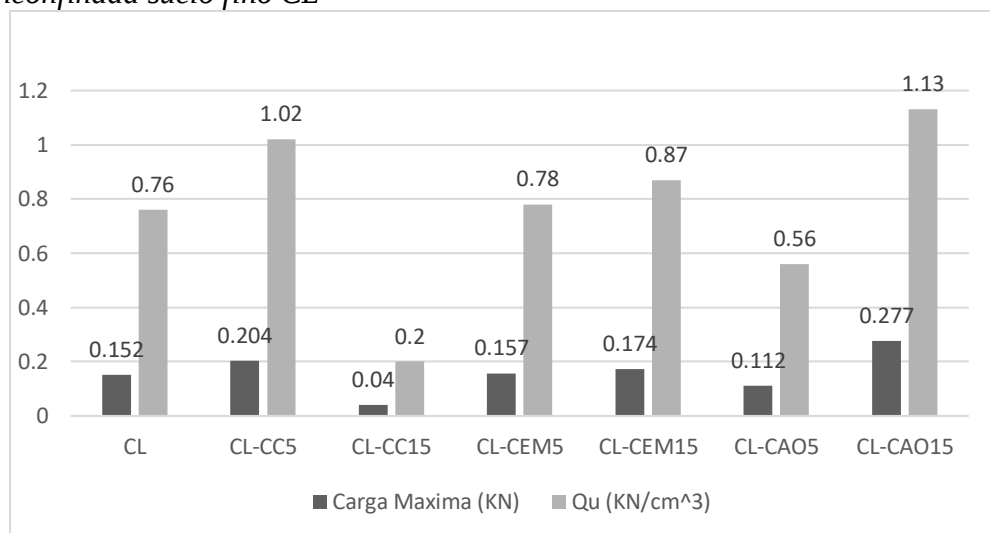
3.4.6 Compresión encofinada

En el contexto de los suelos, la compresión encofinada se refiere a la resistencia del suelo a la compresión cuando está confinado lateralmente por elementos circundantes, como muros de contención, pilotes o estructuras adyacentes.

Es importante destacar que la compresión inconfinada en suelos es un tema complejo y depende de varios factores, como la composición del suelo, su estructura, el nivel de confinamiento, la carga aplicada y las características específicas del proyecto. Para un análisis detallado y preciso, es necesario consultar a un ingeniero geotécnico o especialista en suelos con experiencia en el tema.

3.4.6.1 Inconfinada arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL).

Figura 13. Inconfinada suelo fino CL



Nota: El Qu (KN/cm³) se refiere a la carga o presión unitarias en kilonewtons por centímetro cúbico. *Fuente:* Elaborada por los autores, 2023.

En la Figura 13, se evidencia que el suelo CL-CAO15, que contiene un 15% de CAO, tiene el mejor resultado. Le sigue el suelo CL-CC5, que contiene un 5% de CC. Entre ellos, hay una diferencia de carga de 0.073 KN y una diferencia en la presión unitaria (Qu) de 0.11 KN/cm³. En tercer y cuarto lugar se encuentran los suelos con adición de CEM al 15% y al 5%, que tienen valores muy similares entre sí. En quinto lugar, está el suelo CL, que es el suelo natural sin adición de ningún material adicional. Comparándolo con este suelo, se puede observar cómo los suelos mencionados anteriormente presentaron una mejora significativa en la carga y presión unitaria.

Por último, se observa que los suelos CL-CAO5 y CL-CC15 no presentaron ninguna mejora significativa y, por el contrario, disminuyeron su capacidad de carga. El suelo CL-CAO5 tuvo un Qu de 0.20 KN/cm³ por debajo del suelo natural, y el suelo CL-CC15 tuvo un Qu de 0.56 KN/cm³ por debajo del valor normal.

En el estudio realizado por [43] el objetivo principal fue analizar y comprender la respuesta del suelo arcilloso de baja plasticidad a las cargas estáticas. Se llevaron a cabo ensayos de laboratorio utilizando muestras del suelo para obtener resultados concretos. Estos resultados indicaron que este tipo de suelo generalmente tiene una resistencia máxima relativamente baja en comparación con otros tipos de suelo. La resistencia máxima se alcanza cuando la muestra llega a su punto de falla, que puede manifestarse como un colapso, fisuración o ruptura del suelo. Por lo tanto, a ser comparados estos resultados con los resultados presentados en la figura 13, respaldan la observación de que el suelo CL, que es un suelo arcilloso de baja plasticidad, tiene una resistencia máxima baja. Por lo tanto, existe coherencia entre los resultados del estudio y la afirmación de que los suelos de baja plasticidad necesitan mejoras en sus propiedades mecánicas.

En la figura 13, se muestra que la adición de un 5% de CC y un 15% de CAO) mejora significativamente la capacidad de carga del suelo. Estos porcentajes de adición demostraron ser eficaces para mejorar las propiedades mecánicas del suelo arcilloso de baja plasticidad.

Además, se observa que una la adición de un 10% menos de CC con respecto a la de la CAO también puede estabilizar el suelo de manera similar. Esto implica que la CC en un 5% puede ser una alternativa viable y efectiva para mejorar las propiedades mecánicas de los suelos arcillosos de baja plasticidad.

Por otra parte, un estudio llevado a cabo por [44] se centra en la determinación de la cantidad ideal CAO necesaria para estabilizar suelos arcillosos de baja plasticidad. En dicho estudio, se ha observado que el porcentaje óptimo de CAO es de hasta un 10%. Sin embargo, es importante destacar que los resultados obtenidos en la Figura 13 muestran un porcentaje de CAO de un 15%. Estas discrepancias podrían atribuirse a las variaciones existentes en las características

y propiedades de los suelos utilizados en los ensayos, así como a las diferencias en el manejo experimental llevado a cabo en el laboratorio.

3.4.6.2 Inconfinada arena arcillosa (SC). Con el propósito de obtener la resistencia al corte y el comportamiento de deformación del suelo, se realizó el ensayo de inconfinada en un tipo de suelo arena arcillosa, del cual se obtuvieron los datos registrados en la tabla.

Tabla 14. *Inconfinada suelo granular*

<i>Nombre suelo</i>	<i>Carga máxima KN</i>	<i>Qu (KN/Cm3)</i>
SC	0.041	0.25
SC-CC5	0.071	0.38
SC-CC15	0.033	0.17
SC-CEM5	0.038	0.2
SC-CEM15	0.029	0.16
SC-CAO5	0.03	0.16
SC-CAO15	0.026	0.13

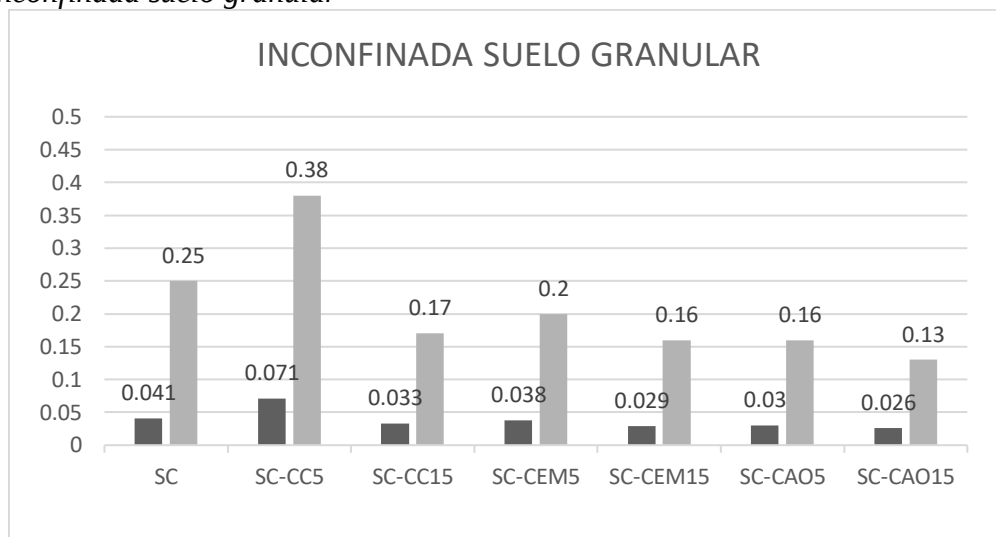
La Tabla 14 muestra los valores de carga máxima en (KN) que puede soportar el suelo en estudio. Es importante tener en cuenta que la carga máxima representa la carga máxima que el suelo puede soportar antes de experimentar una falla o deformación excesiva. También, indica el valor de la presión de esfuerzo efectivo en (KN/cm³) para cada tipo de suelo.

Entre los datos en análisis se tiene:

- El suelo natural SC: Este tipo de suelo tiene una carga máxima de 0.041 KN y una presión de contacto no drenada (Qu) de 0.25 KN/cm³.

- Suelo granular con adición de 5% de cascarilla de arroz caolinizada SC-CC5: Este suelo muestra una carga máxima de 0.071 KN y una presión de contacto no drenada (Q_u) de 0.38 KN/cm³. Es interesante observar que en comparación con el suelo SC, tiene una capacidad de carga máxima y resistencia a la compresión mejoradas.
- Suelo granular con adición de 15% de cascarilla de arroz caolinizada SC-CC15: Este suelo tiene una carga máxima de 0.033 KN y una presión de contacto no drenada (Q_u) de 0.17 KN/cm³. En este caso, la capacidad de carga máxima disminuye en comparación con el suelo SC, pero la resistencia a la compresión también se reduce.
- Suelo granular con adición de 5% de cemento SC-CEM5: Para este tipo de suelo, la carga máxima es de 0.038 KN y la presión de contacto no drenada (Q_u) es de 0.2 KN/cm³.
- Suelo granular con adición de 15% de cemento SC-CEM15: Este suelo muestra una carga máxima de 0.029 KN y una presión de contacto no drenada (Q_u) de 0.16 KN/cm³.
- Suelo granular con adición de 5% de cal SC-CAO5: La carga máxima de este suelo es de 0.03 KN y la presión de contacto no drenada (Q_u) es de 0.16 KN/cm³.
- Suelo granular con adición de 15% de cal SC-CAO15: Para este tipo de suelo, se registra una carga máxima de 0.026 KN y una presión de contacto no drenada (Q_u) de 0.13 KN/cm³.

A fin de complementar, en la figura 14, se representa el suelo SC con la carga máxima y el coeficiente Q_u para analizar la viabilidad que tiene adicionarle cal, cemento o cascarilla de arroz caolinizada.

Figura 14. *Inconfinada suelo granular*

En general, los valores de carga máxima para los diferentes tipos de suelo son relativamente bajos, lo que indica que estos suelos no son adecuados para soportar cargas significativas sin el uso de técnicas de refuerzo o estabilización del suelo. Los valores más altos se observan en los suelos con mayor contenido de arcilla (SC-CC5 y SC-CC15), lo que se debe a la mayor cohesión y resistencia al corte de los suelos arcillosos en comparación con los suelos arenosos y limosos.

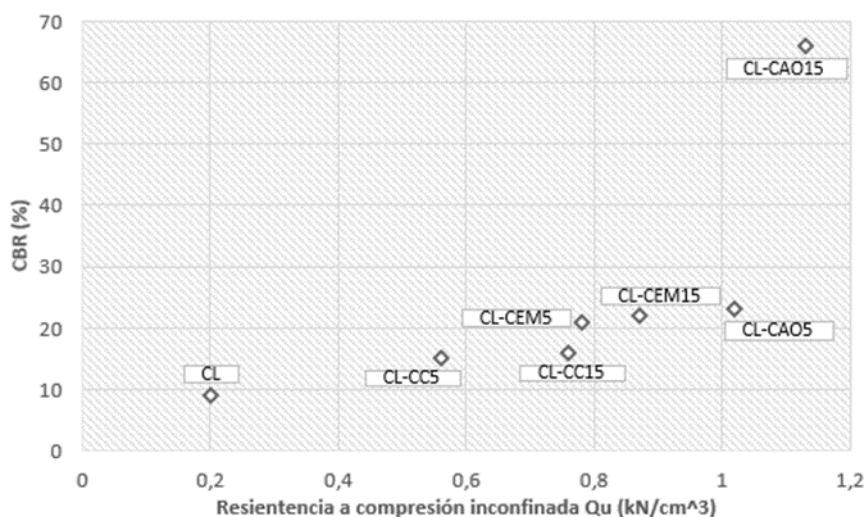
3.4.7 Correlación de los datos

En el presente estudio se examina la correlación de los datos obtenidos de cada muestra de suelo mediante la realización de múltiples ensayos de caracterización mecánica. Se utiliza una representación gráfica de dispersión con el fin de evaluar la relación existente entre las variables analizadas.

El análisis se lleva a cabo considerando los diferentes ensayos realizados en cada muestra de suelo. Estos ensayos que incluyen parámetros como la resistencia a la compresión, la densidad, la permeabilidad y otros indicadores relevantes de la caracterización mecánica del suelo.

En la Figura 15 se presenta una representación gráfica que muestra una relación entre el índice de resistencia CBR y la resistencia a la compresión no confinada en el suelo de tipo CL y en sus respectivas mezclas. Esta relación sugiere una posible proporcionalidad directa entre el CBR y la resistencia a la compresión, indicando que al aumentar el valor del CBR, la resistencia a la compresión también se incrementa en una medida similar.

Figura 15. *Dispersión CBR versus resistencia a compresión inconfina suelo CL*



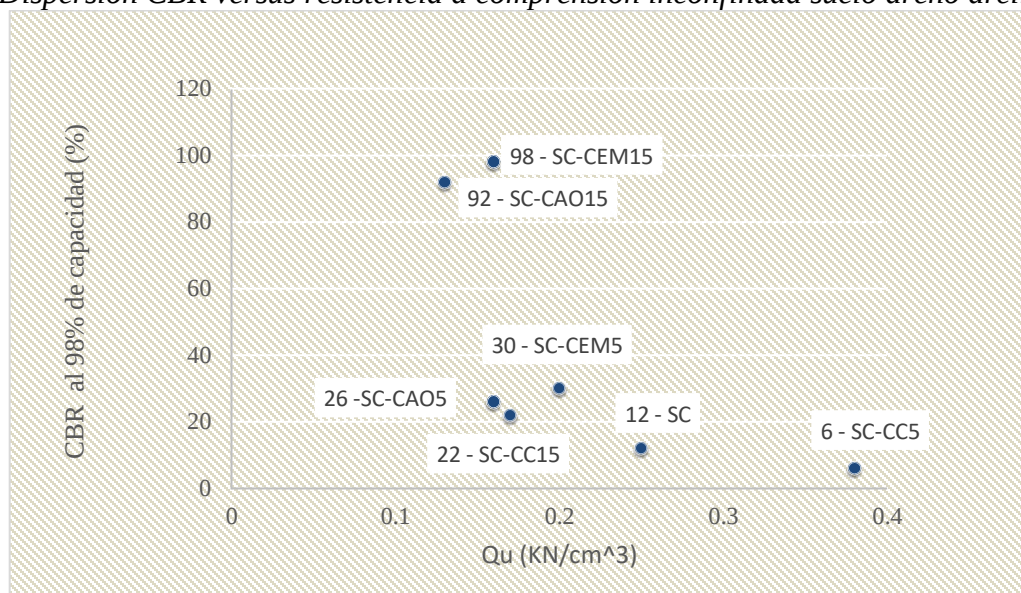
Además, se puede observar en la Figura 15 que los suelos CL-CAO15 y CL-CC5 ocupan los primeros dos puestos en términos de mejoramiento del suelo CL. Esto implica que estos dos suelos muestran un mayor grado de mejora en comparación con otros suelos analizados en el estudio.

El suelo CL-CAO15 ocupa el primer puesto en el mejoramiento del suelo CL, lo cual indica que ha experimentado una significativa mejora en sus propiedades y características en comparación con los demás suelos. Esto podría deberse a la aplicación de un aditivo o método específico que ha demostrado ser eficaz en el aumento de las propiedades deseables del suelo CL.

El suelo CL-CC5 ocupa el segundo puesto en el mejoramiento del suelo CL. Aunque no alcanza el nivel de mejora del suelo CL-CAO15, aún muestra un desempeño notable en términos de mejoramiento. Esto sugiere que se han implementado de la CC al 5% han contribuido a mejorar las características del suelo CL y han logrado resultados positivos en términos de su resistencia y capacidad de carga y con un porcentaje menor que la CAO.

En la figura 16 se representa la correlación entre las dos propiedades: la densidad aparente (Q_u) (KN/cm^3) y el índice de soporte de California (CBR) al 98% de capacidad. El objetivo es explicar si existe una relación entre las propiedades.

Figura 16. *Dispersión CBR versus resistencia a compresión inconfiada suelo areno arcilloso*

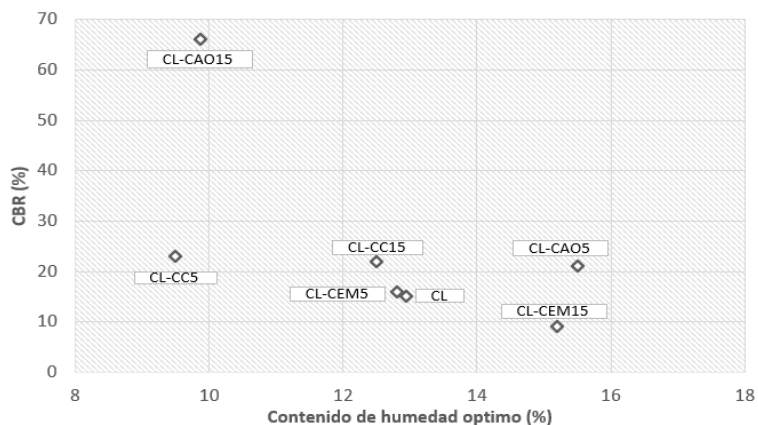


En base a los datos proporcionados y considerando en la figura 16 se afirma que a medida que el valor de Q_u disminuye, el valor de CBR tiende a aumentar, se considera, una la correlación inversa débil entre la resistencia a compresión inconfiada Q_u y CBR al 98% de capacidad. Por otra parte, se apreció una mejora continua del suelo natural el cual presenta un CBR de 12 y resistencia a compresión inconfiada de 0.25. Las mejoras más idóneas son con cemento y cal en proporciones de 15% que tienen un CBR de 98 y 92 consecutivamente. Sin embargo, en la resistencia a compresión inconfiada de 0.13 y 0.16 de carga máxima, se confirma la correlación inversa débil.

Respecto a la cascarilla de arroz caolinizada, objeto de estudio, con 15% de adición tiene un CBR de 22 mientras que con 5% de adición el CBR disminuye a 6, con la resistencia a la compresión inconfiada sus resultados son 0.17 y 0.38. Se considera una mejora en su resistencia cuando la adición es 15%, pero poca significativa.

En la figura 17 se observa una correlación entre el porcentaje de CBR y el contenido de humedad en los suelos. Se evidencia que a medida que el porcentaje de CBR mejora, es decir, aumenta, el contenido de humedad en los suelos tiende a disminuir. Esto sugiere que un mayor CBR está asociado a una menor cantidad de agua presente en los suelos CL analizados.

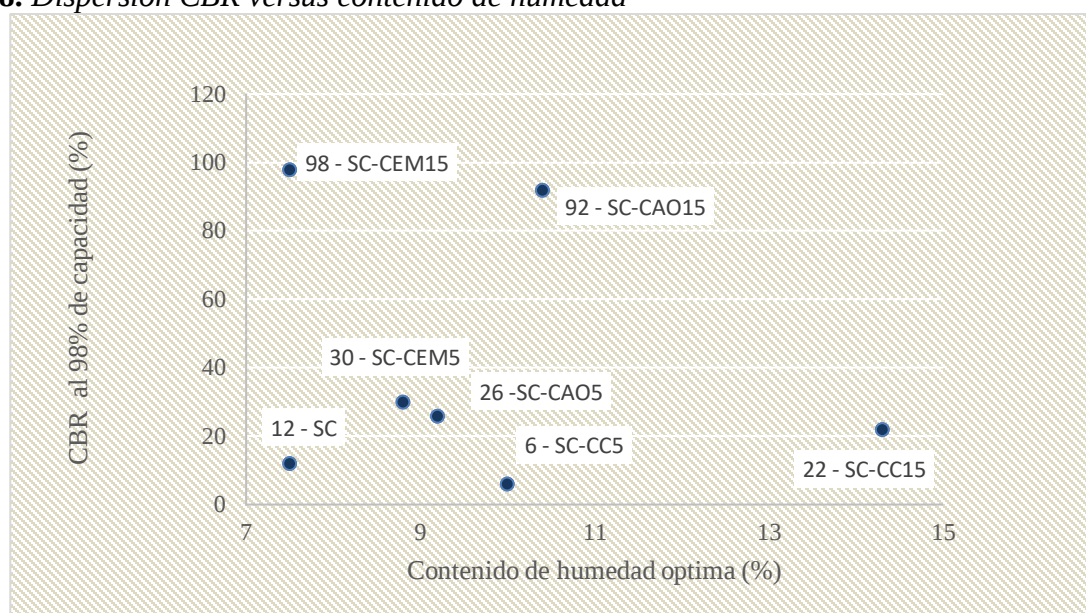
Figura 17. *Dispersión CBR versus contenido de humedad*



Sin embargo, es importante destacar que el suelo CL-CC5 logra alcanzar un mejor contenido de humedad mientras cumple con el objetivo de compactación, aunque su porcentaje de CBR es inferior al del suelo CL-CAO15. A pesar de esta diferencia, el suelo CL-CC5 logra reducir la cantidad de agua necesaria para compactar el suelo y aumentar su resistencia significativamente.

En la figura 18 los datos proporcionados contienen información sobre la humedad óptima y el índice de soporte de California (CBR) al 98% de capacidad para un suelo areno arcilloso.

Figura 18. *Dispersión CBR versus contenido de humedad*



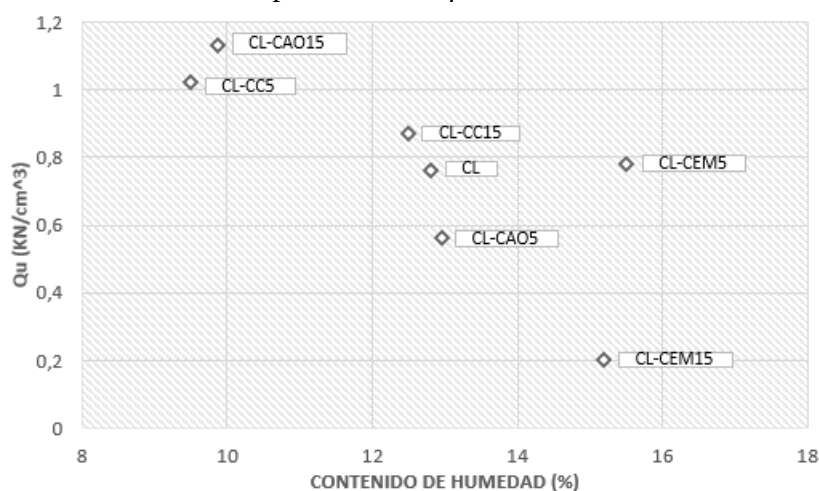
Examinando los datos representados en la gráfica 17, la humedad óptima varía en cada tipo de suelo. Algunos suelos, como "SC-CC15", tienen una humedad óptima relativamente alta (14.3%), mientras que otros, como "SC-CEM15", tienen una humedad óptima más baja (7.5%).

En términos de CBR al 98% de capacidad, también hay variaciones entre los diferentes tipos de suelo. Algunos suelos, como "SC-CEM15" y "SC-CAO15", tienen valores de CBR más altos (98% y 92%, respectivamente), lo que indica una mayor capacidad de soporte. En contraste,

suelos como "SC-CC5" tienen un CBR más bajo (6%). No se encuentra una relación proporcional ya que la cantidad optima de agua no interfirió en el mayor o menor valor de CBR. Respecto a la cascarilla de arroz caolinizada con 5% de adición al suelo areno arcilloso tiene una humedad optima de 10% el cual aumento respecto al suelo sin adición y el CBR bajo, es decir su resistencia es desfavorable. También, se observa en la adición de 15% una humedad optima de un 14.3% y su CBR asciende a 22, muestran un nivel de calidad o rendimiento relativamente bajo en términos geotécnicos respecto a las muestras con cal y cemento.

En la figura 18, se puede observar la relación entre la resistencia a la compresión no confinada y el contenido de humedad en los suelos. Al igual que en la figura 19, se evidencia que a medida que el contenido de humedad disminuye, la resistencia a la compresión aumenta.

Figura 19. *Dispersión resistencia a compresión inconfiada versus contenido de humedad*



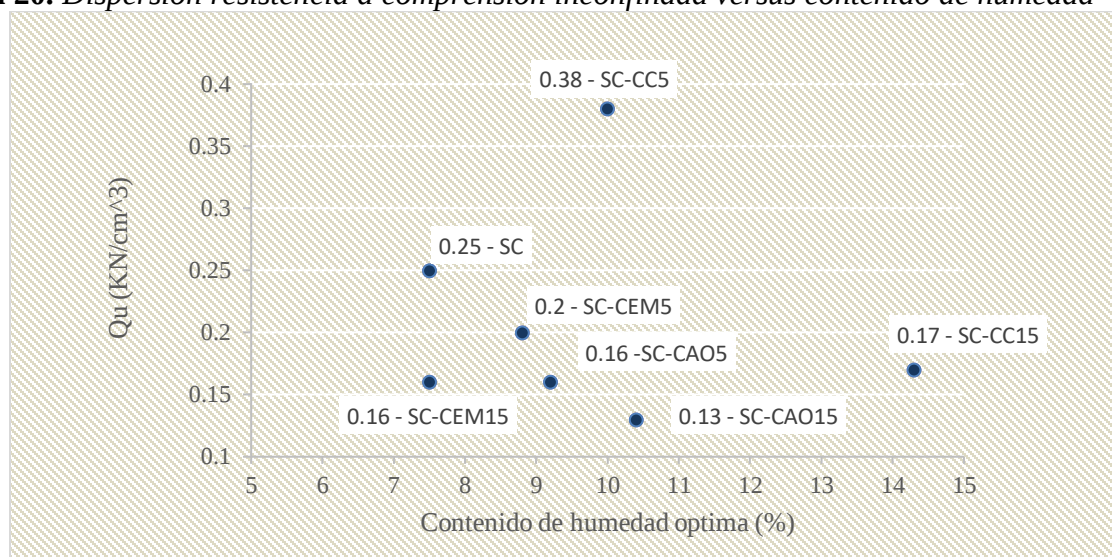
En esta figura (Figura 19), también se mantiene el patrón observado anteriormente, donde el suelo CL-CC5 muestra una mejora significativa en ambos aspectos. Sin embargo, continúa en segundo lugar en términos de resistencia a la compresión no confinada en comparación con el

suelo CL-CAO15. A pesar de esto, el suelo CL-CC5 logra reducir considerablemente el contenido de humedad necesario para la compactación del suelo.

Estos hallazgos indican que el suelo CL-CC5 presenta un desempeño destacado al lograr una mayor resistencia a la compresión con un menor contenido de humedad en comparación con otros suelos analizados. Aunque se mantiene en segundo lugar en cuanto a la resistencia a la compresión en comparación con el suelo CL-CAO15, su contenido de humedad para lograr la compactación del suelo es considerablemente menor.

En la figura 20 se representan gráficamente los datos de la resistencia a la compresión inconfiada y el contenido de humedad optima a fin de ver la relación en ambos comportamientos y si los resultados obtenidos tienen alguna influencia.

Figura 20. *Dispersión resistencia a compresión inconfiada versus contenido de humedad*



Inicialmente, se resalta que la humedad optima en los suelos con adición de cal, cemento y cascarilla de arroz en proporción de 5% y 15% aumento o permaneció igual. En la figura 20 se presenta humedad y resistencia a la compresión inconfiada muy variadas, no se mantiene una

relación proporcional. La mayor humedad optima la tiene la cascarilla de arroz caolinizada y resistencia a la compresión inconfiada baja (0.17). La cal y el cemento en porcentajes de 5% y 15% mantiene un rango de humedad optima de 7.5 a 10.4 y una resistencia a la compresión inconfiada entre 0.12 a 0.20. La mayor Q_u y humedad optima la presenta el suelo natural, por lo tanto, en esta correlación los materiales trabajados no modificaron la calidad del suelo.

Desde la perspectiva de lo todo expuesto, además, el análisis de la huella de carbono es esencial para comprender el impacto ambiental de diferentes materiales utilizados en la construcción, como el cemento, la cal y la cascarilla de arroz caolinizada (CC). Esta evaluación no solo considera las emisiones directas de dióxido de carbono (CO_2) durante su producción, sino también otros factores como el proceso de colonización microbiana que puede influir en las emisiones netas a lo largo del ciclo de vida del material [47].

Inicialmente, la producción de cemento es un proceso intensivo en emisiones de CO_2 debido a la liberación de dióxido de carbono durante la descarbonatación del carbonato de calcio en la materia prima (generalmente piedra caliza) y durante la calcinación del carbonato de calcio en el horno. Además, la energía requerida para calentar el horno contribuye a las emisiones. El cemento Portland, ampliamente utilizado, tiene una huella de carbono considerable. Las emisiones de CO_2 pueden reducirse a través de técnicas como el uso de materiales alternativos, como las cenizas volantes, y la captura y almacenamiento de carbono [48].

Por su parte, la producción de cal también libera CO_2 , principalmente durante la calcinación de la piedra caliza (carbonato de calcio). El proceso de calcinación implica la separación del CO_2 del carbonato de calcio, lo que conlleva emisiones directas. Sin embargo, en comparación con el cemento, la producción de cal tiende a liberar menos CO_2 por tonelada producida. Se pueden aplicar tecnologías de captura de carbono para mitigar las emisiones de CO_2 .

Así mismo, el proceso de caolinización de la cascarilla de arroz involucra la modificación de sus propiedades físicas y químicas, lo que podría tener implicaciones en su huella de carbono. La etapa de calcinación durante la caolinización podría generar emisiones de CO₂, aunque en una escala menor en comparación con la producción de cemento y cal. La cascarilla de arroz en sí puede ser un material con baja huella de carbono, pero es importante considerar el proceso de caolinización en el análisis [49].

Por último, el proceso de colonización microbiana se refiere a la formación de comunidades de microorganismos en la superficie de los materiales. Algunas de estas comunidades pueden absorber dióxido de carbono de la atmósfera durante su ciclo de vida, lo que puede tener un efecto positivo en la huella de carbono neta del material.

4. Conclusiones

De manera lógica y también en consecuencia a lo que ha sido el proceso y resultado en el desarrollo de este proyecto se han establecido factores de carácter concluyente alrededor de las temáticas estudiadas; esto, además ha logrado evidenciar y ser también un proceso para referenciar resultados e iniciativas en un tiempo futuro.

La cascarilla de arroz caolinizada, rica en óxido de silicio (SiO_2), se perfila como un potencial aglutinante, en paralelo con la cal y el cemento, gracias a sus similitudes en términos de propiedades aglutinantes, resistencia y durabilidad. Además del SiO_2 , se detectan compuestos como óxido de potasio (K_2O), óxido de fósforo (P_2O_5), óxido de calcio (CaO), óxido de magnesio (MgO) y óxido de aluminio (Al_2O_3), que robustecen su capacidad aglutinante.

La adopción de la cascarilla de arroz caolinizada como aglutinante en el mejoramiento de suelos para rellenos y capas sin tratamiento superficial conlleva beneficios medioambientales relevantes en comparación con la cal (CAO) y el cemento (CEM). No solo se minimizan las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), sino que también se aprovecha un excedente agrícola sustancial. Esta elección acarrea mejoras en la calidad del aire al erradicar la quema en vertederos, evitando la liberación de partículas contaminantes (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) perjudiciales para la salud respiratoria. Además, se preserva la calidad del agua al evitar el desecho en fuentes hídricas y se atenúa la generación de gases de efecto invernadero, reduciendo el impacto en el cambio climático.

La cascarilla de arroz, por su accesibilidad y costo reducido, se erige como una promisorio alternativa en la industria de la construcción, generando perspectivas económicas. Asimismo, su empleo como aglutinante estimula la economía circular, otorgando un uso eficiente a los residuos de la producción arroceras, y brindando a la industria la capacidad de rentabilizar sus desechos [50].

La eficacia de la cascarilla de arroz caolinizada para mejorar las características de suelos de arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL) se constata en su capacidad de aumentar la plasticidad, la resistencia mecánica y la estabilidad. Sus propiedades estabilizadoras disminuyen la expansión y contracción del suelo, mitigando la contracción y la erosión. Sin embargo, su uso en suelos arcillosos de baja plasticidad requiere una mayor cantidad de agua en comparación con la cal y el cemento.

Los resultados confirman que la adición adecuada de cemento y cal en el suelo arenoso arcilloso (SC) repercute en mejoras sustanciales en la resistencia, evidenciadas por altos valores de California Bearing Ratio (CBR) y densidades superiores. Por otro lado, aunque la cascarilla de arroz caolinizada no logra estabilizar de manera eficaz las arenas arcillosas, demuestra capacidad de aglomeración y compactación. Los suelos arcillosos presentan mayores valores de carga máxima debido a su mayor cohesión y resistencia al corte.

Referencias

- [1] H. Blanco Prada, "Glosario de Términos (Ingeniería Civil)," [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/7799970/GLOSARIO_DE_TERMINOS_Ingenier%C3%ADa_civil.
- [2] O. Llanos-Páez, A. Navarro-Ríos, C. A. Jaramillo-Páez, y L. F. Rodríguez-Herrera, "La cascarilla de arroz como una alternativa en procesos de descontaminación," P+L, vol. 11, no. 2, 2016.
- [3] E. Geoxnet, "<https://post.geoxnet.com/clasificacion-de-suelos/>," 4 agosto 2019. [En línea]. [Último acceso: 26 mayo 2023].
- [4] Geopolymersolutions, "Estabilización del suelo," [En línea]. Disponible: <https://www.geopolymertech.com/es/estabilizacion-del-suelo/>. [Último acceso: 26 mayo 2023].
- [5] SGS, "<https://www.sgs.com/es-mx/services/gravedad-especifica-y-densidad-aparente/>," [En línea]. disponible: <https://www.sgs.com/es-mx/services/gravedad-especifica-y-densidad-aparente/>. [Último acceso: 26 mayo 2023].
- [6] ABC Geotechnical Consulting, "<https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/glossary/>," [En línea]. disponible: <https://geotecniaymecanicasuelosabc.com/glossary/>. [Último acceso: 26 mayo 2023].
- [7] Universidad de Almería Servicios Centrales de Investigación, "<https://www.ual.es/universidad/serviciosgenerales/stecnicos/analisis-elemental/fluorescencia-de-rayos-x>," [En línea]. Disponible: <https://www.ual.es/universidad/serviciosgenerales/stecnicos/analisis-elemental/fluorescencia-de-rayos-x>. [Último acceso: 26 mayo 2023].
- [8] Safety Culture, "<https://safetyculture.com/es/temas/relleno-en-construccion/>," [En línea]. Disponible: <https://safetyculture.com/es/temas/relleno-en-construccion/>. [Último acceso: 26 mayo 2023].

- [9] A. Valverde Granja, "La Cascarilla de Arroz, Un Residuo Con Un Alto Potencial Energético," KS Omniscriptum Publishing, 2012.
- [10] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), "Encuesta Nacional de Arroz Mecanizado (ENAM)," DANE, Bogotá, 2021.
- [11] G. C. Pérez, Evaluación del uso de la cascarilla de arroz como agregado orgánico en morteros de mampostería, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2010.
- [12] A. Ferre, «La paja del arroz amenaza el ecosistema,» BBC Mundo, 2010.
- [13] C. G. F. & S. M. Pérez, «Informe de ingeniería geotécnica de la construcción,» Universidad de los Andes, 2016.
- [14] C. R. C. & M. J. Álvarez, «Caracterización física y mecánica de suelos arenosos de la región costera del Caribe Colombiano,» Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [15] Castro Cuadra, Axel Franco. "Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante." Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería, 2017.
- [16] L. Y. Llamoga Vásquez, "Evaluación del potencial de expansión y capacidad portante de suelos arcillosos usados en subrasantes al adicionar ceniza de cascarilla de arroz, Cajamarca 2016." [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/11537/11195>
- [17] E. A. Chicaiza Estevez y F. J. Oña Oña, "Estabilización de arcillas expansivas de la provincia de Manabí con puzolana extraída de ceniza de cascarilla de arroz," 2018.
- [18] K. K. Flores Isminio y K. Kassandra, "Estabilización de subrasante utilizando puzolánico de cascarilla de arroz y cal para mejorar la capacidad portante," Universidad Cesar Vallejo, San Martín, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/47893>
- [19] F. A. Tunque Cruz, "Estabilización de subrasantes blandos empleando resina natural de pino, trocha carrozable Mayupata, San Pablo, Cusco," Universidad Cesar Vallejo Repositorio Digital Institucional, 2021.
- [20] D. C. & E. C., "Origen formación y constitución del suelo, fisicoquímica de las arcillas," 2016.

- [21] Ministerio de transporte y comunicaciones, Manual de carretera, 2013.
- [22] J. F. Rivera, A. Aguirre-Guerrero, R. Mejía de Gutiérrez y A. Orobio, "Estabilización química de suelos - Materiales convencionales y activados alcalinamente (revisión)," Informador Técnico, 10 de junio de 2020. DOI: 10.23850/22565035.2530.
- [23] O. Coronado Zuloeta, "Estabilización de Suelos Granulares No Cohesivos de Lambayeque Aplicando Bacterias Calcificantes," [En línea]. DOI: 10.26495/tzh.v12i1.1250, Recepción: 24 de septiembre 2019, Aprobación: 28 de diciembre 2019.
- [24] Martinez Chavez, Esther, "Estabilización de Suelos Cohesivos con Aditivo Orgánosilanos a Nivel de Subrasante," Universidad Peruana Los Andes, 2020.
- [25] I. A. & M. J. Góngora O., "Estabilización y mejoramiento de las características físicas y químicas de los suelos a partir de mezclas con cal y escombros de material de canales de riego," 2017.
- [26] V. E., "El valor nutritivo de los subproductos del arroz en Costa Rica. Composición química, disponibilidad y uso," Nutrición animal tropical, vol. 2, nº 1, pp. 31-50, 1995.
- [27] A. S. L. B. & M. Y. J. P. Valverde G., "Análisis comparativo de las aracteristicas fisico-químicas de la cascarilla de arroz," Scientia Et Technica, vol. 1, nº 37, 2007.
- [28] INVIAS, "Determinación de los Tamaños de las Partículas de los Suelos, INV-E 123-13," INVIAS, Bogotá, Colombia, 2013.
- [29] INVIAS, "INV E-125-13 Determinación del Límite Líquido de los Suelos," Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia, 2013.
- [30] INVIAS, «INV E-126-13 Límite plástico e índice de plasticidad de los suelos,» Instituto Nacional de Vías., Bogotá, Colombia, 2013.
- [31] INVIAS, «INV E-128. Gravedad Específica,» Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia, 2013.
- [32] INVIAS, «INV E-142-13 Ensayo Modificado de Compactación,» Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia, 2013.

- [33] INVIAS, «INV E-148-13. CBR de suelos compactados en el laboratorio y sobre muestra inalterada,» Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia, 2013.
- [34] INVIAS, “INV E-152-07. Compresión encofinada,” Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia, 2007.
- [35] N. U. S. M. A. A. M. M. A. B. A. H. M. D. S. H. & B. A. Amin, “Preparación y caracterización de arcilla adherida a sílice de alta resistencia refractaria mediante la utilización de residuos agrícolas Preparación y caracterización de sílice refractaria de alta resistencia unida a arcilla utilizando residuos agrícolas,” *Construction and Building Materials*, 2017.
- [36] M. & S. S. Sharma, “Effect of rice husk ash on Geotechnical properties of soil,” *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2016.
- [37] O. O. & A. O. R. O.A. Raheem, “effect of Rice Husk Ash on the geotechnical properties of expansive clay soil,” *Construction and Building Materials*, 2013.
- [38] H. J. A. Tacca, “Estabilizacion de suelos arcillosos con cal (Tesis de pregrado),” Universidad César Vallejo, Perú, 2018.
- [39] R. D. & B. R. C. Barksdale, “Effect of lime on the hydraulic conductivity of clayey soils,” *Transportation Research Record*, pp. (913), 33-40., 1983.
- [40] J. D. & M. D. J. Nelson, “Lime stabilization of clay minerals and soils,” *Soil Improvement: State-of-the-Art Repor*, pp. t, 4, 307-344., 1992.
- [41] Z. A. H. & H. M. R. Al-Khafaji, “Utilization of caolinized rice husk waste as a potential material for pavement subgrade improvement,” *Construction and Building Materials*, pp. 73, 223-229., 2014.
- [42] Q. D. H. T. L. D. & L. H. T. Nguyen, “Mechanical and microstructural behavior of lateritic soil stabilized with lime and kaolinized rice husk ash,” *Construction and Building Materials*, pp. 201, 61-74., 2019.
- [43] J. G. R. & M. M. López, «Behavior of a low plasticity clayey soil under static loading conditions,» *Geotechnical Engineer*, 2018.

- [44] A. J. B. & D. C. Smith, "Optimum lime content for stabilization of low plasticity clayey soils," *Geotechnical Engineering Journal*, pp. 42(2), 124-135, 2015.
- [45] A. C. D. Newman - "Chemistry of Clays," 1987.
- [46] B. Velde, "Introduction to Clay Minerals: Chemistry, Origins, Uses and Environmental Significance" 2006.
- [47] C. A. Arcos, D. Macías Pinto, and J. E. Rodríguez Páez, "La cascarilla de arroz como fuente de SiO₂," *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, no. 41, pp. 7-20, 2007.
- [48] D. C. Bain y B. A. Goodman, "Introduction to the Technology of Ceramics" 1971.
- [49] R. A. Schoonheydt y C. A. T. van den Berg, "Clay Minerals in Nature: Their Characterization, Modification and Application" 2017.
- [50] R. E. Grim, "Clay Mineralogy," Segunda edición, 1968.
- [51] GMS Ingenieros Consultores S.A.S, "CONSULTORÍA PARA LA REALIZACIÓN DE DISEÑOS DE LA AMPLIACIÓN DE LA PPAP DEL SISTEMA DE SOPETRÁN, GMS INGENIEROS CONSULTORES S.A.S ESTUDIO GEOLÓGICO – GEOTÉCNICO PPAP SOPETRÁN," agosto de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.appaura.com.co/repository/PR-2021-006-0015.pdf>

Apéndices

Apéndice A. *prototipo “Mejora de suelos arcillosos de baja plasticidad (CL) con cascarilla de arroz caolinizada.”*

Nota: véase archivo en fuente externa

Apéndice B. *cartilla “Evaluación de la cascarilla de arroz caolinizada para el mejoramiento de suelos.”*

Nota. véase archivo en fuente externa