

EVALUACIÓN DE LA
CASCARILLA DE ARROZ CAOLINIZADA
PARA EL MEJORAMIENTO DE SUELOS



UNIVERSIDAD
SANTO TOMÁS

DIRECTIVOS UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL BUCARAMANGA

Fray Oscar Eduardo GUAYÁN PERDOMO, O.P.
Rector Seccional

Fray Mauricio GALEANO ROJAS, O.P.
Vicerrector Académico

Fray Rubén Darío LÓPEZ GARCIA, O.P.
Vicerrector Administrativo y Financiero

Jorge Luis GÓMEZ SUÁREZ
Secretario General

Fray Edgar Leonardo GUTIÉRREZ RIVEROS, O.P.
Decano de Ingenierías y arquitectura

ISBN:

Pregrado en Ingeniería Civil
©Universidad Santo
Tomás Bucaramanga,
Colombia Enero 2023

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

Autores:

Stephanie Julieth González Oñate
Sara Lucía Guayan

Germán Hernando ACEVEDO CALDERÓN
Tutor Semillero

Edwin LEÓN MORO
Decano Facultad de Ingeniería Civil

Yudy Natalia FLÓREZ ORDOÑEZ
Directora de la dirección de investigación e innovación

Silvia Fernanda SARMIENTO SÁNCHEZ
Secretaria Dirección de Investigación e Innovación

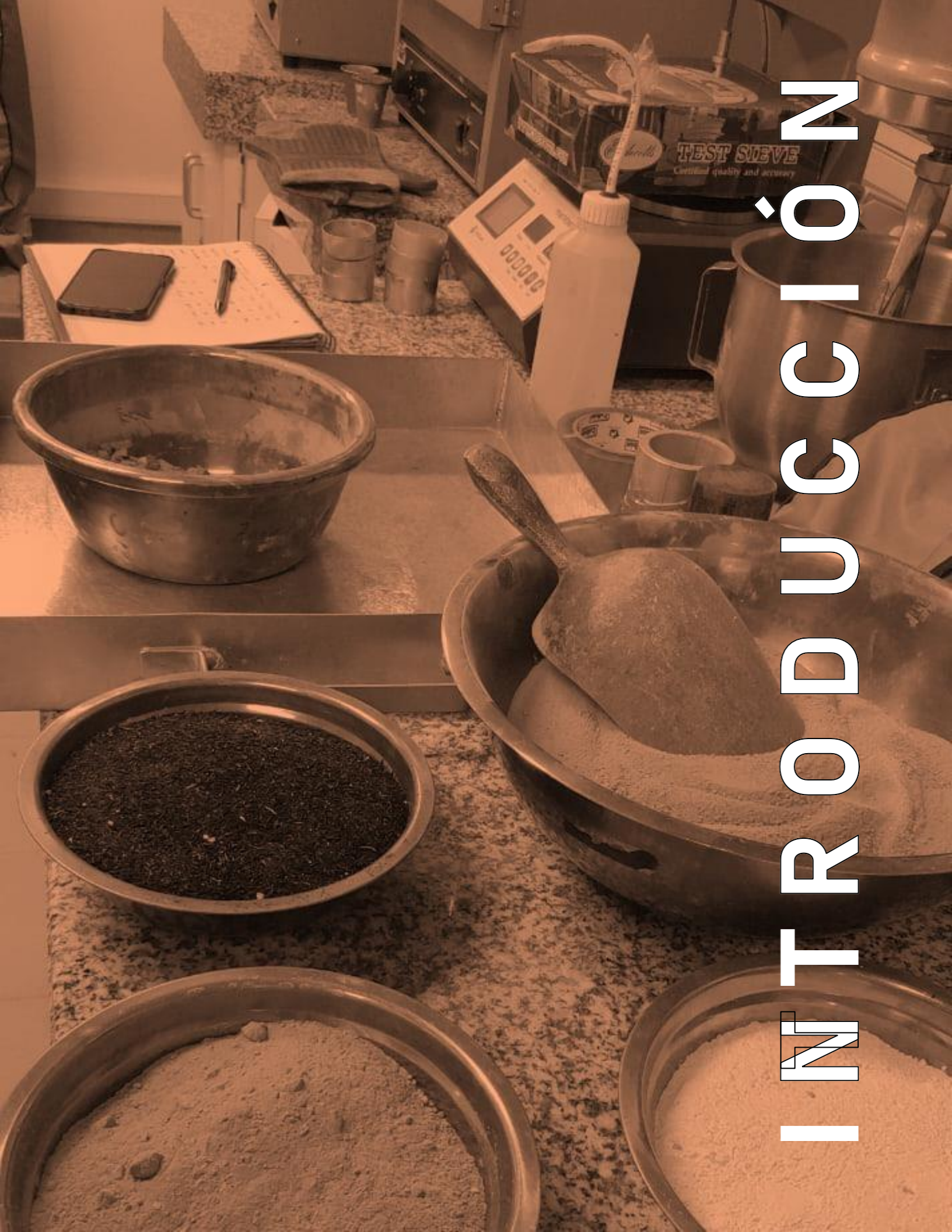
Fray Edgar Leonardo GUTIÉRREZ RIVEROS, O.P.
Decano de Ingenierías y arquitectura

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
Seccional Bucaramanga, Colombia
Carrera 18 No. 9-27


Línea gratuita nacional: 01-8000-917044
Bucaramanga, PBX: (+57) 6076985858

CONTENIDO

CAPITULO 1:		1
Caracterización de la cascarilla de arroz		
CAPITULO 2:		5
Proceso y analisis		
CAPITULO 3:		9
Línea térmica y laboratorios		
CAPITULO 4:		18
Conclusiones		



INTRODUCCIÓN

A background image showing rice stalks in a field, slightly out of focus, with the rice grains visible on the stalks.

La cascarilla de arroz es la capa protectora externa y dura del grano de arroz que se separa de este durante el proceso de molienda, y representa el principal residuo agrícola derivado de este cultivo.

El impacto ambiental generado por la cascarilla de arroz es significativo, teniendo en cuenta que la producción de arroz en nuestro país representa el 90% de la economía en cerca de 211 municipios, los cuales desechan este subproducto en grandes cantidades y de forma inadecuada convirtiéndolo en un problema para el medio ambiente y la salud de las personas al ser un contaminante del agua, el aire y el suelo.

Las potenciales propiedades aglutinantes de la cascarilla de arroz al ser caolinizada nos llevan a evaluar la influencia que esta podría tener en el mejoramiento de las propiedades mecánicas de los suelos granulares y finos utilizados en materiales de relleno o en capas de rodamiento sin tratamiento superficial, dándole así mayor utilidad a estos residuos y contribuyendo de paso a la reducción del impacto medio ambiental generado por ellos.

CAPÍTULO



1

Caracterización de la cascarilla de arroz

La caracterización de la cascarilla de arroz resulta de gran utilidad para conocer sus propiedades químicas. Para este estudio la caracterización se realizó en el Laboratorio de Rayos X de la Universidad Industrial de Santander por medio de un equipo D8 Discover, producido por la empresa alemana Bruker, uno de los más avanzados y eficientes disponibles en el mercado actual, el cual permite obtener información precisa y detallada sobre la composición química de la cascarilla de arroz.



Imagen 1: Cascarilla de arroz sin proceso de transformación (izquierda) y cascarilla de arroz caolinizada (derecha)

Los ensayos realizados fueron el **DRX-03** y el **FRX-02**.

El **DRX-03** es un método de ensayo que mediante un sistema compuesto por un tubo de rayos X y un detector de alta sensibilidad, nos brinda información detallada acerca de la estructura cristalina de la muestra en cuestión

El **FRX-02** se fundamenta en el análisis de la fluorescencia de rayos X y nos permite determinar la composición mineral y los elementos químicos presentes en la cascarilla de arroz mediante la medición de porcentajes de concentración de cada compuesto

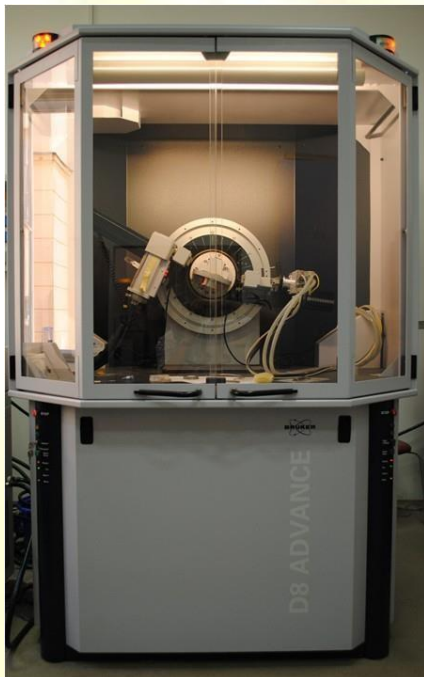


Imagen 2: Difractómetro D8 Discover de la empresa Bruker y muestra enviada al laboratorio

En los resultados obtenidos a partir de los ensayos se constató una alta presencia de silicio (Si) como componente principal (constituyendo un 31.94%) de la muestra. Esta presencia de silicio en la cascarilla de arroz está dada por la capacidad que tiene esta de absorber ácido monosilícico (SiOH_4) durante su crecimiento, transformándolo en óxido de silicio (SiO_2) una vez que se vuelve inmóvil. En la muestra de la cascarilla de arroz, este óxido de silicio representó un 68.33% de los componentes.

Sus características (alta resistencia, durabilidad, estabilidad térmica y aislamiento eléctrico), similares a las del cemento y la cal, hacen que pueda ser considerado su uso como agente aglutinante y conglomerante siempre y cuando su concentración en la muestra sea superior al 50% por lo que es importante realizar estos estudios antes de proceder con los siguientes pasos.

Otro de los compuestos destacados en la muestra es el hidrato de carbono (CHO) proveniente principalmente de los carbohidratos presentes en el arroz y, por ende, en su cascara. También destacan los siguientes componentes: óxido de potasio (K₂O); óxido de fósforo (P₂O₅); óxido de calcio (CaO); óxido de magnesio (MgO); óxido de aluminio (Al₂O₃); óxido de hierro (Fe₂O₃); óxido de manganeso (MnO); óxido de azufre (SO₃); óxido de titanio (TiO₂) y óxido de estroncio (SrO).

En las tablas 1, 2 y 3 se muestran, respectivamente, los resultados de los ensayos DRX-03 y FRX-02 aplicados a la cascara de arroz

Tabla 1: Ensayo DRX-03 Fases cristalinas de la CC

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

Tabla 2A: Resultados FRX-02 de la 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%

Tabla 2B: Resultados FRX-02 de la CC Elementos minoritarios

Elementos minoritarios			
Elemento	Concentración	Compuesto	Concentración
Ti	63 PPM	TiO ²	0.01%
Cu	47 PPM	CuO	58 PPM
Cr	36PPM	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

En la tabla 3 se especifican los nombres de los diferentes compuestos hallados y referenciados en la tabla 2A y 2B

Tabla 3: nombre de los diferentes compuestos obtenidos mediante el ensayo FRX-02 de la cascarilla de arroz

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 Magnesio
Al ² O ³	Óxido de aluminio
Fe ² O ³	óxido de hierro (III)
MnO	Oxido de Manganeso (II)
SO ³	Óxido de azufre
TiO ²	Óxido de titanio (IV)
SrO	Óxido de estroncio

CAPÍTULO



2

Proceso y análisis

En este estudio de tipo correlacional, se investigó la relación e influencia entre diversas variables, siendo las dos de mayor importancia la cascarilla de arroz caolinizada y las propiedades mecánicas de los suelos granulares y finos usados como rellenos o capas de rodamiento sin tratamiento superficial.

Los materiales y equipos utilizados con los suelos en esta investigación se describen en la siguiente tabla

Tabla 4: Materiales y equipos utilizados con los suelos

Materiales	Siglas	Descripción	Equipos
Cascarilla de arroz caolinizada	CE	Finca arrocería en el municipio de Distracción, La Guajira.	
Cemento	CEM	Un bulto de 50kg marca CEMEX.	
Cal	CAO	Un bulto de 50kg.	
Suelo granular: Arena arcillosa	SC	200kg extraídos de una finca en la Mesa de los Santos.	Moldes CBR (California Bearing Ratio)
			Placa de compactación estándar
Suelo fino: Suelo arcilloso de baja plasticidad	CL	200kg extraídos del intercambiador Guatiguara del Municipio de Piedecuesta, Santander.	Equipo de laboratorio geotécnico para pruebas de compactación y resistencia
			Herramientas de excavación y mezcla

La elaboración de este proyecto se realizó en varias etapas, garantizando la correcta mezcla y compactación de los suelos.

Obtención de la cascarilla de arroz caolinizada por un proceso de caolinización en una línea termica



Materiales

- Se selecciona un suelo granular y uno fino para caracterizarlos (granulometría). Se adquirieron cemento y cal para su posterior comparación



Mezcla de materiales

- Se mezclan homogéneamente los suelos con un porcentaje específico de cascarilla caolinizada (CC), cemento y cal respectivamente



Compactación (Proctor)

- Se somete las mezclas de suelos a un proceso controlado de compactación, hasta que se alcanza la densidad y humedad óptimas. Datos que favorecen la realización de las pruebas geotécnicas porque de esta se obtiene el estado óptimo del suelo para ser tratado y posteriormente evaluado



Pruebas complementarias

- Estas pruebas incluyen California Bearing Ratio (CBR) y de resistencia a la compresión no confinada (Q_u) en las muestras mejoradas con CC, cal y cemento, con el fin de evaluar el mejoramiento de los suelos en términos de capacidad de carga y resistencia



Evaluación de resultados

- Se comparan los resultados obtenidos de las pruebas geotécnicas con los del suelo base (sin mejoramiento) y con los aglutinantes tradicionales (cemento y cal)



Imagen 3: Preparación del suelo base



Imagen 4: Mezcla de suelos, de izquierda a derecha: cascarilla de arroz caolinizada, cemento y cal



Imagen 5: Compactación de suelos



Imagen 6: Laboratorios de suelo (geotecnia) Proctor (izquierda) CBR (derecha)

CAPÍTULO



3

Línea térmica y laboratorios

El proceso de caolinización de la cascarilla de arroz, cuyas fases se detallan en la ilustración 1 se llevó a cabo en un periodo aproximado de 2 meses, durante el cual se procesaron diariamente entre 4 y 5 kg de cascarilla en un horno Humboldt de referencia 5DNX8, caracterizado por ser un horno de convección de gravedad con una potencia de 1600W y que ofrece un rendimiento confiable y consistente para una amplia variedad de aplicaciones de calentamiento y secado. El producto resultante de este proceso se almacenó en una bodega para su posterior uso



La línea térmica proporcionada y explicada en detalle en la ilustración anterior, muestra los tres procesos por los que se hace pasar a la cascarilla de arroz, siendo posible a partir de dicha información y considerando los datos de temperatura y tiempo proporcionados, determinar si la cascarilla de arroz ha experimentado solamente la carbonización o si ha alcanzado la etapa final de caolinización.



Imagen 7:Horno Humboldt referencia 5DNX8

LABORATORIOS

1. Granulometría

Inicialmente se realiza granulometría de los suelos a estudiar (suelo granular y suelo fino). El análisis de los datos obtenidos se llevó a cabo teniendo en cuenta la norma INV-E 123-13.

En las tablas 5 y 6 se plasman los resultados de estos análisis

Porcentaje granulométrico del suelo granular (SG)

% Grava	% Arena	% Fino
8.56	62.00	29.44

Porcentaje granulométrico del suelo fino (SF)

% Grava	% Arena	% Fino
0.00	36.27	63.73

A partir de esta información se identifica que el suelo granular es una arena-arcillosa (SC) y que el suelo fino es una arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL) con características de capacidad de retención de agua, cohesión y permeabilidad opuestas, siendo más altas para el primer la SC y bajas para la SF



Imagen 8: Realización de granulometría

2. Proctor

En este laboratorio se realiza la mezcla de los suelos naturales con los aditivos (cascarilla de arroz caolinizada, cemento y cal) en las proporciones mostradas en la tabla 7

<i>Suelo</i>	<i>Material</i>	<i>Porcentaje de peso</i>	<i>Sigla</i>
<i>Arena arcillosa</i>	<i>Cascarilla de arroz caolinizada</i>	5%	SC-CC5
		15%	SC-CC15
	<i>Cemento</i>	5%	SC-CEM5
		15%	SC-CEM15
	<i>Cal</i>	5%	SC-CA05
		15%	SC-CA015
<i>Arcilla de baja plasticidad</i>	<i>Cascarilla de arroz caolinizada</i>	5%	CL-CC5
		15%	CL-CC15
	<i>Cemento</i>	5%	CL-CEM5
		15%	CL-CEM15
	<i>Cal</i>	5%	CL-CA05
		15%	CL-CA015

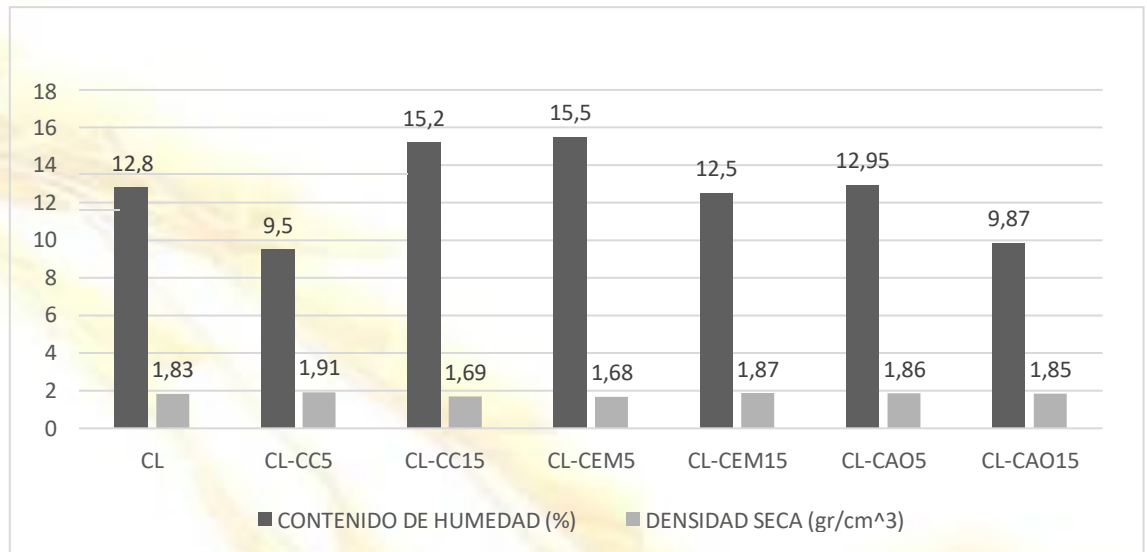
Tabla 7: Proporciones de aditivos usados en las mezclas

El propósito de estos ensayos es evaluar la capacidad de los suelos naturales y mezclados para determinar el **grado óptimo de compactación** para determinar con qué aditivos y con qué porcentaje de mezcla se obtiene una mejoría en las propiedades mecánicas de los suelos naturales.



Imagen 9 Selección de 5kg de suelos - Preparación de muestra aumentando humedad

2.1. Proctor suelo fino



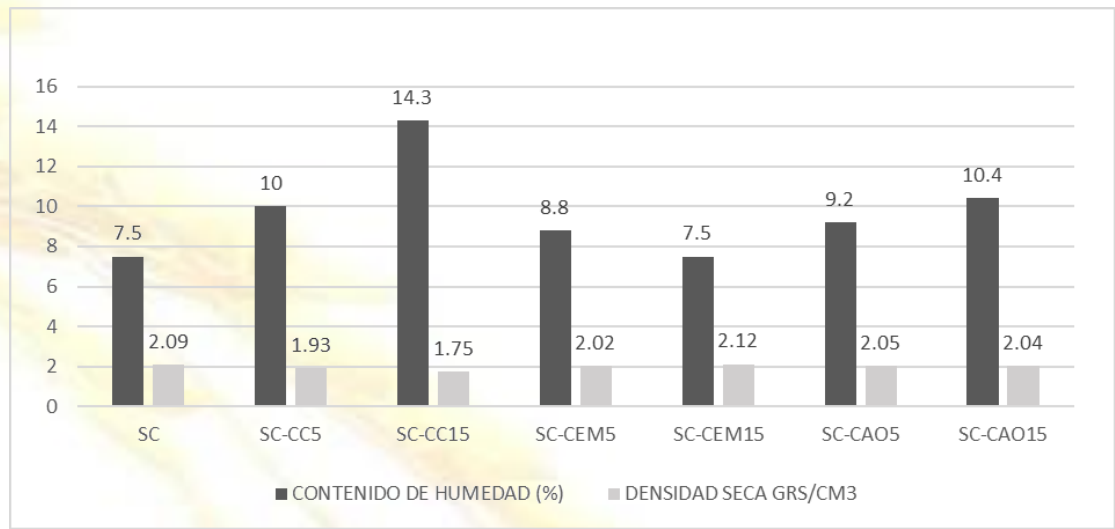
Gráfica 1: Proctor de arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL)

Al realizar el proctor del suelo natural (CL) se halló que el contenido de **humedad** de este era del **12.8%** con una **densidad** de **1.83 gr/cm³**.

En los seis tipos de suelos mezclados, se encontró que:

- El suelo natural mezclado con un 5% de cascarilla de arroz caolinizada (**CL-CC5**) muestra la mayor mejora, con un contenido de **humedad** del **9.5%** y una **densidad** de **1.91 gr/cm³**
- El segundo mejor resultado se obtiene con la mezcla del suelo natural con un 15% de cal (**CL-CAO15**) con un contenido de humedad del **9.87%** y una densidad de **1.85 gr/cm³**
- El tercer mejor resultado se obtiene con la mezcla del suelo natural con cemento al 15%. Sin embargo, su diferencia en cuanto a densidad y humedad es mínima si se lo compara con el suelo natural
- El suelo natural mezclado con un 15% de cascarilla de arroz caolinizada (**CL-CC15**) o con 5% de cemento (**CL-CEM5**) tiene peores propiedades de compactación y densidad con un contenido de humedad del 15% y una densidad de 1.69 gr/cm³

2.2. Proctor suelo granular



Grafica 2 Proctor de arena limosa (SC)

Al realizar el proctor del suelo natural (SC) se halló que el contenido de **humedad** de este era del **7.5%** con una **densidad** de **2.09 gr/cm³**.

En los seis tipos de suelos mezclados, se encontró que para los tres tipos de mezclas la humedad óptima aumentó en todas, excepto en la mezcla de suelo natural con cemento al 5% (SC-CEM5) cuyo porcentaje de humedad es idéntico al del suelo natural.

A partir de los resultados obtenidos se observa que para suelos granulares la adición de cascarilla de arroz caolinizada, cemento o cal no representa ninguna mejora, debido a las características físicas variables de estos tipos de suelos

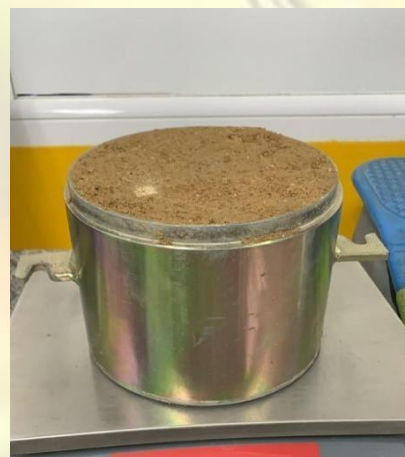


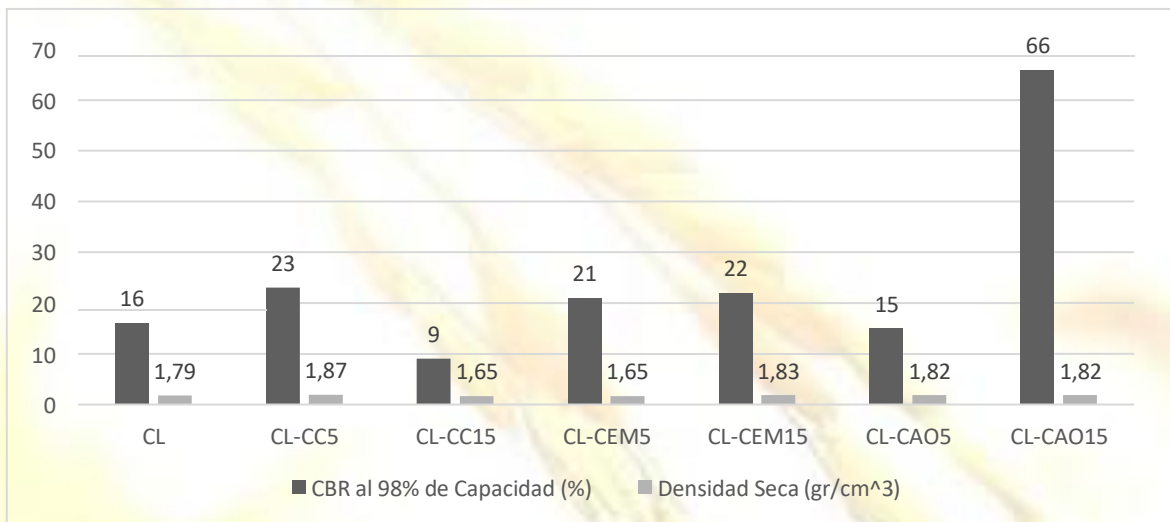
Imagen 10 Proctor: Suelo fino - Suelo granular

3. California Bearing Ratio (CBR)

Los resultados del CBR se pueden clasificar en:

muy bajo	bajo	medio	alto	muy alto
<2%	2 a 4%	4 a 8%	8 a 15%	>15%

3.1. CBR suelo fino



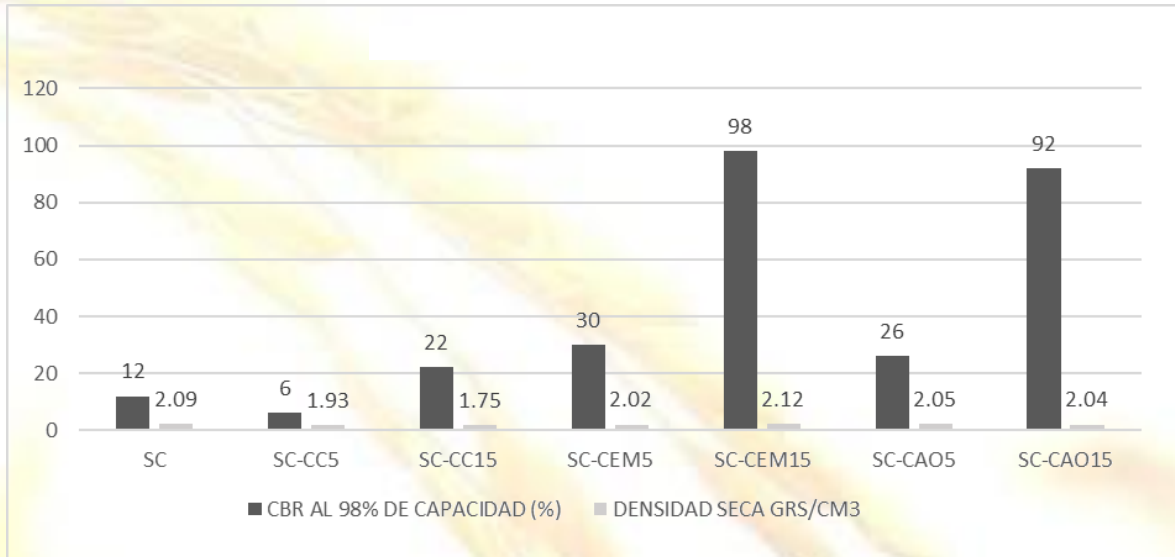
Grafica 3 CBR de arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL)

Del análisis del CBR del suelo fino y de las distintas mezclas se obtiene que:

- La mezcla de suelo natural con 15% de cal (CL-CAO15) exhibe mayor efectividad con un 66%, ya que la cal posee propiedades que reducen la plasticidad y mejoran diversas propiedades mecánicas (cohesión, compresibilidad, permeabilidad y capacidad de drenaje) brindando mayor estabilidad y disminuyendo la deformación del suelo, ya que al actuar como agente deshidratante absorbe el exceso de agua presente en el suelo, controlando los cambios de humedad (especialmente útil en suelos con alta plasticidad y con propensión a la contracción y expansión)
- El porcentaje de Cal agregada juega un papel muy importante ya que con concentraciones de cal del 5% contrario a observar alguna mejoría se obtiene una disminución de un 1% respecto al suelo natural

- La mezcla de suelo natural con UN 5% de cascarilla de arroz (CL-CC5) actúa como segundo mejor agente aglutinante con un CBR de 23% que indica una alta capacidad de resistencia a cargas

3.2. CBR suelo granular



Grafica 4 CBR Arena arcillosa (SC)

Del análisis del CBR del suelo granular y de las distintas mezclas se obtiene que:

- Se obtiene una mejora de las propiedades físicas y de resistencia en el suelo natural, al combinarlo con un 15% de cemento.
- La adición de un 5% de cascarilla de arroz reduce de forma notoria las propiedades físicas y de resistencia del suelo natural

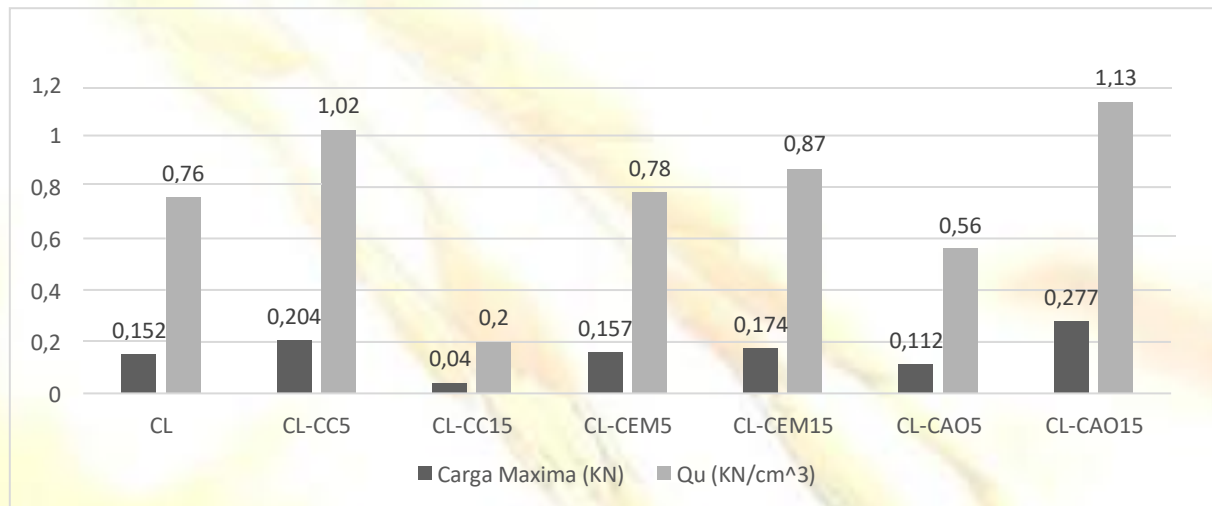


Imagen 11 Armado de CBR - Nivel antes de sumergir en agua - Fallando CBR

4. Compresión incofinada (Qu)

Mediante esta prueba se busca determinar la resistencia del suelo a la compresión cuando este está confinado lateralmente por elementos circundantes tales como muros de contención, pilotes y demás estructuras adyacentes

4.1. Inconfinado suelo fino

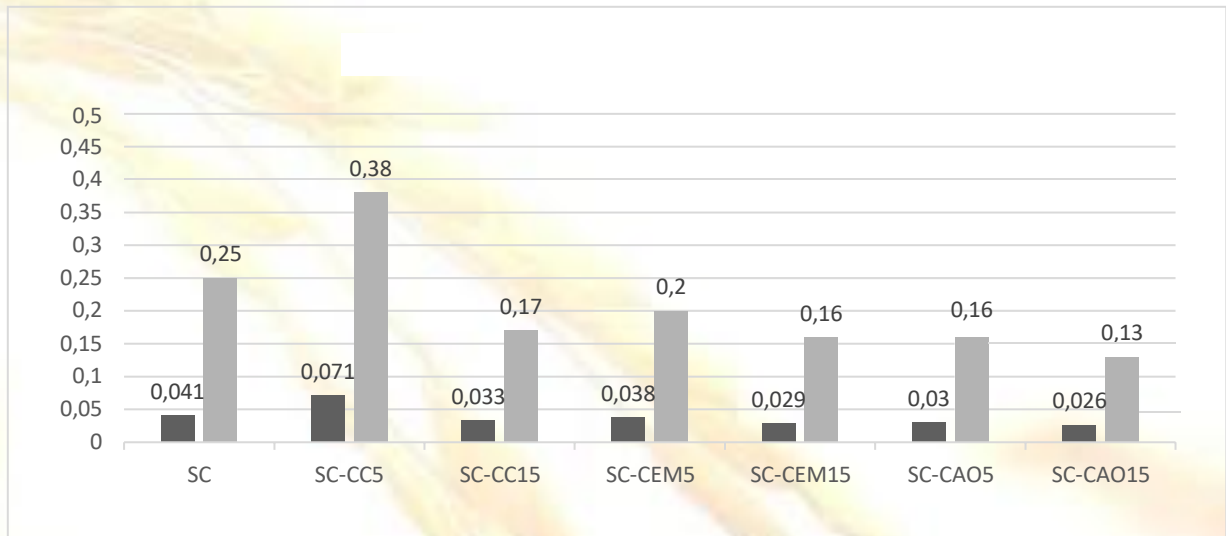


Grafica 1 Inconfinada de arcilla inorgánica de baja plasticidad (CL)

Del análisis del inconfinado del suelo fino y de las distintas mezclas se obtiene que:

- El mejor resultado se obtiene con la mezcla del suelo natural con un 15% de cal (CL-CAO15), seguido por la mezcla del suelo natural con un 5% de cascarilla de arroz caolinizada (CL-CC5) encontrándose entre ellos una diferencia de carga de 0.073 KN y una diferencia de presión unitaria (Qu) de 0.11 KN/cm³
- En tercer y cuarto lugar se encuentran las mezclas del suelo natural con un 5 y 15% de cemento (CL-CEM5, CL-CEM15) con valores muy similares entre sí
- En quinto lugar, está el suelo natural (CL)

- 4.2.** El suelo natural mezclado con un 5% de cal o con un 15% de cascarilla caolinizada no presentó ninguna mejora significativa, por el contrario, disminuyó su capacidad de carga **inconfinado** **suelo granular**



Grafica 6 Inconfinada de arcilla limosa (SC)

Del análisis del inconfinado del suelo granular y de las distintas mezclas se obtiene que:

- El suelo natural (SC) tiene una carga máxima de 0.041 kN y una presión de contacto no drenada (Q_u) de 0.25 kN/cm³
- Al adicionar un 5% de cascarilla de arroz caolinizada al suelo natural se obtuvo una mejoría considerable en cuanto a la capacidad de carga máxima y resistencia de compresión
- Con ninguno de los otros aditivos y concentraciones se obtuvo mejoría considerable del suelo natural.



Imagen 12 Inconfinada con cascarilla de arroz caolinizada - cemento - cal

CAPÍTULO



4

Conclusiones

La cascarilla de arroz caolinizada se perfila como un potencial aglutinante junto a la cal y el cemento dadas sus similitudes en aspectos como resistencia y durabilidad. Además, dada la gran producción de arroz a nivel nacional, la cascarilla es un subproducto económico y fácil de conseguir cuya reutilización en otras actividades favorece al medio ambiente en general

La cascarilla de arroz caolinizada mostró una eficacia significativa para la mejora de suelos finos, lo cual se vio reflejado en su capacidad para mejorar la plasticidad, resistencia mecánica y estabilidad de estos, ayudando a disminuir la expansión y contracción del suelo y mitigando la erosión. Sin embargo, para ser usada en suelos granulares requiere una mayor cantidad de agua que el cemento y la cal observándose alguna capacidad de aglomeración y compactación, pero baja estabilidad