

UNIVERSIDAD CATÓLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de suelos arenosos
aplicando ceniza de carbón en la región Lambayeque**
TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

AUTOR

Piero Alessandro Cieza Ramirez

ASESOR

Juan Merino Roncero

<https://orcid.org/0000-0002-5753-7664>

Chiclayo, 2026

**Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de suelos arenosos
aplicando ceniza de carbón en la región Lambayeque**

PRESENTADA POR

Piero Alessandro Cieza Ramirez

A la Facultad de Ingeniería de la
Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo
para optar el título de

INGENIERO CIVIL

APROBADA POR

Anibal Teodoro Diaz Orrego
PRESIDENTE

Cesar Augusto Ramirez Guanilo
SECRETARIO

Juan Merino Roncero
VOCAL

Dedicatoria

Dedico este trabajo de formación académica a mi abuelo Roberto, un ser humano muy especial y al cual le guardo mucho cariño y admiración, siendo además uno de los pilares en mi educación y desarrollo como ser humano. También dedico esta investigación a mis padres ya que ellos fueron quienes siempre estuvieron al pendiente mío y confiaron siempre en mi persona pese a todas las dificultades que se presentaron.

Agradecimientos

Agradezco principalmente a mis padres ya que sin su apoyo económico y emocional hubiera sido aún más complicado mantenerme firme en este anhelo que tengo por ser Ingeniero Civil. Agradezco también a mi abuela quien a pesar de los problemas cotidianos y esfuerzo diario que tiene que hacer para cumplir de manera adecuada las tareas domésticas siempre me trato con mucho cariño y afecto, agradezco también a mis hermanos y tíos por siempre estar al pendiente mío.

Finalmente agradezco a mi universidad y todos los docentes que estuvieron compartiendo sus conocimientos con esmero y rectitud, no olvidándome de las amistades y compañeros que con pequeñas acciones hicieron este largo camino más llevadero.

Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de suelos arenosos aplicando ceniza de carbón en la región Lambayeque

INFORME DE ORIGINALIDAD

11 %	10 %	2 %	3 %
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	4 %
2	tesis.usat.edu.pe Fuente de Internet	2 %
3	repositorio.upecen.edu.pe Fuente de Internet	1 %
4	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1 %
5	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	1 %
6	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	<1 %
7	doku.pub Fuente de Internet	<1 %
8	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
9	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1 %
10	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
11	core.ac.uk Fuente de Internet	<1 %

Índice

Resumen	6
Abstract	7
Introducción.....	8
Revisión de literatura.....	10
Materiales y métodos	19
Resultados y discusión	35
Conclusiones	64
Recomendaciones	67
Referencias.....	68
Anexos	70

Resumen

Debido a la gran extensión de suelos arenosos en la región de Lambayeque es importante experimentar con nuevas formas de mejorar las propiedades mecánicas que tienen este tipo de suelos, ya que normalmente se tienen ciertas limitaciones al construir sobre ellos debido a las propiedades que por su composición natural tienen; como por ejemplo la baja capacidad portante que ofrecen, baja cohesividad entre sus partículas, que se relaciona con la poca estabilidad que ofrecen, y, la fácil licuefacción de estos suelos en estado saturado; siendo esta una problemática común que generalmente presentan estos suelos arenosos.

Por otro lado se buscó reutilizar las cenizas de carbón mineral provenientes de la fabricación de ladrillos artesanales de arcilla como un material estabilizante que mejore las propiedades mecánicas de los suelos arenosos. De manera que el propósito principal de la investigación giró en torno al mejorar las propiedades mecánicas de suelos arenosos en la región Lambayeque utilizando ceniza de carbón mineral.

En la investigación se experimentó con la adición del 5%, 10% y 15% de ceniza de carbón mineral, proveniente de los residuos de la elaboración de ladrillos artesanales, a muestras representativas de la región Lambayeque. Fueron estudiadas en su totalidad 03 calicatas; siendo así que se determinaron primeramente las características físicas del suelo en estado natural y posteriormente con las adiciones mencionadas; realizándose los ensayos de: Granulometría, Límites de Atterberg y gravedad específica. Posteriormente, se realizaron ensayos que permitieron determinar las propiedades mecánicas del suelo natural y con adiciones correspondiente a los ensayos de Corte directo, Deformabilidad y permeabilidad.

Palabras clave: Suelos arenosos, ceniza de carbón mineral, Corte directo.

Abstract

Due to the large expanse of sandy soils in the Lambayeque region, it is important to experiment with new ways to improve the mechanical properties of this type of soil. Building on them typically faces certain limitations due to their natural composition. These include low load-bearing capacity, low cohesiveness between particles, which is related to their poor stability, and the easy liquefaction of these soils when saturated. This is a common problem generally encountered in these sandy soils.

Furthermore, the aim was to reuse coal ash from the manufacture of artisanal clay bricks as a stabilizing material to improve the mechanical properties of sandy soils. Therefore, the main objective of the research was to improve the mechanical properties of sandy soils in the Lambayeque region using coal ash. The research experimented with the addition of 5%, 10%, and 15% coal ash, derived from the waste from artisanal brickmaking, to representative samples from the Lambayeque region. Three test pits were studied in their entirety; first, the physical characteristics of the soil in its natural state were determined, and then with the aforementioned additions. Tests were performed for granulometry, Atterberg limits, and specific gravity. Subsequently, tests were conducted to determine the mechanical properties of the natural soil and with the additions corresponding to the direct shear, deformability, and permeability tests.

Keywords: Sandy soils, coal ash, direct cut.

Introducción

Como ya es de nuestro conocimiento, la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos son necesarias para poder establecer de manera correcta diseños y procesos constructivos en cualquier infraestructura, dichas propiedades muchas veces tienen que ser modificadas para un mejor comportamiento ante la aplicación de cargas, siendo necesaria la aplicación de aditivos, reemplazo con de material de préstamo o el uso de algún otro elemento que permitan modificar las propiedades del suelo; ejemplo de este tipo de materiales es el cemento, que se usa como un estabilizante bastante efectivo en la mayoría de suelos y cuya técnica de mejora es muy extendida en la ingeniería de cimientos y construcción de carreteras[1], [2].

La adición de cenizas volantes para la mejora de suelos arenosos no es tema desconocido en el área de estudio de suelos, de hecho se han realizado múltiples investigaciones sobre las maneras más óptimas de estabilizar este tipo de suelos con ceniza [2], [3], [4], siendo así que la mayoría de estas investigaciones apunta a utilizar este material en determinados porcentajes combinados con cemento, parte fundamental del material estabilizador. Sin embargo existen otras investigaciones, como la del autor MolaAbasi et al. [5], cuya investigación busca el reemplazar parcialmente el cemento por un material puzolánico denominado Zeolita, buscando de esta manera una alternativa para reducir la huella de carbono en este tipo de estabilizaciones.

Debido a que la búsqueda de la reutilización de recursos provenientes de industrias de construcción y energía es cada vez de mayor interés, las cenizas volantes parecen ser un buen material alternativo para utilizar en la mejora de propiedades mecánicas de algunos suelos, sobre todo debido a su disponibilidad y composición; siendo así que de acuerdo al tipo de carbón quemado se pueden obtener puzolanas que pueden provocar reacciones químicas que favorezcan la resistencia del suelo para aplicaciones geotécnicas [6].

En cuanto a la problemática que tenemos en la zona costera debido a la baja capacidad portante de los suelos y la gran extensión de estos, es importante realizar investigaciones que nos permitan encontrar las maneras más adecuadas y económicas de mejorar el suelo, analizando su composición, comportamiento físico y mecánico, seleccionando el material más adecuado para su mejoramiento teniendo en consideración la importancia de la reducción de la contaminación y el aprovechamiento que pueden tener otros materiales. Más aun sabiendo que las cenizas utilizadas en la presente investigación provienen de un negocio artesanal que se dedica a la fabricación de ladrillos de arcilla, de manera que el que este residuo pueda utilizarse con otros fines, como en este caso para mejorar las propiedades del suelo, sería beneficioso y una alternativa muy económica.

La importancia de esta investigación se puede justificar; desde el punto de vista teórico, debido a que vamos a ampliar los conocimientos ya establecidos para las propiedades físicas y mecánicas del suelo al agregarle ceniza; además desde el punto de vista práctico también es viable la justificación debido a que buscamos solucionar el problema planteado referente a la gran extensión de suelos arenosos con los que contamos en la región.

Metodológicamente justificamos la presente investigación debido a que vamos a aplicar una nueva estrategia para mejorar las propiedades del suelo, además, en el marco ambiental daremos nuestro aporte debido al uso de material residual proveniente de la quema de carbón mineral, ya que se le brindara un uso que involucra el que este residuo ya no tenga que ser dispuesto en botaderos que contaminen el aire, agua o suelo del entorno. Otra de las razones para seguir adelante con la investigación es que se estaría brindando una alternativa económica atractiva ya que los costos de la ceniza de carbón son mucho menores que otros componentes convencionalmente usados para mejorar los suelos, tales como el cemento o cal. En resumen, podemos mencionar que la contribución de la presente investigación es en el ámbito de la mecánica suelos, siendo beneficiarios los diversos sectores de la construcción que buscan mejores opciones al momento de diseñar y construir.

Debido a las razones anteriormente mencionadas surge la siguiente pregunta: ¿De qué manera influye la adición de ceniza de carbón mineral en las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arenosos en la región Lambayeque?, para la investigación se plantea entonces la hipótesis de que la ceniza de carbón mineral aplicada en los porcentajes de 5%, 10% y 15% mejora las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arenosos de la región Lambayeque.

Con la finalidad de llevar a cabo la investigación se determinó que el **objetivo general** es evaluar las propiedades físicas y mecánicas de suelos arenosos aplicando cenizas de carbón, así mismo se plantearon también los siguientes **objetivos secundarios**: (1) determinar las zonas de estudio por el método del muestreo espacial; (2) obtener propiedades químicas de la ceniza por el método de fluorescencia de rayos x; (3) elaborar los ensayos para obtener las propiedades físicas y mecánicas del suelo en condiciones normales; (4) elaborar los ensayos para obtener las propiedades físicas y mecánicas del suelo aplicando 5%,10% y 15% de ceniza de carbón; (5) comparar los resultados obtenidos en condiciones normales y aplicando ceniza de carbón. (6) rrealizar el análisis económico con el contenido óptimo de ceniza para mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos arenosos.

Revisión de literatura

Antecedentes

En el ámbito internacional Cañar Tiviano (2017), en su trabajo de investigación realizó ensayos para determinar las propiedades físicas de suelos obtenidos de los cantones Ambato y Puyo, y, posteriormente adicionaron cenizas de carbón en distintos porcentajes de adición: 20%, 23% y 25% buscando mejorar ciertas propiedades mecánicas del suelo. Para medir las propiedades mecánicas del suelo se usaron ensayos de CBR para diferentes porcentajes de ceniza y, para determinar la resistencia al corte se ejecutó el ensayo de compresión no confinada en suelos comúnmente denominados cangahua y arcillas de alta plasticidad. El análisis ejecutivo que se realizó consistió en comparar propiedades como CBR, humedad, plasticidad y resistencia al corte de manera estadística en suelo arcilloso y arenoso fino; con la finalidad de poder determinar si es viable su estabilización con carbón para su uso como subrasante. Luego de realizar los ensayos correspondientes en la investigación se llegó a determinar que las cenizas de carbón influyen de manera positiva tanto en el CBR como en la resistencia al corte de ambos suelos, aunque el que mayor mejoría presentó fue el arenoso. En los suelos arcillosos disminuye la humedad que este presenta y en los suelos arenosos mejora la compactación, aunque esto requiere de % cada vez más altos de ceniza [7].

Entre los artículos de investigación internacionales más relevantes relacionados a la estabilización de suelos arenosos tenemos la publicación de los autores MolaAbasi et al. (2020), quienes en su investigación propusieron estudiar qué efectos a largo plazo tiene estabilizar suelos arenosos mediante la adición de cemento, buscando reemplazarlo parcialmente con adición de zeolita en determinados porcentajes. El curado del suelo en estudio se realizó durante un periodo de 90 días y se realizaron ensayos de compresión no confinada, durabilidad, pruebas triaxiales consolidadas sin drenaje, y análisis SEM y XRD. Los ensayos realizados determinaron que el contenido óptimo de zeolita fue de 30% ; por otro lado, la durabilidad de las muestras aumentó con el contenido de cemento, pero disminuyó con los ciclos de mojado secado contrario a las muestras mejoradas con una cantidad de 30% de zeolita, que aumentaron la durabilidad. Sin embargo, si se aumenta mayor porcentaje de zeolita la durabilidad de la muestra disminuye. De manera general el aumento de la cantidad de estabilizador mejora no solo la resistencia máxima al corte si no también la rigidez de las mezclas cementadas con zeolita [5].

Por otro lado, el artículo de investigación de Renjith et al. (2021) estudia la utilización y aprovechamiento de cenizas volantes provenientes de industrias de construcción y energía en

la estabilización de suelos. El estudio consistió en evaluar la eficiencia y tasa de utilización de cenizas volantes proveniente de residuos en la construcción de vías de comunicación, combinándolas con aditivos. Estos aditivos estaban compuestos por encimas que ya habían tenido eficacia en la estabilización de suelos arcillosos; los beneficios de este estudio no solo estaban relacionados al mejoramiento del suelo, si no que buscan utilizar a las cenizas provenientes de desechos como una alternativa ecológica en reemplazo del cemento, se realizaron ensayos de CBR y pruebas UCS como parámetros mecánicos. Entre las conclusiones más relevantes del presente estudio tenemos: La adición de un 2% de cal a las cenizas volantes enzimáticas aumentan aún más el CBR del suelo, por otra parte, el espesor de capa de pavimento se podría reducir hasta en un 60%, reduciendo los costos en su elaboración [6].

Entre otras investigaciones en el ámbito nacional tenemos la de Cueva y Chang (2019), en su investigación se buscó mejorar las propiedades del suelo arenoso de la zona, agregándole al suelo cenizas de carbón y cemento tipo I para poder realizar cimentaciones superficiales, para la elaboración de esta investigación se tomaron como muestras 2 calicatas por cada área de terreno habitado en el asentamiento humano Villa los jardines en el distrito de Chimbote. Luego se procedieron con los ensayos que convencionalmente se les hacen a los suelos como: granulometría, contenido de humedad y determinación de límites de Atterberg. Entre otros ensayos que se realizaron en la investigación tenemos: Densidad de campo, Corte directo y Proctor modificado. Además, se realizaron los estudios para conocer la composición química de la ceniza volante de carbón, teniendo un 43.63% de SiO₂ en su composición. La clasificación del suelo de estudio correspondió a arena mal graduada (SP). Luego de realizar las comparaciones utilizando diferentes porcentajes de cemento y ceniza volante de carbón se concluyó que la óptima combinación de estos materiales es de 10% de cemento con 10% de ceniza de carbón; dichos porcentajes de material adicionados dieron una MDS de 1.812 gr/cm³, además el contenido de humedad fue 10.42%, el ángulo de fricción fue establecido en 37.59° y la capacidad portante del terreno oscilo entre 6.02 y 2.01 kg/cm² [8].

Por otro lado. Encalada Oncihuay (2020), en su tesis determino cómo es que la aplicación de cenizas volantes de carbón y cal mejoran las propiedades de los suelos arenosos. El suelo encontrado en la zona fue clasificado como suelo compuesto por arena y limo de acuerdo con la clasificación SUCS y, de acuerdo con la clasificación AASHTO es un suelo bien graduado (A-1-b). Posterior a la clasificación del suelo se procuró adicionar porcentajes de cal y ceniza por separado al suelo analizado en los siguientes porcentajes: Para la Cal se trabajó con adiciones del 5%,10% y 15%; en el caso de la ceniza de carbón también se adicionó en iguales porcentajes. Posterior a esto se realizó el ensayo de Límites de Atterberg para las diferentes

muestras con los porcentajes de cal y ceniza establecidos. De igual manera se realizaron los ensayos de Proctor, CBR, Presión no confinada y Corte directo; dando como resultado más significativo que para una adición del 15% de cal o ceniza de carbón se logró obtener una cohesión de 22.2 kg/cm² además de un ángulo de fricción de 29° [9].

Ricra Huaman (2021) en su tesis, propone la adición de ceniza de caña de azúcar en porcentajes de 5%, 10% y 15%, como material para estabilizar suelos tropicales en el distrito de San Ramón, provincia Chanchamayo, Junín. Luego de realizar el análisis granulométrico del suelo encontrado en la zona, se determinó que este era una arena arcillosa (Clasificación SUCS) y según AASHTO un suelo del tipo A-2-4, además es importante destacar que el suelo no tiene índice de plasticidad alguno mientras que la humedad natural de la muestra fue de 14.8 %. Las conclusiones obtenidas de la investigación determinan que el adicionar ceniza de caña de azúcar influye muy poco en la MDS y humedad óptima del suelo encontrado. Por otro lado, la adición de ceniza en porcentajes de 10% y 15% mejoran significativamente el CBR del suelo, esto se debe a las propiedades puzolánicas de la ceniza de caña de azúcar; siendo así que el CBR obtenido para una adición de 15% de ceniza de caña de azúcar llegó a 48.4% al 100% de la MDS [10].

En el ámbito local Requejo Carrillo (2020) en su investigación, propone el adicionar porcentajes diferentes de ceniza de cascara de arroz (3%, 5%, 7% y 9%) a un suelo arenoso extraído del pueblo joven las dunas en la región Lambayeque, siendo así que el suelo encontrado en la zona tenía un contenido de humedad de 0.55%, no presentaba plasticidad y se trataba de una arena pobremente gradada. Las propiedades mecánicas que presentó el mencionado suelo fueron, un CBR de 22.47% y una MDS de 1.690 g/cm³, además el proceso para obtener ceniza de arroz fue en forma de residuo, brindada por una empresa agroindustrial. Los resultados más relevantes que aportó esta investigación fueron: el contenido óptimo de ceniza que se le adiciono al suelo y mejoro sus propiedades mecánicas fue el 7% de adición de ceniza para un CBR de 25.5%, siendo mayor que el CBR obtenido de la muestra natural pero solo en un 2.55% [11].

Por otro lado, Llauce Dávila (2021) en su tesis realizó una investigación experimental similar a las anteriores en la que uso 2 tipos de ceniza proveniente de residuos agroindustriales siendo así que las propiedades químicas que se encontraron en ambos materiales señalaban que el contenido de óxido de sílice en la ceniza de cascarilla de arroz era de 80.33%, mientras que en la ceniza de bagazo de caña el porcentaje no superaba el 36.52%, evidenciándose así la superioridad de un material sobre otro como material cementante. Los porcentajes adicionados de ceniza de arroz en el suelo arenoso fueron de 10%, 12% y 15% y al compararlo con el suelo

arenoso sin alteración se determinó que la máxima densidad seca aumentaba según mayor % de ceniza se incluyera. Sin embargo, al realizar el mismo procedimiento, pero adicionando ceniza de caña de azúcar para porcentajes de 2%, 4% y 6% se presentaba la misma tendencia, sin embargo, para un 6% de adición la máxima densidad seca disminuía lo que indicó que no existía una relación entre densidad máxima seca y el porcentaje de ceniza de caña de azúcar agregado. Se concluyó del estudio que mientras mayores % de ceniza de arroz evaluado, que, en este estudio el contenido óptimo de ceniza adicionado fue de 15% obteniendo valores de contenido de humedad óptimo de 15.94% para un CBR al 95% y 11.60% para un CBR de 100%. El porcentaje óptimo de ceniza de caña de azúcar es de 6% [12].

Entre otras investigaciones realizadas en el norte de nuestro país, tenemos la de Mory Espinoza (2020), en la investigación el autor propone adicionarle al suelo arenoso porcentajes de 5%, 10% y 15% de ceniza obtenida a partir de la quema de cáscara de arroz con la particularidad de que adicional a ello considerara un pequeño porcentaje de adición de 4% de cemento con la finalidad de aumentar la cohesión en el suelo. El suelo utilizado para la investigación es una arena pobremente graduada con limo SP-SM de acuerdo con la clasificación SUCS; al realizar la granulometría de la muestra adicionada con ceniza se llegó a determinar que la adición de esta no cambia en lo absoluto esta propiedad física del suelo. Luego de realizar el ensayo del Proctor modificado en laboratorio se pudo establecer que a mayores porcentajes de adición de ceniza aumenta cada vez más la humedad óptima de compactación, siendo así que para un 15% de ceniza de cascara de arroz más un 4% de cemento se alcanzó una humedad óptima de 23% mientras que para la muestra en estado natural este valor fue de 10.5%. Contrario a ello la máxima densidad seca presenta un comportamiento diferente ya que a mayores porcentajes de ceniza se obtienen menores valores de MDS, esto debido a que la ceniza es menos densa que el suelo reemplazado. Para la muestra natural del suelo la MDS fue de 1.64 gr/cm³ mientras que para una adición del 15% de ceniza de cascara de arroz más un 4% de cemento la MDS fue de 1.44 gr/cm³. El ensayo de CBR se realizó en 2 condiciones: Con la muestra sumergida y no sumergida; los valores obtenidos con el CBR sumergido fueron siempre mayores para todos los porcentajes de adición de ceniza con relación al CBR sumergido. Se llegó a la conclusión de que el reemplazo del 5% de ceniza de cascara de arroz más un 4% de cemento en el suelo alcanzó los mayores valores para el CBR (148% sumergido y 213% no sumergido), mientras que adicionar mayores porcentajes de ceniza significaron menores valores en el CBR [13].

Bases teóricas

1. Suelo

Definición

Es una capa de la superficie terrestre estudiada desde distintos puntos de vista tales como el agrónomo que determina que es una capa de la superficie donde se desarrolla vida vegetal, mientras que el geólogo manifiesta que es un material intemperizado, además podemos definir que el suelo es todo material terroso con características físicas y mecánicas que diferencian su comportamiento [14].

2. Tipos de suelos

Gravas

Son elementos sólidos provenientes de los fragmentos de las rocas cuyas medidas varían entre 7.62 cm y 2 mm [15]

Arenas

Son granos finos que no presentan plasticidad y oscilan estar entre 2 y 0.05 mm de tamaño de partícula y sufren de compresión instantánea.

Además, son suelos que de acuerdo a su composición podrían tener o no cohesividad entre sus partículas, siendo estas arenas con contenidos de limos o arcillas. [15]

Limos

Son partículas que varían de 0.05 a 0.0005 mm, siendo los limos orgánicos de características plásticas siendo lo contrario en los limos inorgánicos.[15]

Arcillas

Son estructuras formados por silicatos y cuyo tamaño son menores a 0.0005 mm, además de presentar una característica plástica al entrar en contacto con el agua, además de su propiedad expansiva [15]

3. Clasificación de suelos

Está determinada por distintas instituciones o métodos a nivel mundial tales como el sistema USDA, ASTM y el Instituto de Massachussets, sin embargo, a nivel nacional con fines diversos se utiliza el sistema unificado de Clasificación de suelos (SUCS) y el método AASTHO.

Tabla 4.1 Clasificación de materiales de carreteras subrasantes							
Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1			A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena			
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						
Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
Grupo de clasificación		A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5* A-7-6 [†]		
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10							
Núm. 40							
Núm. 200		36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.		
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido		40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.		
Índice de plasticidad		10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.		
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes		Suelos limosos			Suelos arcillosos		
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo						

*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$

†Para A-7-6, $PI > LL - 30$

Fig. 1 Clasificación de suelos Sistema AASHTO.[16]

Tabla 4.2 Sistema unificado de clasificación de suelo (basado en el material que pasa por el tamiz núm. 75)

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo	
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	GW	
		Menos de 5% finos ^a	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$	GP	
		Gravas con finos	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	GM	
		Más de 12% finos ^{a,d}	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GC	
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Arenas limpias	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	SW	
		Menos de 5% finos ^b	$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^c$	SP	
Arenas con finos		$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2)	SM		
Más de 12% finos ^{b,d}		$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	SC		
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) ^e $PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) ^e	CL ML	
		Orgánico	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; vea la figura 4.2; zona OL	OL	
	Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	Gráficos PI en o por encima de línea "A" (figura 4.2) Gráficos PI por debajo de "A" línea (figura 4.2)	CH MH	
		Orgánico	$\frac{\text{Límite líquido: secado}}{\text{Límite líquido: no secado}} < 0.75$; vea la figura 4.2; zona OH	OH	
	Suelos altamente orgánicos	Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico			Pt

^aGravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.

^bArenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}; \quad C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

^dSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.

^eSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo CL-ML.

Fig. 2 Sistema Unificado de Clasificación de suelos. [16]

4. Carbón

Según Dai & Finkelman (2018), es un material que aporta el 41% de energía eléctrica a nivel mundial, y está compuesto por nitrógeno, azufre, hidrógeno y oxígeno, produciendo temperaturas de 400 a 700° [17].

Cenizas de carbón

Este tipo de residuo es uno de los principales contaminantes en todo el mundo debido a su contenido de metales pesados tóxicos. Los residuos producidos por las grandes industrias caen por la gravedad, alcanzando porcentajes hasta 80% del total de residuo de cenizas generadas en una industria [18].

Estas cenizas volantes son obtenidas generalmente a partir de residuos agroindustriales que se encuentran en la quema en calderas para cogeneración de energía. Es un material que llama bastante la atención debido a su alta disponibilidad, además es un material muy interesante ya que el carbón quemado contiene un alto contenido puzolanas, de manera que quedan demostradas las reacciones en microestructuras amorfas y cristalinas, por lo tanto partir de esta síntesis de aluminosilicatos se pretende obtener puzolanas de características similares al cemento Portland [19].

Las cenizas volantes de carbón y otros productos de ceniza de residuos son productos económicos y beneficiosos en la construcción. En investigaciones realizadas por Basirun et al.

(2017), demostraron que adicionando en remplazo del cemento por residuos de ceniza de carbón en un 10% la resistencia obtenida el día 28 mostro un 11% más resistencia que la muestra de control y cuando se agregó el 15% de ceniza de carbón la resistencia el día 28 se aumentó el 91% más que la resistencia de control. Por tal se demuestra en que las pruebas de resistencias, la cantidad de ceniza de carbón como material de sustitución del cemento mejoró la resistencia del concreto bajo ciertos parámetros [20].

5. Propiedades físicas y mecánicas del suelo

5.1 Contenido de humedad

La determinación del contenido de humedad en el suelo se realiza con la finalidad de determinar el peso de agua eliminada expresada en % que tiene el suelo al someterse a un secado continuo a una temperatura controlada.[21]

5.2 Granulometría

Es de suma importancia establecer la granulometría del suelo en estudio siendo así que lo que se busca con este ensayo es la determinación de la curva granulométrica del material para a posteriori poder clasificarlo ya sea por la metodología AASHTO o SUCS.[21]

5.3 Plasticidad

La plasticidad en los suelos se utiliza básicamente para saber cuál es el comportamiento que estos tienen al añadirles ciertos porcentajes de humedad, siendo así los límites de Atterberg uno de los principales métodos que establece la norma NTP 339.129 para su determinación. Siendo así que el LL es el % de humedad que requiere un suelo para comportarse como un fluido mientras que el LP es el % de humedad que necesita el suelo para tener un comportamiento sólido.[21]

5.4 Corte directo

Establecer la cohesión y ángulo de fricción interna del suelo, son componentes del esfuerzo de corte mismo; de acuerdo con [15] la aplicación del ensayo de corte directo suele ser generalmente aplicado en suelos arcillosos o arenas con contenido de finos y rara vez en suelos con cohesión muy baja. En arena los ensayos de corte rara vez llegar a justificarse ya que el ángulo de rozamiento interno es igual al ángulo de reposo de esta. De acuerdo a Meyerhof al ángulo de rozamiento interno de un suelo granular y su compacidad están determinados por:

$$\varphi = 25 + 0.15C_r \dots \dots \dots \text{ para suelos con más de 5\% de finos}$$

$$\varphi = 30 + 0.15C_r \dots \dots \dots \text{ para suelos con menos de 5\% de finos}$$

5.5 Deformabilidad (Ensayo edométrico)

La prueba de consolidación unidimensional fue ideada por el Dr. Karl Terzaghi, este también fue quien ideó la teoría de la consolidación; esta teoría es en realidad bastante extensa pero importante a la vez ya que permite un estudio más completo de las deformaciones y asentamientos que podría tener el suelo. Es justamente el ensayo edométrico el encargado de tomar datos en laboratorio para establecer relaciones entre las cargas aplicadas, deformaciones del suelo e índices de vacíos.

El ensayo básicamente busca establecer el medir en que tiempo se podrían llegar a tener deformaciones permanentes en el suelo, así como también determinar cuál es el asentamiento que tienen los suelos ante la aplicación de cargas y como es que la relación de vacíos se ve afectada por ellas; finalmente se dibujará la curva de esfuerzo-relación de vacíos para establecer relaciones importantes como el CC coeficiente de compresibilidad.[15]

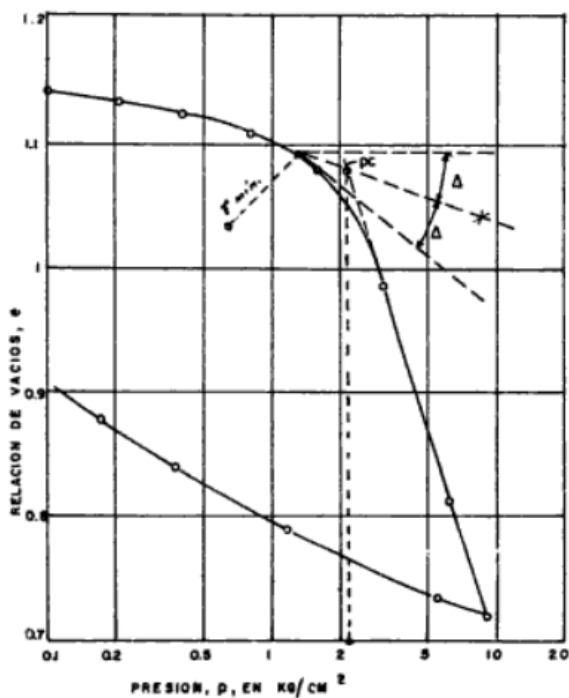


Figura 14.6.

Fig. 3 Curva de compresibilidad del suelo

Materiales y métodos

Tipo y nivel de investigación

De acuerdo a los datos utilizados, la metodología de investigaciones es de tipo **Cuantitativa**, debido a que se recolectaran y analizaran datos cuantitativos producto de los ensayos de laboratorio determinando así los resultados de la presente investigación; Además podemos mencionar que **de acuerdo a la metodología** del trabajo realizado corresponde a una **Investigación Experimental** debido a que manipularemos las variables para obtener resultados que se contrasten con la hipótesis planteada, que, en esta investigación es: la adición de ceniza de carbón mejora las propiedades físicas y mecánicas de suelos arenosos de la región.

Población muestra y muestreo

Población

En esta investigación, la población consistirá en los suelos arenosos pertenecientes a la región de Lambayeque, las cuales serán ensayadas como muestra patrón y con la adición de ceniza de carbón como muestra experimental.

Muestra

Para esta investigación se consideraron todos los especímenes correspondientes a arenas provenientes de las 03 calicatas pertenecientes a la región Lambayeque tomadas de las provincias de Chiclayo, Ferreñafe y Lambayeque en estado natural como muestra patrón, y con las adiciones de 5%, 10%, y 15% en el grupo experimental.

La cantidad de muestras en total es de 30 muestras para el grupo patrón (**suelo en estado natural**) y 90 para el grupo experimental (**suelo con adición de ceniza de carbón mineral**)

Muestreo

Es de tipo espacial y sus cantidades estarán establecidas según los ensayos de la NTP.

Criterio de selección de las muestras

El presente estudio se realizará tomando en cuenta los siguientes procedimientos: en una primera instancia iniciaremos ubicando las zonas de estudio utilizando un muestreo espacial, usando como referencia planos de vulnerabilidad de suelos realizados por INDECI [22] y Google earth para identificar las zonas que tienen el tipo de suelo que necesitamos, cabe aclarar que el muestreo se realizará por conveniencia ya que se buscan principalmente suelos arenosos. Posterior a la extracción del suelo de estudio se llevaran al laboratorio las muestras tipo Mab [23], para obtener las propiedades físicas (contenido de humedad, granulometría, peso específico relativo, etc.) y las propiedades mecánicas en condiciones normales y, posterior a ello realizar los mismos ensayos pero agregando la ceniza de carbón en los porcentajes establecidos.

Tabla 1
Muestreo del grupo patrón y experimental

	MUESTREO GRUPO PATRÓN		MUESTREO GRUPO EXPERIMENTAL	
	PROCEDENCIA	ENSAYOS Corte Directo	% ceniza	ENSAYOS Corte Directo
C-01	Ferreñafe	10	5%	10
			10%	10
			15%	10
C-02	Reque	10	5%	10
			10%	10
			15%	10
C-03	Lambayeque	10	5%	10
			10%	10
			15%	10
	# parcial muestras	30	# parcial muestras	90
# TOTAL DE MUESTRAS				120

Tabla 2
Cantidad de muestra requerida para los ensayos a realizar

	Ensayo	Norma	Cantidad aproximada de muestra (gr.)
Propiedades Físicas	Contenido de Humedad	MTC E 108 - NTP 339.127 - ASTM D2216-92	200-500
	Granulometría	MTC E 204 - NTP 339.118 - ASTM D 422	500-1000
	Límites de consistencia	MTC E 111 - NTP 339.119	300-500
	Peso específico relativo	MTC E 113 - NTP 339.131	500-1000
Propiedades mecánicas	Corte directo	NTP 339.171 - ASTM D 3080	500
	Deformabilidad	NTP 339.154	300
	Permeabilidad	NTP 339.147	1000

Nota: las cantidades que se muestran son aproximadas y se han extraído del Manual de Ensayo de materiales del MTC y Norma E.050. [21] ,[23]

Tabla 3
Matriz de operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicador	Instrumento	Escala de medición
Suelos Arenosos V D	Características físicas	Contenido de Humedad	Formato de ensayo de laboratorio	Razón
		Granulometría		
		Límites de consistencia		
		Peso específico relativo		
	Características mecánicas	Corte Directo		
		Deformabilidad (Ensayo Edométrico)		
		Permeabilidad (Permeámetro)		
Ceniza de carbón VI	Incineración de carbón Mineral	Dosificación: 5%,10% y 15%	Formato de ensayo de laboratorio	Razón

Extracción de muestras

En la siguiente investigación, se extrajeron las muestras convenientemente ya que se usaron los mapas de vulnerabilidad de INDECI con el fin de identificar suelos arenosos en la región, a continuación, se muestran los lugares en los que se extrajeron las muestras, así como una referencia gráfica usando el Google earth que hará sencilla la localización del suelo de estudio.

➤ Lambayeque

Para la obtención de la muestra representativa de esta provincia se hizo el uso de los mapas de vulnerabilidad de INDECI. La muestra se extrajo en zonas aledañas a la calle Señor de los milagros en Lambayeque, en terrenos habitados cercanos a la reserva forestal montes de la Virgen.



Fig. 4 Lugar de extracción de muestra Lambayeque

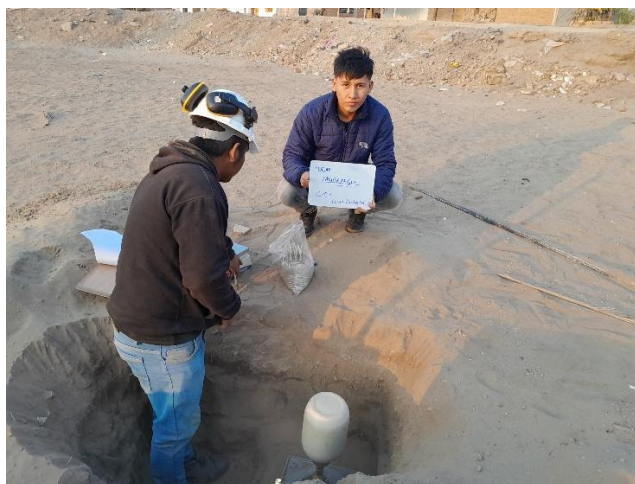


Fig. 5 Extracción de suelo y ensayo de Densidad de campo C-01

➤ **Ferreñafe**

Para la obtención de la muestra representativa de la provincia de Ferreñafe se hizo de igual manera el uso de los mapas de vulnerabilidad de INDECI. La muestra se extrajo del distrito de Ferreñafe en zonas aledañas al proyecto inmobiliario casa blanca, provincia Ferreñafe, departamento de Lambayeque.



Fig. 6 Lugar de extracción de muestra Ferreñafe



Fig. 7 Extracción de suelo y ensayo de Densidad de campo C-02

➤ **Chiclayo**

Para la obtención de la muestra representativa de la provincia de Chiclayo se hizo de igual manera el uso de los mapas de vulnerabilidad de INDECI. La muestra se extrajo del distrito de Reque en zonas aledañas a la salida hacia el sector Las delicias y próximo a la intercepción entre la Panamericana norte y la carretera Reque-Puerto Eten.



Fig. 8 Lugar de extracción de muestra Chiclayo (Reque)



Fig. 9 Extracción de suelo y ensayo de Densidad de campo C-03

Obtención de la ceniza de carbón mineral

La obtención de la ceniza de carbón mineral que se usara como parte de la experimentación del trabajo de investigación se obtuvo a partir de la recolección de este material proveniente de la incineración del carbón mineral en un horno utilizado para la fabricación de ladrillos artesanales de arcilla, la ubicación de la fábrica artesanal de ladrillos de donde se obtuvo el material se ubicó prácticamente al costado de la trocha carrozable que conecta la provincia de Ferreñafe con el caserío Huanaba y cuyas coordenadas son 639267.00 m E, 9266532.00 m S Zona 17 M; visto desde el Google earth su ubicación es la siguiente:

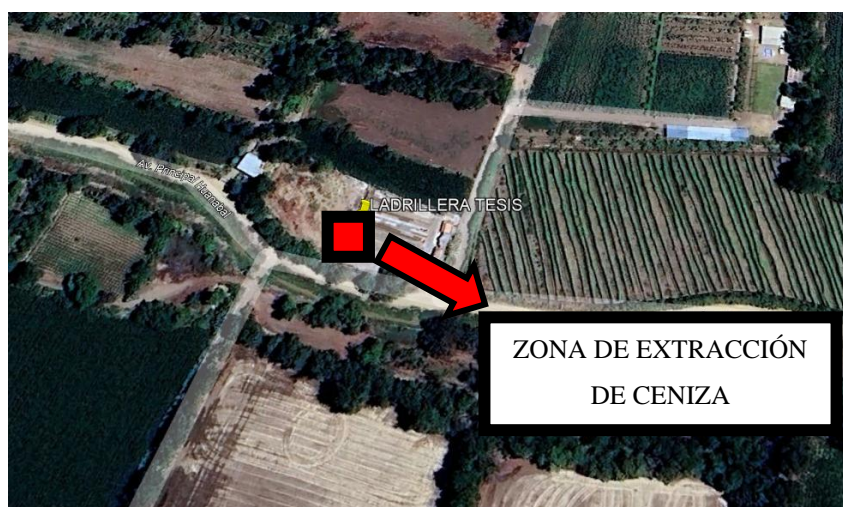


Fig. 10 Ubicación de la ladrillera



Fig. 11 Hornos Artesanales de donde se recolecto la ceniza

Ensayos de laboratorio

Como parte del desarrollo de la investigación, dado que es de carácter experimental y con la finalidad de cumplir con los objetivos planteados al iniciarla, corresponde detallar en este apartado todos los ensayos realizados en laboratorio con el fin de demostrar el cumplimiento de la hipótesis planteada en la investigación.

Se realizaron los ensayos de laboratorio correspondientes a contenido de humedad, granulometría, límites de Atterberg y Gravedad específica para determinar las características físicas del suelo en estudio y para su posterior clasificación SUCS. Por otro lado se realizaron también los ensayos de Corte Directo, Edométrico y de Permeabilidad que de igual manera corresponden a un estudio de propiedades mecánicas del suelo.

1. Características Físicas

1.1 Contenido de Humedad

Para la obtención de la humedad de las muestras se trató en lo posible de evitar que esta pierda su humedad natural de manera que estos ensayos se realizaron a posteriori de haber realizado las calicatas para la extracción del suelo

Aproximadamente se pesó 1000gr de suelo de cada calicata en la balanza proporcionada por laboratorio, posterior a ello se colocaron las muestras en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}$ dejándose secar durante 24h. El día siguiente se procedió a sacar las muestras del horno y se dejaron enfriar; una vez frías las muestras se pesaron para obtener el peso del suelo seco y con estos datos se pudo determinar la humedad de cada muestra de suelo.



Fig. 12 Muestras de suelo luego de ser sacadas del horno

1.2 Granulometría

Para la granulometría se procedió a obtener una cantidad de muestra de 300gr que fue obtenida del suelo seco que quedo del ensayo de humedad. Una vez que fueron pesados los respectivos 300 gr para cada muestra de suelo y con la ayuda del Tamiz n°200 se procedió a lavar el suelo a través de esta malla, con la finalidad de determinar qué cantidad de finos tenía cada muestra. La cantidad de suelo que quedo retenida en la

mallas n°200 fue nuevamente colocada en una tara y se colocó al horno durante un tiempo de 24h a una temperatura de $110^{\circ}\pm 5^{\circ}$. Al día siguiente de igual manera que en el contenido de humedad se sacó la tara con la muestra que había quedado y luego de dejar que se enfríe se volvió a pesar. Para realizar la gráfica de la curva granulométrica se utilizaron los tamices que establece la NTP 339.18 siendo es tos los tamices N° 4, N° 10, N° 20, N° 40, N° 50, N° 100 y N°200.



Fig. 13 Tamices utilizados para la granulometría



Fig. 14 Tamizado de la muestra de suelo natural

1.3 Límites de Atterberg

Para la determinación de los límites de Atterberg del suelo inicialmente se empezó por determinar el **Límite Líquido** del suelo en estado natural siendo así que primeramente se procede a saturar una cantidad de 200gr de muestra de suelo en un recipiente plástico de manera que al agregarle agua a la muestra se debe formar una especie de pasta la cual se dejará reposar durante un periodo de 24h. Pasado este tiempo se empezó con el ensayo, que, consistía en mover la pasta de suelo que se había formado a la copa Casagrande y se determinó con qué número de golpes se cerraba la abertura hecha con el ranurador. Una vez determinado el número de golpes se colocó una cantidad representativa de ese suelo y se le determinó que porcentaje de humedad tenía.

Para la obtención del **Límite Plástico**, de la misma muestra que se usó para el límite líquido, se empezó a formar cilindros de aproximadamente 3.2mm de diámetro que en cuanto empezaron a perder la plasticidad que tenían al perder la cantidad de agua que tenían al iniciar el ensayo, se colocaron en una tara y se obtuvo de igual manera la humedad que estos tenían. Es importante mencionar que 02 muestras del suelo estudiado no presentaban ni LL ni LP debido a que al ser suelos con poca cantidad de finos prácticamente no tenían cohesión.

Los límites de Atterberg fueron realizados para el suelo en estado natural y para las adiciones de 5%, 10% y 15% de ceniza.



Fig. 15 Copa Casagrande usada para el ensayo de Límite líquido



Fig. 16 Cilindros de 3.2mm de diámetro (LP)



Fig. 17 Suelos con adiciones de ceniza en porcentajes

1.4 Gravedad específica

Para la gravedad específica, primeramente se pesaron las fiolas que fueron utilizadas durante el ensayo. Luego de tener las fiolas pesadas se utilizó agua destilada para llenarlas hasta la marca que cada una de estas tenía; y luego se volvió a determinar cuál era el peso de las fiolas más el agua añadida. Por otra parte se pesaron 50gr de suelo en estado seco, o 25gr en el caso de que se hubiera trabajado con una fiola más pequeña. Una vez que se pesó el suelo este se coloca en las fiolas que previamente fueron vaciadas y posteriormente fueron llenadas con agua destilada hasta un poco más arriba de la marca que cada fiola tiene. Para determinar la gravedad específica de sólidos se sacó el aire de la muestra primero mediante agitación manual y posteriormente con la ayuda de una bomba de vacío. Luego de dejar reposar la muestra durante 24h y al siguiente día finalmente se enrasó el nivel del agua hasta la marca de cada fiola y se volvió a pesarla. Al igual manera que en los límites de Atterberg las Gravedades específicas se realizaron tanto para suelo en estado natural como para el suelo con las adiciones de 5%, 10% y 15% de ceniza.



Fig. 19 Fiolas con muestra antes de ser colocadas en la bomba de vacío.



Fig. 18 Extracción del aire de las muestras

2. Características Mecánicas

2.1 Corte directo

Para la realización de este ensayo se siguieron las recomendaciones de la NTP 339.171, siendo así que todos los cortes directos fueron realizados bajo condiciones consolidadas y drenadas. Primeramente se tomaron las medidas y peso de cada tallador de muestra; luego se determinó a que densidad iban a ser remoldeadas las muestras de suelo de cada una de las calicatas de estudio siendo así que se trató en lo posible de mantener la densidad que fue obtenida en campo con la finalidad de que el suelo sea ensayado en las condiciones más parecidas en las que se encontraba el suelo en estado natural. Una vez que se tenían todos los talladores con las muestras remoldeadas se empezó con la realización del corte de cada espécimen. Para ello se colocó la muestra en la caja de corte de la máquina que se utilizó en este ensayo. La velocidad de corte que se estableció fue de 0.25 mm/min. Una vez colocada la muestra en la caja de corte se colocaron las pesas correspondientes para evitar el desplazamiento vertical de la muestra siendo estos pesos de 2 kg, 3.5 kg y 1.5 kg respectivamente a cada tallador usado, es decir que para cada ensayo de corte va aumentando el peso (hasta llegar a 1.5 kg). Cada corte de muestra se realizó aproximadamente 45min después de haber puesto la carga vertical sobre la muestra. Los ensayos de corte directo para suelo con adiciones también fueron realizados y la particularidad y dado que se buscaba que la ceniza actuara sobre el suelo cada muestra se dejó reposar un periodo de 4 a 5 días antes de ser cortado. Para dar por culminado el ensayo se sacó la muestra y se obtuvo la humedad de cada uno de los especímenes ensayados.



Fig. 20 Remoldeo de la muestra



Fig. 21 Colocación de la muestra en la caja de corte



Fig. 22 Carga vertical de 2kg, 3.5kg y 5kg



Fig. 23 Toma de lecturas del dial de deformaciones

2.2 Ensayo Edométrico

El ensayo edométrico o también denominado Ensayo de consolidación del suelo fue realizado bajo los parámetros establecidos por la NTP 339.154.

Primeramente se tomaron las dimensiones del diámetro de cada anillo de metal donde posteriormente y al igual que en el ensayo de corte directo se colocará cada muestra remoldeada de manera que se mantenga en lo posible la densidad de campo del suelo. Posteriormente al remoldeo de cada muestra, se colocó el anillo con la muestra en la caja de metal que consta con 2 piedras porosas las cuales cumplen la función de confinar la muestra, que, luego de ser ajustada con pernos se colocó en el Consolidómetro. Antes de empezar el ensayo, la caja de metal en la que está la muestra se llenó hasta el borde superior con agua destilada.

Una vez que se colocó la muestra en el Consolidómetro fue ajustado el deformímetro de tal manera que antes de colocar la carga se estableció la medida inicial con la que se empezaba el ensayo para poder así medir correctamente las deformaciones. Al conocer el valor inicial del que partió el deformímetro se procedió a la colocación de cargas verticales de manera que se tomaron las deformaciones del suelo cada determinados tiempos establecidos en la NTP; siendo así que para **la fase de carga** consecutivamente fueron adicionándose las cargas de 1kg, 5kg, 13kg y 17kg y de igual manera se fueron tomando las respectivas mediciones de deformaciones. Para la **fase de descarga** de igual manera se quitaron los pesos y se tomaron las deformaciones producidas. Finalmente se sacó cada muestra del Consolidómetro y se procedió a tomar la humedad que se tuvo durante el ensayo.



Fig. 24 Consolidómetro con muestras C-01: Natural, 5% y 15%



Fig. 25 Toma de lecturas de los deformímetros

2.3 Permeabilidad

Para la realización de este ensayo y de acuerdo a recomendación de la NTP 339.147 para arenas o suelos no cohesivos se utilizó el equipo correspondiente al permeámetro de carga constante. El ensayo consistió en colocar la muestra de suelo en estado natural y con sus respectivas adiciones en el equipo proporcionado por los laboratorios USAT; para ello primero se tomaron las dimensiones del diámetro de la cámara del permeámetro, peso del permeámetro, la altura de la muestra, peso del permeámetro más la muestra y la altura de carga hidráulica sobre la muestra. Una vez obtenidos esos datos se colocó el permeámetro en la zona de laboratorio indicada para realizar este ensayo y se colocaron las mangueras de entrada y salida de agua. Para empezar a tomar las medidas para establecer la permeabilidad, primero debe tomarse importante consideración de que el suelo deberá estar totalmente saturado y libre de aire así que fue lo que se procedió a hacer al abrir las llaves de paso y purga de aire del permeámetro. Finalmente y ya saturada la muestra se tomaron los datos de tiempo y volumen de agua con la ayuda de un cronómetro y probeta graduada respectivamente.



Fig. 26 Peso del permeámetro



Fig. 27 Realización del ensayo de Permeabilidad



Fig. 28 Medición de volumen que pasa en un determinado tiempo

Resultados y discusión

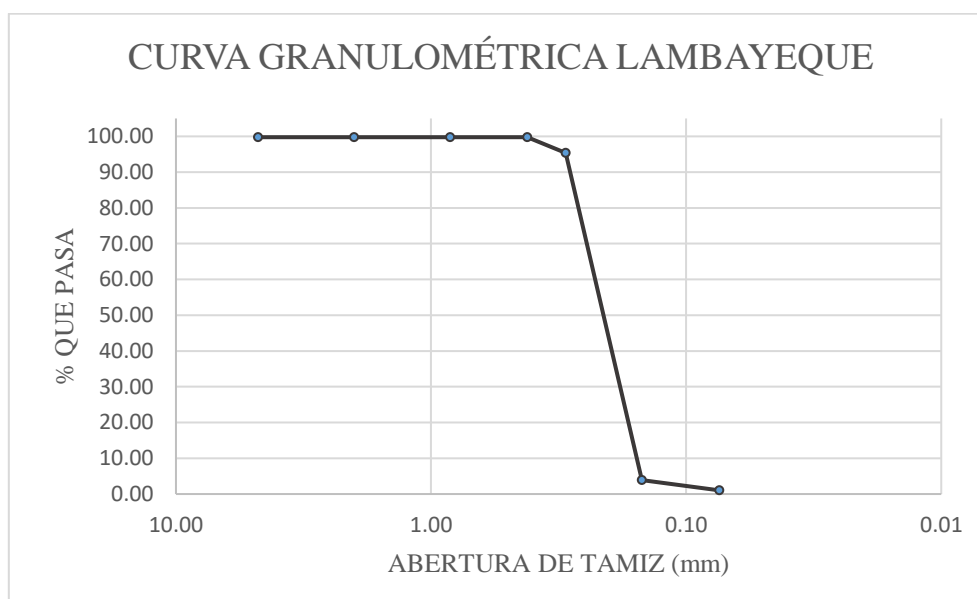
Resultados

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos en laboratorio para las muestras de suelos arenosos extraídas en las zonas anteriormente mencionadas primero en estado natural y, luego con su respectiva adición de ceniza. Primero se presentarán los ensayos correspondientes a las propiedades físicas del material: Granulometría, límites y gravedad específica que fueron realizados con la finalidad de conocer que propiedades intrínsecas tiene el suelo así como también como es que están se ven modificadas o no, al adicionarle ceniza de carbón mineral en 5%, 10% y 15%. De igual manera se presentarán los ensayos realizados para medir las propiedades mecánicas tales como corte directo, deformabilidad y permeabilidad, estos son de suma importancia ya que nos brindaran parámetros para medir el mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo. Los gráficos que se muestran corresponden al resumen del laborioso procesamiento que demanda cada ensayo de laboratorio y cuyos formatos completos se muestran en los anexos de la investigación.

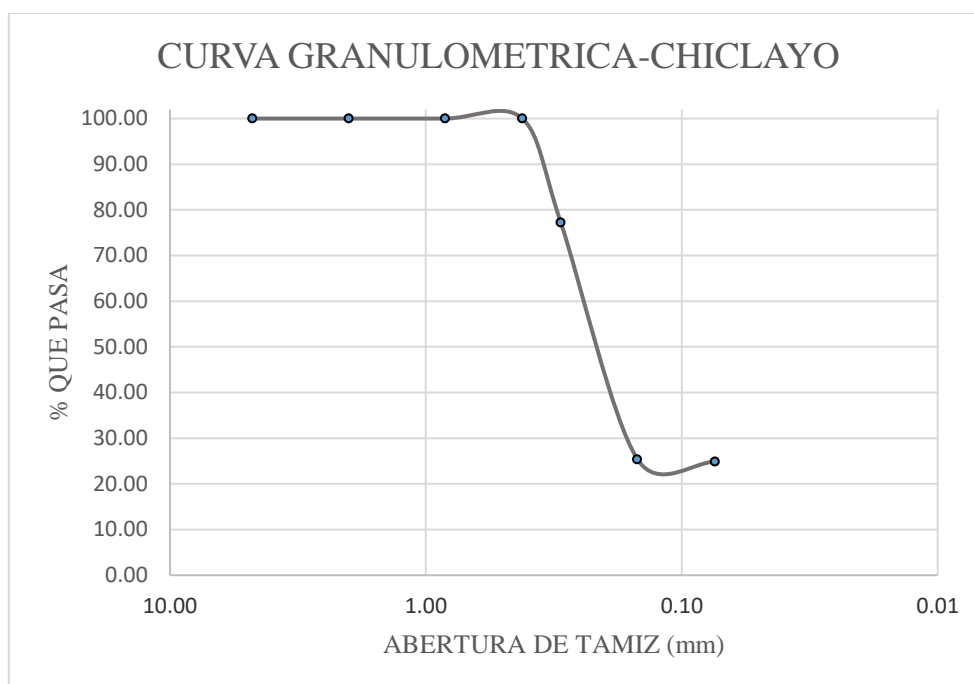
PROPIEDADES FÍSICAS

1. *Granulometría del suelo*

Se realizó el ensayo de análisis granulométrico con la guía de la norma NTP 339.118 siendo así que fueron ensayadas las 03 muestras extraídas en los puntos ya mencionados. Las muestras naturales fueron lavadas en el tamiz 200 luego de estar completamente secas para ver qué cantidad de material fino pasaba la malla 200. A continuación, se muestran las gráficas correspondientes a las muestras naturales en estudio.



Gráfica 1 Curva granulométrica C-01



Gráfica 2 Curva granulométrica C-03

Podemos observar que en los gráficos N°1 y N°3 la curva granulométrica es correspondiente a la de una arena pobremente graduada, debido a que no se ve una distribución uniforme de distintos tamaños de partículas, es decir, la arena de las calicatas C-01 y C-03 tienen prácticamente un solo tamaño de partícula siendo esta una propiedad característica de los suelos que abundan en nuestra región. Por otra parte la curva granulométrica de la calicata C-02 nos indica que este suelo contiene también una baja distribución uniforme de partículas, sin embargo al lavar el material por la malla N°200 se obtuvo un 45% de material fino pasante, lo cual indica que la composición de este suelo pese a ser arenas en mayor porcentaje, también tiene una cantidad importante de finos.

2. Clasificación del suelo

Clasificación SUCS

En cuanto a la clasificación de las muestras en estado natural, de acuerdo a la clasificación SUCS se determinó que la totalidad del material de las 3 muestras pasaron el tamiz N° 4, clasificándose como material granular fino y dado que el % de finos que pasaron la malla N°200 fue inferior al 50% los suelos de estudio son principalmente arenas. Es importante también definir que para esta metodología de clasificación del suelo se deben determinar los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c).

Clasificación AASHTO

Para clasificar la muestra del suelo en estudio se utilizarán los parámetros establecidos por el AASHTO para clasificación de suelos establecidos en las bases teóricas anteriormente presentada, la información necesaria para su clasificación nos la proporcionaran las mallas #10, #40 y #200; así como también será importante determinar los límites de Atterberg.

Tabla 4

Clasificación SUCS Y AASHTO de las muestras

Muestra	Clasificación	
	SUCS	AASHTO
Lambayeque	SP	A3
Ferreñafe	SC	A-2-6
Chiclayo	SP	A3

3. Límites de Atterberg

Los ensayos realizados para la obtención de los Límites de Atterberg; Límite líquido (LL) y Límite plástico (LP) solo fueron realizados para la muestra correspondiente a la calicata 02 ubicada en la provincia de Ferreñafe debido a que esta era la que mayor porcentaje de finos presentaba (45%) y que pese a ser clasificada como arena sus partículas presentaban cierta cohesión y por ende si se podía determinar su respectivo IP. Con respecto a las calicatas 01 y 03 se determinó que, tanto para el suelo en estado natural como con sus adiciones de 5%, 10% y 15% el IP permaneció siendo 0 ya que no se podía realizar el ensayo a causa de la baja cohesión de ambos suelos. A continuación, se muestran los resultados obtenidos correspondientes a las 3 calicatas de estudio.

Tabla 5

Valores de LL y LP de las calicatas C-01 y C-03

Muestra	Adiciones	Clasificación	
		LL	LP
Lambayeque (C-1)	Natural	NP	NP
	5%	NP	NP
	10%	NP	NP
	15%	NP	NP
Chiclayo (C-03)	Natural	NP	NP
	5%	NP	NP
	10%	NP	NP
	15%	NP	NP

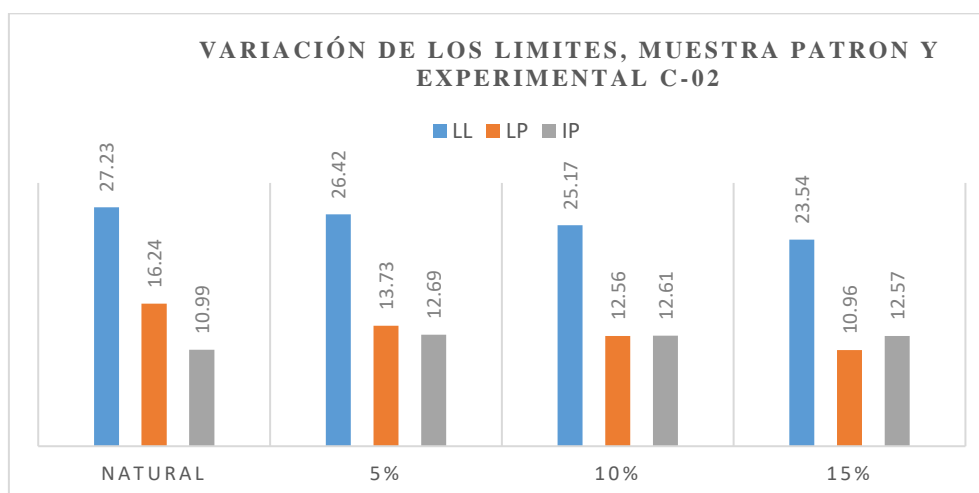
Como podemos observar en la tabla V las muestras correspondientes a las calicatas 01 y 03 no presentaron valor alguno para los límites de Atterberg lo cual resulta razonable

debido a que es una característica propia de las arenas el tener una baja cohesión entre sus partículas, siendo así que pese al agregar porcentajes de ceniza esta propiedad no parece ser alterada manteniéndose del índice de plasticidad en cero. Por otra parte los resultados de los Límites de Atterberg correspondientes a la calicata 02 si dieron valores razonables debido a que este suelo presentó mayor cantidad de partículas finas (45%), los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 6

Valores de LL, LP e IP de la calicata C-02

	LL	LP	IP
Natural	27.23	16.24	10.99
5%	26.42	13.73	12.69
10%	25.17	12.56	12.61
15%	23.54	10.96	12.57



Gráfica 3 Variación del LL, LP e IP de la muestra patrón y experimental C-02

Como podemos observar los valores de LL y LP se ven afectados al adicionarle ceniza al suelo en estado natural, de acuerdo a lo observado en la tabla V, el LL tiende a bajar mientras mayor porcentaje de ceniza tiene la muestra, de igual forma el LP disminuyó considerablemente para el 15% de ceniza, mientras que el IP tuvo un aumento con respecto a la muestra natural.

4. Ceniza de carbón

Con respecto a el ensayo de Fluorescencia de rayos X se envió la muestra al laboratorio especializado en Ensayos químicos, Metalúrgicos y servicios generales “El Trébol”, que tiene como RUC:20611589094 y está ubicado en la ciudad de Trujillo. Este ensayo tuvo que realizarse de manera externa ya que la que la obtención de las propiedades químicas

de la ceniza no podía realizarse en las instalaciones de la universidad debido a la falta del equipo necesario. Para la determinación del ensayo se tuvo en cuenta la normativa ASTM C618, además se le pidió al laboratorio toda la documentación correspondiente a la valides del ensayo como certificado de calibración de equipos y demás información que se encontrará en los anexos de la investigación.

Dicho esto, la realización del ensayo de Fluorescencia de rayos x fue necesario para poder determinar qué porcentajes de ciertos minerales están presentes en la composición de la ceniza para luego poder establecer qué influencia tienen en las propiedades mecánicas del suelo al adicionarle los porcentajes de ceniza establecidos.

Los datos obtenidos en el ensayo de Fluorescencia de rayos x se muestran a continuación:

Tabla 7
Resultados del análisis químico de la ceniza

COMPOSICIÓN QUÍMICA	RESULTADOS (%)	MÉTODO UTILIZADO
DIOXIDO DE SILICIO (Si O ₂)	13.82	Fluorescencia de rayos x
CARBONO (C)	62.03	
TRIOXIDO DE ALUMINIO (Al ₂ O ₃)	2.18	
TRIOXIDO DE HIERRO (Fe ₂ O ₃)	0.29	
OXIDO DE POTASIO (K ₂ O)	2.97	
OXIDO DE MAGNESIO (Mg O)	0.46	
PENTOXIDO DE FOSFORO (P ₂ O ₅)	6.17	
OXIDO DE COBRE (Cu O)	0.03	
TRIOXIDO DE AZUFRE (S O ₃)	3.37	
OXIDO DE ZINC (Zn O)	0.06	
OXIDO DE MANGANESO (Mn O)	1.69	

Adicionalmente a los datos presentados en la tabla VI se obtuvo que la densidad de la ceniza es de 1.26 gr/cm³, teniendo un tamaño promedio de partículas de 89.42 μm.

Entre los resultados importantes tenemos que se encontró una gran cantidad de Carbono (62.3%) y, en menores cantidades minerales como el Dióxido de silicio (13.82%) así como también un pequeño porcentaje de Pentóxido de Fosforo (6.17%) y trióxido de Azufre (3.37%).

5. Gravedad específica

Con respecto a este ensayo, se realizaron las gravedades específicas del suelo tanto para las muestras patrón como para las respectivas adiciones de 5%, 10% y 15% de ceniza de carbón, dando como resultados las siguientes gravedades específicas:

Tabla 8

Gravedad específica Muestra patrón y adiciones

	Natural	5%	10%	15%
C-01	2.634	2.575	2.473	2.464
C-02	2.665	2.656	2.639	2.594
C-03	2.643	2.596	2.528	2.486

PROPIEDADES MECÁNICAS

1. Resistencia al corte

Los resultados obtenidos del ensayo corresponden a los valores obtenidos para la cohesión y el ángulo de fricción de cada muestra en estado natural y luego con sus respectivas adiciones; para cada tipo de suelo en estado natural se realizaron un total de 10 cortes directos, mientras que para cada adición de igual manera se hicieron 10 cortes directos para cada porcentaje de 5%, 10% y 15%, siendo así que en total se tienen por calicata 40 cortes directos y el total de muestras ensayadas corresponde a 120 cortes directos. A continuación se presentarán los resultados obtenidos, prestando una especial importancia a los valores de Cohesión y Ángulo de rozamiento (ϕ) obtenidos.

Resultados Calicata Lambayeque C-01

Tabla 9

Cohesión y Angulo de fricción de muestra Natural C-01

	NATURAL	
	COHESIÓN	ϕ FRICCIÓN
M1	0.074	37.7
M2	0.022	35.6
M3	0.050	35.4
M4	0.083	34.0
M5	0.041	34.4
M6	0.035	36.1
M7	0.065	35.9
M8	0.012	34.2
M9	0.068	35.1
M10	0.021	38.7

Tabla 10

Cohesión y Ángulo de Rozamiento con 5% de ceniza C-01

	5%	
	COHESIÓN	Ø FRICCIÓN
M1	0.046	36.1
M2	0.170	36.3
M3	0.087	35.1
M4	0.046	38.9
M5	0.062	38.7
M6	0.101	36.3
M7	0.058	36.2
M8	0.036	39.6
M9	0.064	38.5
M10	0.097	37.0

Tabla 11

Cohesión y Ángulo de Rozamiento con 10% de ceniza C-01

	10%	
	COHESIÓN	Ø FRICCIÓN
M1	0.158	31.6
M2	0.129	33.8
M3	0.095	36.2
M4	0.276	33.4
M5	0.219	32.8
M6	0.152	33.4
M7	0.098	36.4
M8	0.176	35.3
M9	0.177	33.8
M10	0.192	30.6

Tabla 12

Cohesión y Ángulo de Rozamiento con 15% de ceniza C-01

	15%	
	COHESIÓN	Ø FRICCIÓN
M1	0.143	37.2
M2	0.120	42.9
M3	0.178	38.2
M4	0.197	38.3
M5	0.121	39.3
M6	0.102	41.3
M7	0.185	38.2
M8	0.162	37.4
M9	0.123	40.8
M10	0.161	38.5

Resultados Calicata Ferreñafe C-02

Tabla 13

Cohesión y Ángulo de Rozamiento de muestra natural C-02

	NATURAL	
	COHESIÓN	Ø FRICCIÓN
M1	0.149	33.1
M2	0.149	33.7
M3	0.174	34.2
M4	0.157	33.5
M5	0.177	34.2
M6	0.166	34.8

Tabla 14

Cohesión y Ángulo de Rozamiento con 5% de ceniza C-02

	5%	
	COHESIÓN	Ø FRICCIÓN
M1	0.153	33.6
M2	0.173	34.2
M3	0.166	33.6
M4	0.156	34.5
M5	0.175	34.2

Tabla 15

Cohesión y Ángulo de Rozamiento con 10% de ceniza C-02

	10%	
	COHESIÓN	Ø FRICCIÓN
M1	0.173	36.1
M2	0.167	35.9
M3	0.167	38.3
M4	0.168	35.9
M5	0.194	35.5

Tabla 16

Cohesión y Ángulo de Rozamiento con 15% de ceniza C-02

	15%	
	COHESIÓN	Ø FRICCIÓN
M1	0.189	34.1
M2	0.192	34.2
M3	0.173	35.0
M4	0.181	34.1
M5	0.177	35.2

Resultados Calicata Chiclayo C-03

Tabla 17

Cohesión y Ángulo de Rozamiento de muestra natural C-03

	NATURAL	
	COHESIÓN	Ø FRICCIÓN
M1	0.129	33.8
M2	0.15	33.7
M3	0.079	33.4
M4	0.168	34.3
M5	0.158	34.4
M6	0.159	35.6
M7	0.112	34.8
M8	0.152	34.0
M9	0.134	35.3
M10	0.119	33.8

Tabla 18

Cohesión y Ángulo de Rozamiento con 5% de ceniza C-03

	5%	
	COHESIÓN	Ø FRICCIÓN
M1	0.139	35.1
M2	0.177	34.9
M3	0.131	34.9
M4	0.154	33.6
M5	0.143	33.6
M6	0.158	33.5
M7	0.192	34.4
M8	0.13	34.7
M9	0.128	35.5
M10	0.141	33.8

Tabla 19

Cohesión y Ángulo de Rozamiento con 10% de ceniza C-03

	10%	
	COHESIÓN	Ø FRICCIÓN
M1	0.246	34.0
M2	0.413	30.8
M3	0.256	31.0
M4	0.275	31.9
M5	0.315	34.6
M6	0.3	34.9
M7	0.306	29.1
M8	0.263	31.6
M9	0.332	33.1
M10	0.223	34.0

Tabla 20
Cohesión y Ángulo de Rozamiento con 15% de ceniza C-03

	15%	
	COHESIÓN	Ø FRICCIÓN
M1	0.192	37.7
M2	0.172	37.7
M3	0.13	37.5
M4	0.133	39.4
M5	0.181	40.1
M6	0.168	38.9
M7	0.163	38.5
M8	0.152	38.3
M9	0.142	41.4
M10	0.163	37.1

2. Deformabilidad

La deformabilidad del suelo fue medida a través del ensayo de consolidación o denominado también ensayo edométrico, que básicamente consiste en realizar mediciones de deformación del suelo con respecto al tiempo aumentando progresivamente la carga. Los resultados obtenidos de las muestras en estado natural de las calicatas C-01, C-02 y C-03 se muestran a continuación:

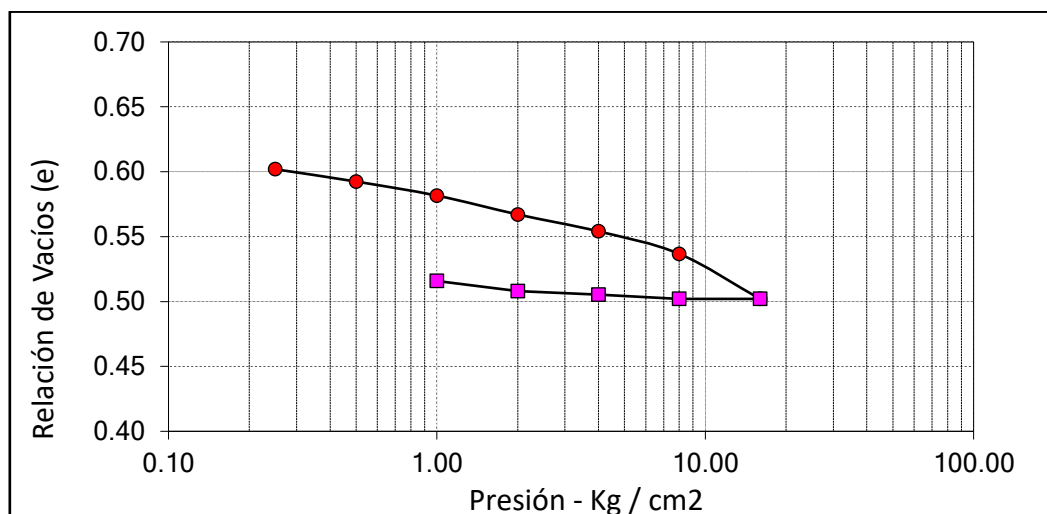
Calicata C-01

Tabla 21
Relación de vacíos con respecto al esfuerzo aplicado

Carga Aplicada (kg/cm ²)	Lectura Final (plg.)	2H (plg.)	Altura vacíos (plg.) 2H - 2Ho	Relación de Vacíos <i>e</i>
0	0	0.8661	0.3294	0.6138
0.25	0.0064	0.8597	0.3230	0.6019
0.50	0.0115	0.8546	0.3179	0.5924
1.00	0.0173	0.8488	0.3121	0.5816
2.00	0.0251	0.8410	0.3043	0.5671
4.00	0.0321	0.8340	0.2973	0.5540
8.00	0.0414	0.8247	0.2880	0.5367
16.00	0.0600	0.8061	0.2694	0.5020
8.00	0.0600	0.8061	0.2694	0.5020
4.00	0.0582	0.8079	0.2712	0.5054
2.00	0.0568	0.8093	0.2726	0.5080
1.00	0.0526	0.8135	0.2768	0.5158

Como se puede apreciar, la relación de vacíos inicial para la calicata C-01 fue de 0.6138 siendo así, que para la finalización del ensayo, luego de la fase de carga y

descarga de suelo se obtuvo una relación de vacíos final de 0.520; mientras que la presión de preconsolidación dio un valor de 7.2 kg/cm².



Gráfica 4 Curva de compresibilidad de suelo en estado natural C-01

Los valores de relación de vacíos y carga aplicada fueron utilizados para determinar la Curva de compresibilidad del suelo, tal y como se muestra en la gráfica 4; La curva obtenida representa la poca capacidad del suelo de recuperar las deformaciones que este ha sufrido, lo cual es razonable ya que al tratarse de una arena es poco probable que regrese a su forma inicial.

Calicata C-02

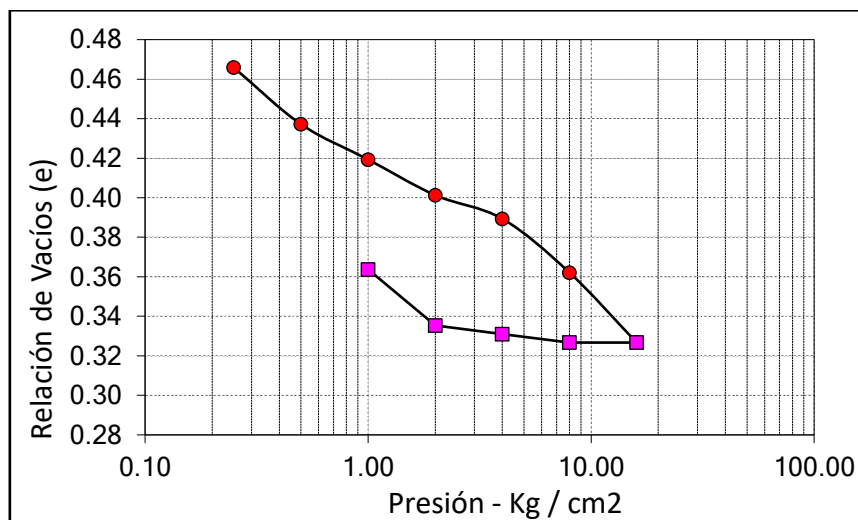
Se obtuvieron resultados que variaron con respecto a los otros suelos estudiados, sobre todo ya que este al tener mayor contenido de finos presenta una mayor deformabilidad y menor índice de vacíos.

Tabla 22

Relación de vacíos con relación al esfuerzo aplicado C-02

Carga Aplicada (kg/cm ²)	Lectura Final (plg.)	2H (plg.)	Altura vacíos (plg.) 2H - 2Ho	Relación de Vacíos <i>e</i>
0	0	0.7795	0.2529	0.4801
0.25	0.0075	0.7720	0.2454	0.4659
0.50	0.0226	0.7569	0.2303	0.4372
1.00	0.0320	0.7475	0.2209	0.4193
2.00	0.0415	0.7380	0.2114	0.4013
4.00	0.0478	0.7317	0.2051	0.3893
8.00	0.0621	0.7174	0.1907	0.3621
16.00	0.0808	0.6987	0.1721	0.3267
8.00	0.0808	0.6987	0.1721	0.3267
4.00	0.0786	0.7010	0.1743	0.3309
2.00	0.0762	0.7033	0.1766	0.3354
1.00	0.0613	0.7182	0.1916	0.3637

Como se puede apreciar en la tabla XXI la relación de vacíos inicial es de 0.4801, mientras que para el culmino del ensayo dicho valor fue reducido hasta 0.3267 mientras que la presión de preconsolidación fue de 3.10 kg/cm². A continuación se muestra la gráfica de deformabilidad del suelo correspondiente a la muestra de suelo ensayada.



Gráfica 5 Curva de compresibilidad del suelo en estado natural C-02

Los valores observados en la gráfica de deformabilidad del suelo son indicativos de que este tiende a recuperar las deformaciones sufridas durante la etapa de carga de mejor manera que el suelo arenosos de la calicata C-01 y C-03; esto se debe a que al tener un mayor IP con respecto a los otros suelos, tiende a recuperar de cierta manera su estado inicial.

Calicata C-03

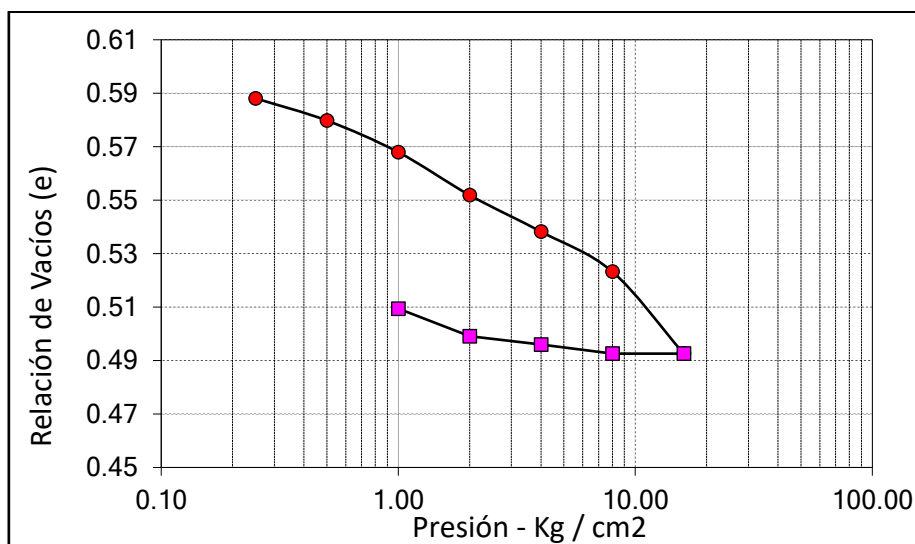
La calicata C-03 corresponde a un suelo arenoso, siendo así que la relación de vacíos inicial que se tuvo fue de 0.59 al iniciar el ensayo; luego del proceso de carga y descarga correspondiente al ensayo de consolidación esta relación de vacíos se vio afectada siendo así que se obtuvo un valor final de 0.4923. A continuación se muestran las relaciones de índices de vacíos en la siguiente tabla:

Tabla 23

Relación de vacíos con relación al esfuerzo aplicado C-02

Carga Aplicada (kg/cm ²)	Lectura Final (plg.)	2H (plg.)	Altura vacíos (plg.) 2H - 2Ho	Relación de Vacíos <i>e</i>
0	0	0.8661	0.3248	0.5999
0.25	0.0064	0.8597	0.3184	0.5881
0.50	0.0109	0.8552	0.3139	0.5798
1.00	0.0173	0.8488	0.3075	0.5680
2.00	0.0260	0.8401	0.2988	0.5519
4.00	0.0334	0.8327	0.2914	0.5382
8.00	0.0415	0.8246	0.2833	0.5233
16.00	0.0581	0.8080	0.2667	0.4926
8.00	0.0581	0.8080	0.2667	0.4926
4.00	0.0563	0.8099	0.2685	0.4959
2.00	0.0546	0.8116	0.2702	0.4991
1.00	0.0490	0.8172	0.2758	0.5094

Posteriormente se realizó la gráfica de compresibilidad de este suelo, teniendo la presión de preconsolidación un valor de 6.15 kg/cm²; por otro lado la muestra tuvo un comportamiento parecido al de la calicata C-01 ya que al tratarse de arenas las deformaciones que sufran serán prácticamente permanentes a diferencia de suelos con mayor contenido de finos.



Gráfica 6 Curva de compresibilidad del suelo en estado natural C-03

3. Permeabilidad

Los resultados obtenidos del ensayos de permeabilidad son indicativos de que esta característica del suelo se ve afectada mientras mayor cantidad de ceniza de carbón se le añade al suelo; siendo así que a mayor porcentaje de ceniza menor capacidad de dejar pasar el agua tiene la muestra. A continuación se muestran los resultados obtenidos del ensayo de Permeabilidad de carga constante.

Tabla 24

Coefficientes de permeabilidad C-01

	k (cm/s)
NATURAL	0.00048
5% CENIZA	0.00041
10% CENIZA	0.00027
15% CENIZA	0.00021

Tabla 25

Coefficientes de permeabilidad C-03

	K (cm/s)
NATURAL	0.000432
5% CENIZA	0.000346
10% CENIZA	0.000220
15% CENIZA	0.000147

Los resultados mostrados corresponden a las calicatas C-01 y C-03, siendo así que el mayor valor de K de permeabilidad fue obtenido en ambos casos para el suelo en estado natural, dando un valor de 0.00048 cm/s para la arena correspondiente a la zona de estudio de Lambayeque; mientras que fue de 0.000432 cm/s para la calicata obtenida en Chiclayo.

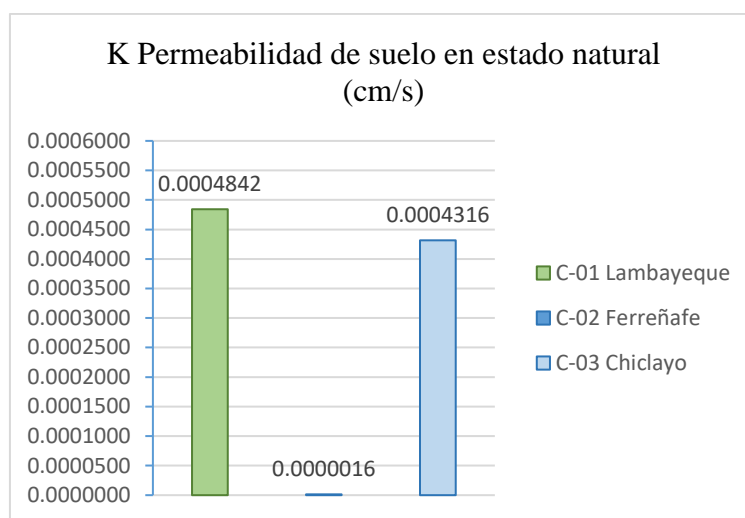
Por otro lado los valores de K de permeabilidad menores fueron obtenidos para el porcentaje de 15% de ceniza, dando los valores de 0.00021 cm/s para la calicata C-01; y de 0.000147 para la calicata C-03.

Por otro lado la permeabilidad en la calicata correspondiente a Ferreñafe C-02 fue evaluada de igual manera en el permeámetro de carga constante; sin embargo este suelo presento una permeabilidad muy baja debido al contenido mayor de finos en su composición de suelo, siendo así que solo se pudo evaluar la muestra en estado natural ya que, siguiendo con el mismo razonamiento de los resultados anteriormente se estableció que el adicionarle ceniza no haría más que volver aún más impermeable la muestra.

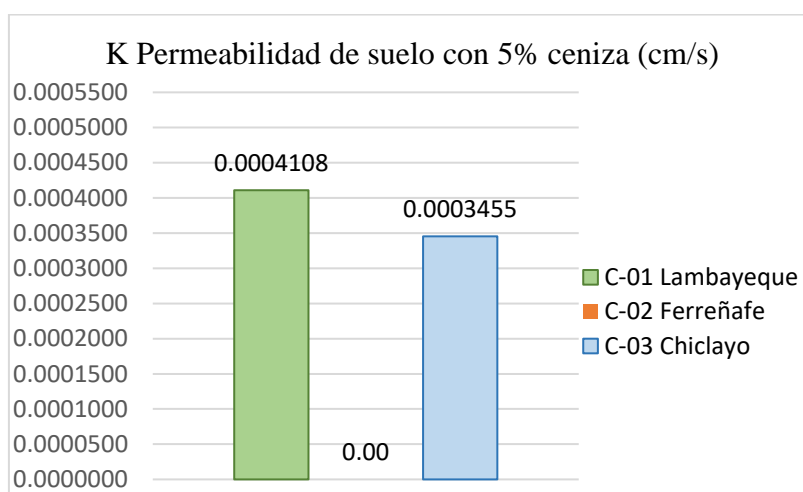
Tabla 26
Permeabilidad de calicata C-02

	K (cm/s)
NATURAL	0.00000157

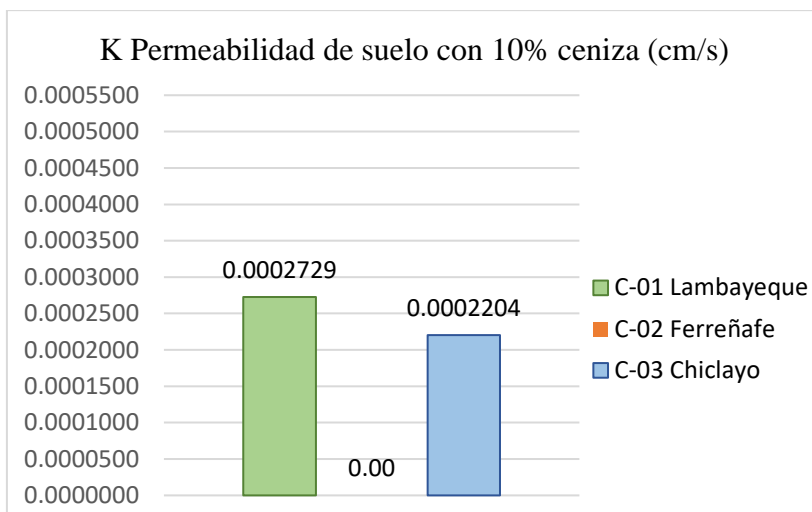
Como se pudo apreciar, la calicata C-02 tiene un coeficiente de permeabilidad muy bajo en relación a las calicatas C-01 y C-03 cuya explicación corresponde a que éstas se diferencian entre sí por la cantidad de finos que tienen en su composición; A continuación se muestra una gráfica que ilustra de mejor manera los resultados obtenidos:



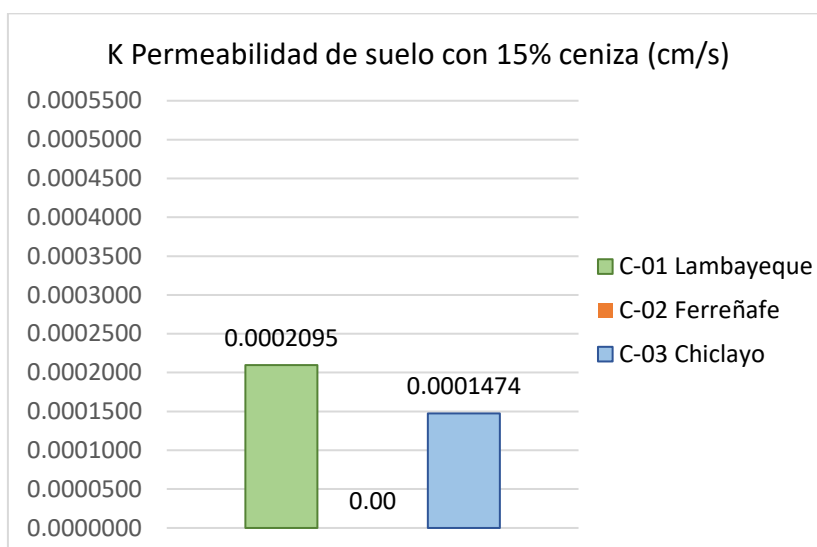
Gráfica 7 Valores de k de permeabilidad para suelo en estado natural



Gráfica 8 Coeficientes de permeabilidad para suelo con 5% de ceniza



Gráfica 9 Coeficientes de permeabilidad con 10% de ceniza



Gráfica 10 Coeficientes de permeabilidad con 15% de ceniza

4. Evaluación económica

Para la evaluación económica primero se deberán establecer las rutas de transporte de la ceniza, así como también la extensión y tipo de proyecto en el cual se va a utilizar; además es necesario determinar cuál sería el porcentaje óptimo de ceniza que se utilizará sin embargo la tendencia de los ensayos de corte directo no son claros para poder determinar este apartado.

Discusiones

Para el cumplimiento del objetivo general de la investigación: evaluar las propiedades físicas y mecánicas de suelos arenosos aplicando cenizas de carbón, se tuvieron que desarrollar los objetivos secundarios planteados a la investigación; de manera que el apartado correspondiente a las **discusiones** estará dedicado a la contrastación de los resultados obtenidos con las bases teóricas, normas, tesis de otros autores y antecedentes utilizados.

Con relación a **determinar las zonas de estudio por el método del muestreo espacial**; fueron tomadas las muestras representativas de suelos arenosos en cada provincia de la región Lambayeque; para ello se utilizaron los mapas de vulnerabilidad de INDECI, determinando así las zonas en donde había una gran probabilidad de encontrar este tipo de material. Se buscó en lo posible tener suelos de más o menos las mismas características, realizándose un muestreo de tipo espacial. Este tipo de muestreo se distingue de otros métodos debido a que la variable de estudio, que en este caso corresponde a suelos arenosos, se encuentra en un espacio geográfico determinado tal y como indica Rogerson, 2005 [24]. Por otra parte todas las Mab fueron extraídas y manipuladas según las recomendaciones de la Norma E050 suelos y cimentaciones.[23]

Por otra parte, para el ensayo que consistía en **obtener propiedades químicas de la ceniza por el método de fluorescencia de rayos x** fue analizada una muestra de ceniza proveniente de residuos provenientes de la fabricación de ladrillos artesanales. La cantidad de la muestra ensayada fue pasada previamente por el tamiz N°200 y fue enviada a laboratorio donde, posteriormente fue analizada mediante el ensayo de Fluorescencia de Rayos X (ASTM C618). Los resultados obtenidos indican que la composición mineral de la ceniza consiste en su mayor parte a partículas de Carbono (62.3%) y, en menores cantidades minerales como el Dióxido de silicio Si O₂ (13.82%) así como también un pequeño porcentaje de Pentóxido de Fosforo P₂O₅ (6.17%) y trióxido de Azufre S O₃ (3.37%). Siendo así que los minerales encontrados concuerdan con Alam et al., 2021, quien en su investigación menciona que los minerales típicamente encontrados en este tipo de cenizas corresponden a SiO₂, y óxidos de hierro y calcio con cantidades en peso de carbono[18]. La composición de la ceniza utilizada de acuerdo con sus minerales encontrados parece ser poco reactiva; lo que es contrastado con Yang et al., 2019 quien menciona que las cenizas provenientes de su incineración al aire libre tendrán baja reactividad debido a los altos gradientes de temperatura[19].

Con relación a los ensayos correspondientes para **obtener las propiedades físicas y mecánicas del suelo en condiciones normales** se hicieron los ensayos, primero, de las **propiedades físicas**. Los resultados obtenidos del ensayo de **granulometría** fueron, para la calicata C-01

una clasificación SUCS de SP lo cual indica que es una arena pobremente gradada, esto debido a que los coeficientes de uniformidad y curvatura obtenidos correspondieron a 3.2 y 2.5 respectivamente; para la calicata C-02 se realizó el mismo procedimiento establecido por la NTP 400.012 dando como resultado que se encontró en la muestra un 45% de material fino, por lo cual la clasificación SUCS del suelo fue de un suelo de tipo SC o arena arcillosa mientras que sus coeficientes de uniformidad y curvatura fueron de 2.3 y 0.6 respectivamente por lo cual también se trata de un material con partículas de masomenos el mismo tamaño; finalmente la calicata C-03 fue al igual que la primera, siendo un suelo de tipo SC con coeficientes de uniformidad y curvatura de 3.8 y 1.6. la clasificación establecida contrasta con lo mencionado por Crespo Villalaz, 2004, ya que indica que un suelo arenoso bien graduado deberá tener valores de coeficientes de uniformidad mayor a 6 y de coeficientes de curvatura entre 1 y 3, siendo así que ya que ninguno de nuestros suelos presento coeficientes parecidos se podría decir que los 3 son de mala gradación de partículas. Con respecto al **índice de plasticidad** del suelo la calicata C-01 y C-03 al ser arenas mal gradadas no presentaron IP; mientras que para la calicata C-02 se estableció que el LL fue de 27.23, el LP 16.24 y el IP fue de 10.99; los valores obtenidos con respecto al IP en este suelo podríamos contrastarlos con la investigación realizada por Chingay Nicolas y Quesquen Isique, 2024, que determinaron que el IP en arenas arcillosas encontradas en la Urb. Los Sauces, Pimentel correspondieron a valores de 8.11 y 8.54 para un contenido de finos del 40% [25]; esto se puede relacionar con nuestra investigación siendo así que el 10.99 de IP puede deberse a que la muestra de la calicata C-02 tenía en su composición una mayor cantidad de material finos (45%).

Las **gravedades específicas** en los suelos naturales ensayados fueron, para la calicata C-01 una Gs de 2.634, para el suelo de la calicata C-02 la Gs tuvo el valor de 2.665, y para la calicata C-03 la Gs fue de 2.643. Estos valores son típicos en suelos arenosos, cuyos valores de acuerdo a Das, 2013 están entre 2.64 y 2.66 mientras que para limos se tienen valores típicos entre 2.67 y 2.73.

Tabla 27

Gravedad específica suelo natural

Calicata	Gravedad Específica
C-01	2.634
C-02	2.665
C-03	2.643

Las gravedades específicas coinciden con lo mencionado por el autor citado anteriormente aunque para la calicata C-02 se tienen valores más cercanos al de la gravedad específica de un limo.[16]

Por otro lado para obtener las **propiedades mecánicas** primeramente se realizó el ensayo de **corte directo**, siendo este ensayo el que con más cantidad de muestras ensayadas contó (26); a continuación se muestran los valores promedio de la cohesión y el ángulo de rozamiento obtenidos para las muestras del suelo en estado natural.

Tabla 28

Cohesión y Angulo de rozamiento de suelo en estado natural

Calicata	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de rozamiento (Ø)
C-01	0.05	35.73
C-02	0.162	33.90
C-03	0.136	34.31

Los valores para cohesión y ángulo de rozamiento presentados son lógicos de acuerdo con [14] ya que para los suelos C-01 Y C-03 se aprecian valores de cohesión bajos con respecto al suelo de la calicata C-02, esto se explica ya que al tratarse de arenas la cohesión es muy baja o prácticamente nula.

Con relación a la deformabilidad del suelo se realizó el **ensayo edométrico o de consolidación** del suelo, este ensayo consistió en la aplicación de cargas en el suelo remoldeado para posteriormente tomar las lecturas de deformación que sufre en un determinado tiempo; a continuación se muestran las deformaciones sufridas para cada suelo de estudio:

Tabla 29

Asentamiento Muestras Naturales ensayo edométrico

Calicata	Asentamiento (cm)
C-01	0.134
C-02	0.156
C-03	0.124

Tal y como se esperaba, las deformaciones que sufrió el suelo con mayor contenido de finos fueron mayores; mientras que los suelos de las calicatas C-01 y C-03 fueron menores ya que al tratarse de arenas son suelos que al estar confinados sufren menos deformaciones. Los resultados de asentamiento en la calicata C-02 se puede contrastar con los resultados de [25] que estableció que las deformaciones que tuvo en un suelo de similares características

estuvieron entre 0.122 y 0.093 cm; que de cierta manera varían con los resultados obtenidos para la calicata C-02 pudiendo deberse a que en esta otra investigación los esfuerzos aplicados sobre la muestra fueron menores a los utilizados en la presente investigación. Otro dato importante a considerar y que deriva de la curva de compresibilidad son los índices de compresibilidad de los suelos, los cuales se obtienen dividiendo la relación de vacíos sobre la variación de la carga de consolidación: los valores obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 30

Coefficiente de compresibilidad de los suelos

Calicata	CC (cm ² /kg)
C-01	0.09
C-02	0.1
C-03	0.09

El coeficiente de compresibilidad de acuerdo con [15] representa a la relación deformación-esfuerzo del suelo sin tomar en cuenta el tiempo. Los valores obtenidos en los ensayos realizados se contrastan con los de [25], que en sus ensayos en suelos muy parecidos a la calicata C-02 fueron de 0.018 cm²/kg y de 0.020 cm²/kg, los coeficientes tan bajos en esta investigación y su variación con respecto a la nuestra se deben principalmente a la carga menor que usaron durante sus ensayos llegando a unos esfuerzos de 4kg/cm² mientras que en nuestra investigación llegamos a esfuerzos de casi 2 veces más.

Finalmente se realizó el ensayo de **permeabilidad** de carga constante para el suelo en estudio, los resultados obtenidos para la calicata C-01 y C-03 se indican a continuación:

Tabla 31

Coefficiente de permeabilidad de suelo en estado natural

Calicata	k (cm/s)
C-01	0.00048
C-03	0.00043

Los valores de coeficiente de permeabilidad obtenidos, de acuerdo con [15] para arenas muy finas, limos o mezclas de arena limo y arcilla deben tener valores típicos de entre 1×10^{-3} y 1×10^{-7} , lo cual explica los valores obtenidos en los ensayos al tratarse de arenas finas. Con relación a la calicata C-02 se determinó que al tratarse un suelo con un porcentaje mayor de finos respecto a las 2 anteriores calicatas el coeficiente de permeabilidad iba a ser mucho menor tal y como se muestra:

Tabla 32

Suelo con mayor contenido de finos

Calicata	k (cm/s)
C-02	0.00000157

La permeabilidad de este suelo es muy baja, y esto se puede explicar debido a la cantidad de finos en la muestra ya que este fue de aproximadamente un 45% , pese a esto según [15], estos valores aún estarían dentro del rango habitual para suelos con mezclas de arena arcilla y limo. De manera análoga a lo anteriormente mostrado, se obtuvieron **las propiedades físicas y mecánicas del suelo aplicando 5%,10% y 15% de ceniza de carbón**; siendo así que con respecto a la **granulometría**; esta no se vio afectada al agregarle ceniza de carbón mineral dado que la clasificación del suelo siguió siendo para la calicata C-01 y C-03 arenas pobremente gradadas; sin embargo y coincidiendo con lo dicho por Mory Espinoza, 2020 el adicionarle ceniza para la evaluación de la granulometría dependerá también del tamaño de partícula de ceniza que se le adicione a la muestra ya que de acuerdo a ello la tendencia de gradación de las partículas estará mejor distribuida. Con relación al **índice de plasticidad** los suelos C-01 y C-03 no se vieron afectados por las adiciones de ceniza:

Tabla 33

Índices de plasticidad con adiciones

Calicata	+ 5% ceniza	+ 10% ceniza	+ 15% ceniza
C-01	NP	NP	NP
C-03	NP	NP	NP

Para la calicata C-02 si se vio una afección en los límites de consistencia siendo así que los valores de LL,LP y IP se dieron los siguientes resultados:

Tabla 34

Límites de consistencia de suelo C-02 con adiciones

	+ 5% ceniza	+ 10% ceniza	+ 15% ceniza
LL	26.42	25.17	23.54
LP	13.73	12.56	10.96
IP	12.69	12.61	12.57

Según lo establecido por Casagrande [15], al comparar suelos de igual IP con LL que va en aumento, la compresibilidad aumenta, la constante de permeabilidad aumenta y la resistencia en seco del suelo disminuyen. De acuerdo con resultados para los límites con ceniza se puede establecer la relación de que, al tener masomenos el mismo índice de plasticidad para los

porcentajes añadidos; es en el LL en donde más se diferencian y bajo la misma lógica aplicada por Casagrande, se establece que a mayores porcentajes de ceniza la compresibilidad tenderá a disminuir, el suelo será menos permeable y la resistencia en seco del suelo aumenta.

Con respecto a la determinación de las **gravidades específicas** hechas con ceniza, se tuvieron los siguientes resultados:

Tabla 35
Gravedad específica con ceniza

Calicata	5% ceniza	10% ceniza	15% ceniza
C-01	2.575	2.473	2.464
C-02	2.656	2.639	2.594
C-03	2.596	2.528	2.486

La variación de esta propiedad del suelo tiene una tendencia clara, ya que al aumentar los porcentajes de ceniza las gravidades específicas son cada vez menores; la contrastación de estos resultados se podría hacer aunque de cierta manera de manera indirecta con lo determinado por [13], quien determinó en sus ensayos de CBR que al aumentar proporcionalmente porcentajes de ceniza la máxima densidad seca era menor mientras más porcentaje de ceniza se tenga, esto se explica debido a que la densidad de la ceniza es muy baja con respecto a la del suelo natural siendo que para esta tesis se determinó que fue de 1.26 gr/cm³.

Las propiedades mecánicas correspondientes al ángulo de rozamiento y cohesión de las muestras con adiciones fueron obtenidas del ensayo de **corte directo**, los valores que se muestran a continuación corresponden a los valores promedio de cohesión y ángulo de rozamiento de la totalidad de especímenes ensayados (75)

Tabla 36
Cohesión y Angulo de rozamiento de suelo C-01 con adiciones

Calicata	% Adición	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de rozamiento (Ø)
C-01	5%	0.08	37.29
	10%	0.17	33.72
	15%	0.15	39.20

Tabla 37
Cohesión y Angulo de rozamiento de suelo C-02 con adiciones

Calicata	% Adición	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de rozamiento (Ø)
C-02	5%	0.16	34.03
	10%	0.17	35.93
	15%	0.18	34.50

Tabla 38

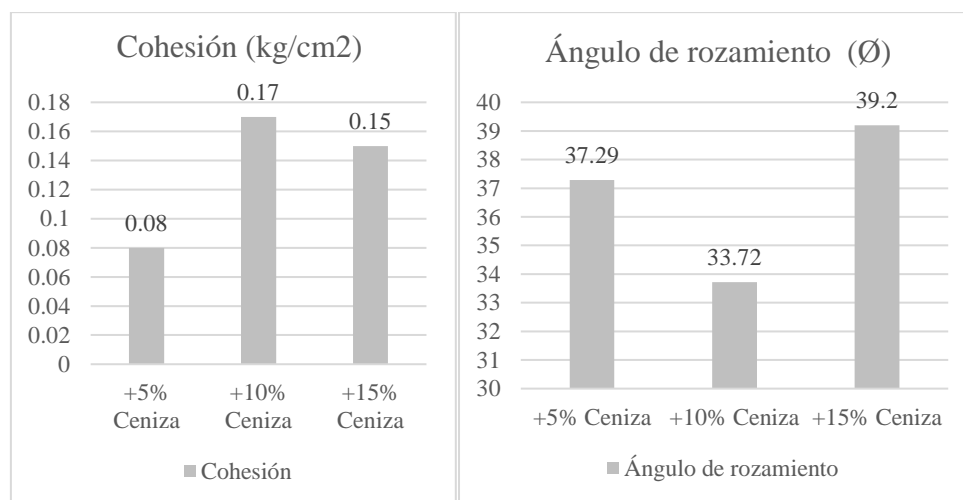
Cohesión y Angulo de rozamiento de suelo C-03 con adiciones

Calicata	% Adición	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de rozamiento (Ø)
C-03	5%	0.15	34.40
	10%	0.29	32.51
	15%	0.16	38.65

Como se puede apreciar los valores del Angulo de rozamiento obtenidos se mantienen más o menos iguales en los 3 tipos de suelos siendo el mayor de estos el correspondiente a la calicata C-01 con un ángulo de 39.2° y un porcentaje de adición de 15%; sin embargo es en la cohesión donde se aprecia la mayor variación de los datos tomados siendo la mayor de estas 0.29 kg/cm² para un 10% de adición en la calicata C-03; mientras que el menor valor se tuvo para el 5% de adición en la calicata C-01.

Ilustración 1

Valores de cohesión y Angulo de rozamiento C-01

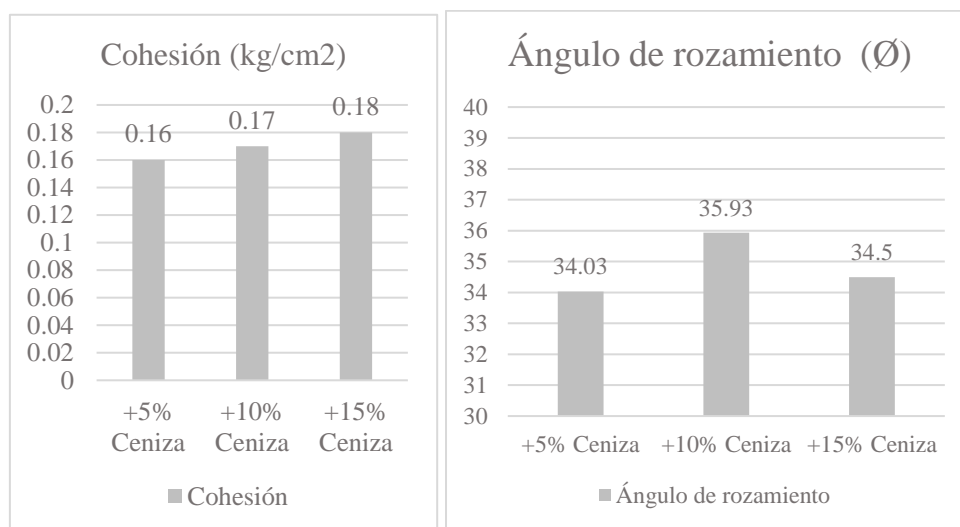


Tal y como se puede apreciar en las gráficas de barras, los valores con respecto a la cohesión en el suelo tienden a subir hasta 0.170 kg/cm², sin embargo esta tendencia no suele mantenerse a mayor porcentaje de ceniza de suelo puesto que para el 15% de ceniza este valor vuelve a bajar hasta 0.15 kg/cm².

Con respecto al ángulo de fricción se aprecia que para un 5% de ceniza el Angulo de fricción corresponde a 37.29° mientras que para el 10% de ceniza vuelve a bajar y posteriormente tiende a subir para un 15% de ceniza. La correlación que se puede apreciar es que al aumentar la cohesión tiende a bajar el ángulo de rozamiento del suelo.

Ilustración 2

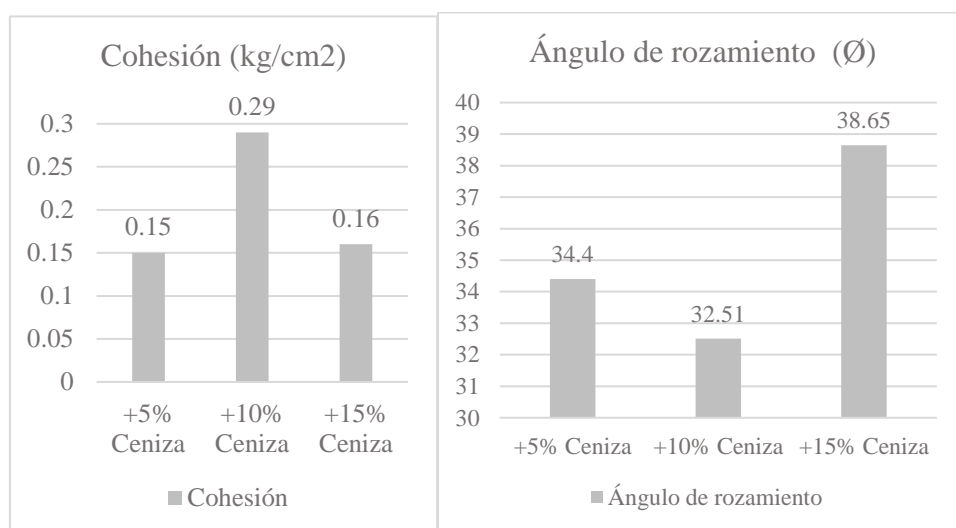
Valores de cohesión y ángulo de rozamiento C-02



En cuanto a la calicata C-02 se observa que la cohesión tiene un comportamiento lineal con relación a las adiciones de ceniza siendo así que a mayor porcentaje de ceniza mayores valores de cohesión se tuvieron en las muestras ensayadas; por otro lado la tendencia que se sigue con respecto al ángulo de rozamiento indica que presentó un mayor valor con el 10% de ceniza sin embargo no se presentaron cambios bruscos en la variación de ambos valores de cohesión y ángulo de rozamiento, manteniéndose prácticamente igual para los porcentajes de ceniza añadidos.

Ilustración 3

Valores de cohesión y ángulo de rozamiento C-03



La calicata C-03 presenta una tendencia muy similar a la calicata C-01, esto ya que son suelos de prácticamente la misma composición. Sin embargo para este suelo se obtienen valores más altos para la cohesión, llegando esta hasta un valor promedio máximo de 0.29 kg/cm².

Los resultados obtenidos con respecto a los ensayos de cortes directos con ceniza podríamos corroborarlos con los hechos por Cueva Melgarejo y Chang Farfan, 2019 quienes en su

investigación adicionaron un 10% de cenizas volantes de carbón a suelos arenosos, obteniendo valores de hasta 34.57° en el ángulo de fricción y, con adición de 10% de ceniza +10% de cemento llegó a establecer un ángulo aun mayor con un valor de 37.59° .

Tabla 39

Comparación de Angulo de rozamiento con otra investigación

Calicata	% Adición	Ángulo de rozamiento (ϕ)
C-01	10% ceniza	33.72
C-02	10% ceniza	35.93
C-03	10% ceniza	32.51
C-01 (Cueva)	10% ceniza volante de carbón	34.57

La comparación realizada para un 10% de adición de cenizas establece que los valores obtenidos no tienen una variación considerable respecto a las obtenidas en nuestra investigación. Es importante mencionar también que en la investigación del otro autor fue una ceniza que de igual manera proviene de una ladrillera.

Finalmente se realizó el ensayo de **permeabilidad de suelo** con las adiciones de 5%, 10% y 15%; los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 40

Coef. de permeabilidad con adición de cenizas

Calicata	% Adición	k (cm/s)
C-01	5% ceniza	0.00041
	10% ceniza	0.00027
	15% ceniza	0.00021
Calicata	% Adición	k (cm/s)
C-03	5% ceniza	0.000346
	10% ceniza	0.000220
	15% ceniza	0.000147

Se observa que la permeabilidad del suelo para la calicata C-01 y C-03 va disminuyendo con relación al porcentaje de ceniza aplicado, esto es explicado en la investigación de Noaman et al., 2022 quien en su artículo hace mención de que la adición de cenizas volantes generalmente actúa disminuyendo la permeabilidad de manera más efectiva en suelos arcillosos, sin embargo lo contrario pasa con los suelos arenosos ya que al adicionarle partículas más finas al suelo lo normal es que estas partículas ocupen de mejor manera los espacios e impidan el paso del agua; por otra parte se menciona también que el valor de coeficiente de permeabilidad está muy

relacionado con el tiempo de curado de la muestra ya que investigaciones indican que para tiempos de curado mayores se espera un aumento en la permeabilidad del suelo para porcentajes de 0 a 16% de cenizas volantes de carbón sobre todo en suelos arcillosos.[26]

Con todo lo anteriormente desarrollado, se **compararon los resultados obtenidos en condiciones normales y aplicando ceniza de carbón**; con respecto a la **granulometría** del suelo no se obtuvo ninguna variación significativa ya que básicamente la clasificación de los suelos estudiados no se modificó. Por otro lado para los ensayos de **plasticidad** del suelo, se estableció que en cuanto a las calicatas C-01 y C-03 se tuvieron IP iguales a cero de manera que esta propiedad física tampoco se vio afectada, para la calicata C-02 si se tuvieron variaciones en relación a la plasticidad dado que el IP natural si se vio afectado al adicionarle los porcentajes de 5%, 10% y 15% de ceniza tal y como se muestra:

Tabla 41 Límites de consistencia calicata C-02

	Natural	+ 5% ceniza	+ 10% ceniza	+ 15% ceniza
LL	27.23	26.42	25.17	23.54
LP	16.24	13.73	12.56	10.96
IP	10.96	12.69	12.61	12.57

Se puede apreciar que, el adicionarle ceniza al suelo en estado natural aumenta el IP para cualquier porcentaje de ceniza utilizado mientras que análogamente disminuye tanto el LL como el LP al adicionar ceniza a la muestra; dado que para los porcentajes de adición de ceniza el IP se mantiene masomenos constante podríamos mencionar lo establecido por Casagrande quien menciona que dada la variación del LL es probable que las muestras con ceniza la compresibilidad tenderá a disminuir , el suelo será menos permeable y la resistencia en seco del suelo aumenta.[15]

Con respecto a las **gravedades específicas**; se tiene lo siguiente:

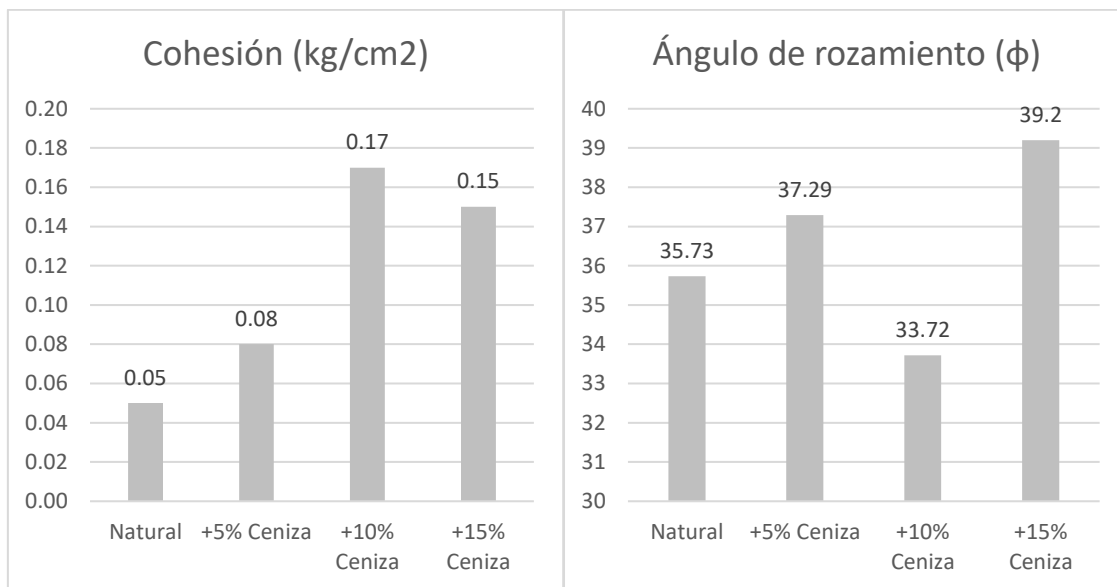
Calicata	Natural	5% ceniza	10% ceniza	15% ceniza
C-01	2.634	2.575	2.473	2.464
C-02	2.665	2.656	2.639	2.594
C-03	2.643	2.596	2.528	2.486

Como se puede apreciar la tendencia es clara, la gravedad específica del suelo se ve afectada por las adiciones de ceniza, siendo así que a mayores porcentajes de adición las gravedades específicas se ven reducidas, esto puede ser contrastado indirectamente con lo mencionado por [13] ya que explica que la densidad del suelo se ve afectada por las adiciones de ceniza que al

presentar densidades muy bajas, hacen que el suelo tenga menores valores de gravedad específica, peso volumétrico o máxima densidad seca.

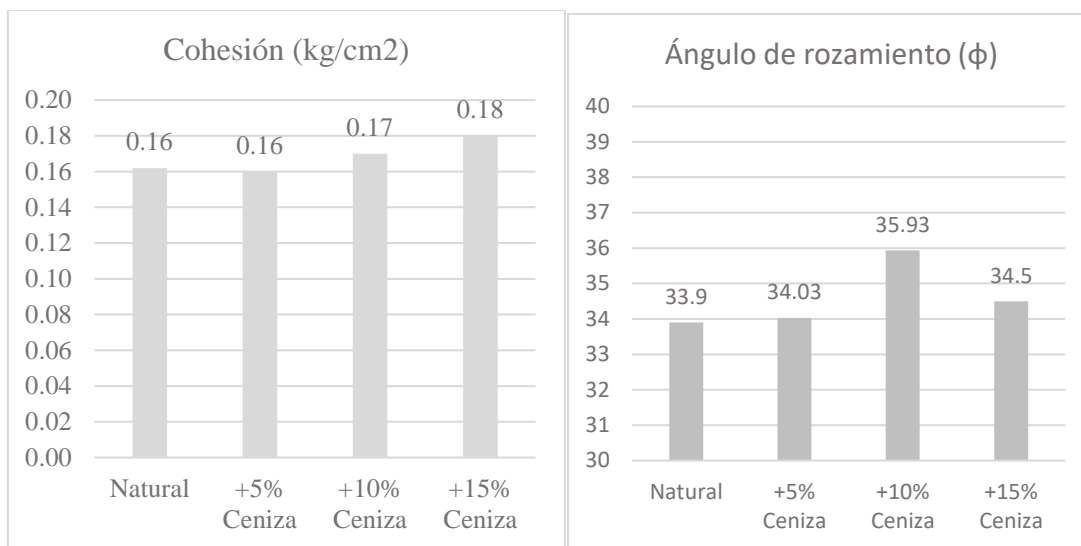
Finalmente los valores para la cohesión y ángulo de rozamiento y correspondientes a las propiedades mecánicas del suelo se muestran a continuación:

Tabla 42 Valores para cohesión y ángulo de rozamiento C-01

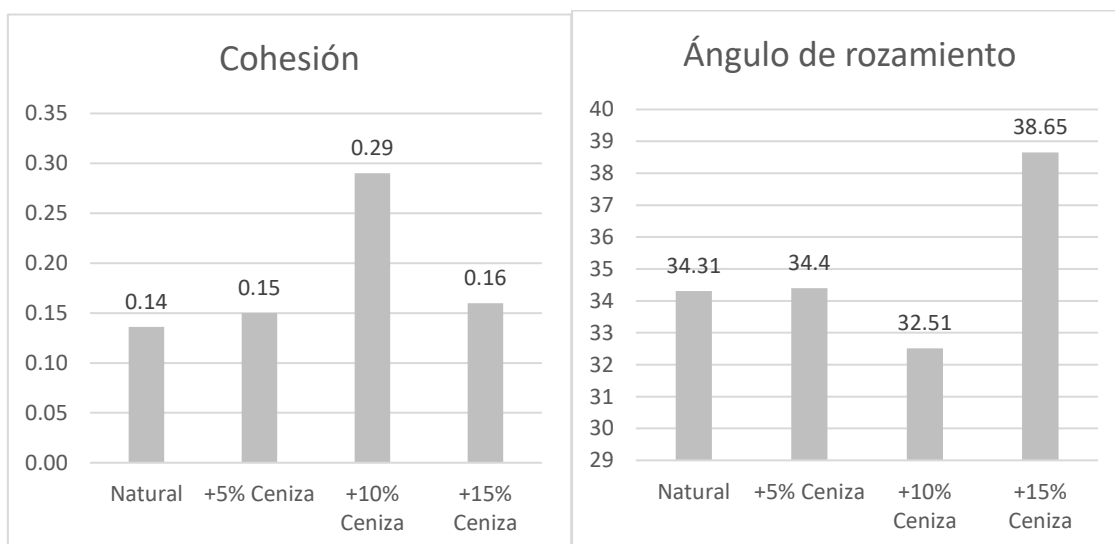


Como se puede apreciar la cohesión mejora positivamente de acuerdo con la muestra en estado natural dado que inicialmente este valor es muy bajo 0.05 kg/cm²; mientras que los valores para el ángulo de fricción se ven favorecidos con un 15% de adición de ceniza llegando hasta el valor pico de 39.2°. Por otro lado es para el 5% de ceniza en donde menor mejoría presenta el suelo ya que la cohesión aumenta solo en 0.03 kg/cm² y el ángulo de rozamiento en 1.56°. Para el 10% de adición de ceniza el comportamiento del suelo tiende a aumentar la cohesión considerablemente respecto al natural, llegando hasta 0.17 kg/cm², mientras que los valores para el ángulo de rozamiento bajan 3.57° con respecto al que tiene el suelo en estado natural. Es con el 15% de ceniza que se tienen mejores resultados con respecto al natural ya que los valores de cohesión aumentan de 0.05 kg/cm² a 0.15 kg/cm² y el ángulo de rozamiento aumentan de 35.73° a 39.2°.

Tabla 43 Valores para cohesión y ángulo de rozamiento C-02



El análisis correspondiente de la calicata C-02 indica que en cuanto a la mejora de cohesión tuvo una tendencia constante ya que a mayores porcentajes de ceniza el valor de la cohesión fue mayor, llegando hasta 0.18 kg/cm² para una adición del 15% de ceniza, por otra parte el comportamiento del ángulo de rozamiento no tuvo esta tendencia clara, siendo que para el 10% de ceniza el valor del ángulo de rozamiento aumento hasta 35.93° siendo este el mayor obtenido. Dado que las diferencias entre el aumento de valores de cohesión y ángulo de rozamiento de los porcentajes de 10% y 15% se podría decir que para este tipo de suelo en específico el porcentaje adecuado para la mejora de sus propiedades sería del 10% de ceniza con valores de 0.17 kg/cm² para la cohesión y de 35.93° para el ángulo de rozamiento.



La tendencia de los valores obtenidos para la calicata C-03 son similares a los de la calicata C-01, pero en este caso el 10% de adición de ceniza sería el más conveniente a utilizar ya que aumenta considerablemente la cohesión entre las partículas, mientras que sufre una pequeña disminución en el ángulo de rozamiento.

Finalmente al comparar los valores de permeabilidad de los suelos en estado natural con las adiciones del 5%, 10% y 15%, se puede establecer que a mayor porcentaje de ceniza menos permeable es el suelo; de acuerdo con [26] la adición de cenizas volantes generalmente actúa disminuyendo la permeabilidad de manera más efectiva en suelos arcillosos, sin embargo lo contrario pasa con los suelos arenosos ya que al adicionarle partículas más finas al suelo lo normal es que estas ocupen de mejor manera los espacios e impidan el paso del agua. Los máximos valores de permeabilidad del suelo fueron de $k=0.00048$ (cm/s) para la arena de la calicata C-01 mientras que para la calicata C-03 fue de $k=0.000432$ (cm/s), estos valores de acuerdo con [15] son típicos para arenas muy finas, limos o mezclas de arena limo y arcilla (1×10^{-3} y 1×10^{-7}), por otra parte la calicata C-02 tuvo una permeabilidad de $k=0.00000157$ cm/s; El menor valor de permeabilidad estuvo determinado por los porcentajes de adición del 15% reduciendo los valores de permeabilidad para ambos suelos C-01 y C-03 en casi el doble.

Conclusiones

Se determinaron las zonas de estudio por el método del muestreo espacial; fueron tomadas todas las muestras representativas de suelos arenosos en cada provincia de la región Lambayeque utilizando los mapas de vulnerabilidad de INDECI. Todas las MAB fueron extraídas y manipuladas según las recomendaciones de la Norma E050 suelos y cimentaciones.

Las propiedades químicas de la ceniza obtenidas por el método de fluorescencia de rayos x indican que la composición mineral de la ceniza consiste en su mayor parte a partículas de Carbono (62.3%) y, en menores cantidades minerales como el Dióxido de silicio Si O₂ (13.82%) así como también un pequeño porcentaje de Pentóxido de Fosforo P₂O₅ (6.17%) y trióxido de Azufre S O₃ (3.37%).

Se realizaron los ensayos de análisis granulométrico con la guía de la norma NTP 339.118 siendo así que fueron ensayadas las 03 muestras extraídas en las provincias de Chiclayo, Lambayeque y Ferreñafe. Para la calicata C-01 se tuvo una clasificación SUCS de SP lo cual indica que es una arena pobremente gradada, esto debido a que los coeficientes de uniformidad y curvatura obtenidos correspondieron a 3.2 y 2.5 respectivamente, mientras que su clasificación AASHTO es de A-3. Para la calicata C-02 se realizó el mismo procedimiento establecido por la NTP 400.012 dando como resultado que se encontró en la muestra un 45% de material fino, por lo cual la clasificación SUCS del suelo fue de un suelo de tipo SC o arena arcillosa mientras que sus coeficientes de uniformidad y curvatura fueron de 2.3 y 0.6 respectivamente teniendo una clasificación ASHTO de A-2-6; finalmente la calicata C-03 fue al igual que la primera, un suelo de tipo SC con coeficientes de uniformidad y curvatura de 3.8 y 1.6 mientras que su clasificación AASHTO corresponde a un suelo de tipo A-3.

Con respecto a los límites de consistencia se determinó que ninguno de los suelos de las calicatas C-01 y C-03 presentaron plasticidad ya sea en estado natural o con adiciones; mientras que la calicata C-02 se determinó que el IP en estado natural fue de 10.96, mientras que al adicionarle ceniza presento valores de 12.69, 12.61 y 12.57 para los porcentajes de 5%, 10% y 15% respectivamente. Es importante que también se vio una tendencia clara de disminución del LL en estado natural que fue de 27.33 a un valor de 23.54 para un 15% de adición. El LP también se reduce de 16.24 para el suelo en estado natural, hasta un valor mínimo de 10.96 para la adición del 15% de ceniza. Las gravedades específicas del suelo adicionado con ceniza presentaron una gran disminución con respecto a las muestras naturales debido a la baja densidad de la ceniza utilizada como estabilizante.

Del ensayo edométrico se determinó que las deformaciones que sufrió el suelo con mayor contenido de finos fueron mayores; mientras que los suelos de las calicatas C-01 y C-03 fueron

menores ya que al tratarse de arenas son suelos que al estar confinados sufren menos deformaciones. La relación de vacíos inicial para la calicata C-01 fue de 0.6138 mientras que la final fue de 0.520, la presión de preconsolidación dio un valor de 7.2 kg/cm² y los asentamientos totales fueron de 0.134 cm con un CC de 0.09. Para la Calicata C-02 la relación de vacíos inicial es de 0.480 mientras que al final del ensayo fue reducida hasta 0.3267, la presión de preconsolidación fue de 3.10 kg/cm² y el asentamiento total fue de 0.156 cm con un CC de 0.1 La calicata C-03 corresponde a un suelo arenoso, siendo así que la relación de vacíos inicial que se tuvo fue de 0.59 y la final 0.49, la presión de preconsolidación tuvo un valor de 6.15 kg/cm² y el asentamiento total fue de 0.124 cm con un CC de 0.09.

Los valores de permeabilidad obtenidos de los suelos en estado natural con las adiciones del 5%,10% y 15% establecieron que a mayor porcentaje de ceniza menos permeable es el suelo; los máximos valores de permeabilidad del suelo fueron los ensayados en las muestras naturales y dieron coeficientes de permeabilidad de $k=0.00048$ (cm/s) para la arena de la calicata C-01 mientras que para la calicata C-03 fue de $k=0.000432$ (cm/s), por otra parte la calicata C-02 se tuvo una permeabilidad de $k=0.00000157$ cm/s; Los menores valor de permeabilidad en los suelos C-01 y C-03 estuvieron determinados por los porcentajes de adición del 15% reduciendo los valores de permeabilidad a valores de $k=0.00021$ cm/s y $k=0.000147$ respectivamente.

Finalmente y con respecto al ensayo de corte directo. Para la calicata C-01 la cohesión mejora positivamente de acuerdo con la muestra en estado natural dado que inicialmente este valor es muy bajo 0.05 kg/cm²; mientras que los valores para el ángulo de fricción se ven favorecidos con un 15% de adición de ceniza llegando hasta el valor pico de 39.2°. Por otro lado es para el 5% de ceniza en donde menos mejoría presenta el suelo ya que la cohesión aumenta solo en 0.03 kg/cm² y el ángulo de rozamiento en 1.56°. Para el 10% de adición de ceniza el comportamiento del suelo tiende a aumentar la cohesión considerablemente respecto al natural, llegando hasta 0.17 kg/cm², mientras que los valores para el ángulo de rozamiento bajan 3.57° con respecto al que tiene el suelo en estado natural. Es con el 15% de ceniza que se tienen mejores resultados con respecto al natural ya que los valores de cohesión aumentan de 0.05 kg/cm² a 0.15 kg/cm² y el ángulo de rozamiento aumentan de 35.73° a 39.2°. Para la calicata los resultados indican que la mejora de cohesión tuvo una tendencia constante ya que a mayores porcentajes de ceniza, el valor de la cohesión fue mayor llegando hasta 0.18 kg/cm² para una adición del 15% de ceniza; por otra parte el comportamiento del ángulo de rozamiento no tuvo una tendencia clara, siendo que para el 10% de ceniza el valor del ángulo de rozamiento aumento hasta 35.93° siendo este el mayor obtenido. Dadas las diferencias en el aumento de valores de cohesión y ángulo de rozamiento de los porcentajes de 10% y 15% se podría decir

que para este tipo de suelo el porcentaje adecuado para la mejora de sus propiedades sería del 10% de ceniza con valores de 0.17 kg/cm² para la cohesión y de 35.93° para el ángulo de rozamiento. La calicata C-03 presenta una tendencia muy similar a la calicata C-01, esto ya que son suelos de prácticamente la misma composición. Sin embargo para este suelo se obtienen valores más altos para la cohesión, llegando esta hasta un valor promedio máximo de 0.29 kg/cm².

Referente al análisis económico aún no se pudo llegar a desarrollar ese objetivo ya que principalmente la tendencia de los resultados de corte directo indica que el porcentaje óptimo de ceniza para mejorar las propiedades mecánicas varían de un suelo a otro.

Recomendaciones

Se recomienda la utilización de materiales que complementen el uso de la ceniza como material cementante, tales como la cal, cemento u algún otro activador alcalino para la ceniza; con la finalidad de realizar mejoras aún más significativas en el mejoramiento de las propiedades físicas y mecánicas de suelos arenosos.

En investigaciones a futuro y que demanden el uso de cenizas volantes se recomienda el uso de porcentajes más razonables ya que al ser un material poco denso el volumen que podría llegar a ser necesario para la ejecución de una obra media o grande puede llegar a ser muy alto.

Se recomienda la investigación y aplicación de tecnologías que permitan determinar las propiedades físicas de maneras más exactas y que permitan contrastarlas con los métodos comúnmente utilizados.

Se recomienda continuar la investigación estableciendo los porcentajes óptimos de humedad para la posterior compactación del suelo con ceniza de carbón mineral; así como también cuáles serían los mejores métodos de compactación en suelos arenosos con ceniza.

Se sugiere utilizar tiempos de curado del suelo con ceniza mucho más extensos con la finalidad de que las propiedades cementantes de las cenizas actúen durante una mayor cantidad de tiempo.

Referencias

- [1] A. Montejo Fonseca, *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*, Segunda reimpresión de la segunda edición. Universidad Católica de Colombia: Stella Valbuena de Fierro, 2002.
- [2] A. J. Choobbasti y S. S. Kutanaei, «Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica», *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 9, n.º 5, pp. 981-988, oct. 2017, doi: 10.1016/j.jrmge.2017.03.015.
- [3] J. W. dos S. Ferreira, M. D. T. Casagrande, y R. S. Teixeira, «Sample dimension effect on equations controlling tensile and compressive strength of cement-stabilized sandy soil under optimal compaction conditions», *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, p. e00763, dic. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00763.
- [4] C. Vivek Kumar, A. N. Swaminathen, A. Vittalaiah, y C. Raja Kumar, «Pavement Subgrade Stabilized with Waste coal Ash and Geosynthetics: An Experimental Study and Multiple Regression Modelling», *Materials Today: Proceedings*, vol. 52, pp. 1543-1550, ene. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.11.233.
- [5] H. MolaAbasi, S. Naderi Semsani, M. Saberian, A. Khajeh, J. Li, y M. Harandi, «Evaluation of the long-term performance of stabilized sandy soil using binary mixtures: A micro- and macro-level approach», *Journal of Cleaner Production*, vol. 267, p. 122209, sep. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122209.
- [6] R. Renjith, D. Robert, S. Setunge, S. Costa, y A. Mohajerani, «Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction», *Journal of Cleaner Production*, vol. 294, p. 126264, abr. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126264.
- [7] E. S. Cañar Tiviano, «Análisis comparativo de la resistencia al corte y estabilización de suelos arenosos finos y arcillosos combinadas con ceniza de carbón», Trabajo experimental previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 2017. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/25266>
- [8] D. A. Cueva Melgarejo y B. E. Chang Farfan, «Estabilización de suelos arenosos adicionando cenizas volantes de carbón y cemento tipo I con fines de cimentación superficial en el asentamiento humano Villa los Jardines del distrito de Chimbote, Áncash -2019», Tesis para obtener el título profesional de Ingeniera Civil, Universidad Cesar Vallejo, Chimbote, Perú, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12692/42753>
- [9] J. R. Encalada Oncihuay, «Aplicación de cenizas volantes de carbón y cal para mejorar la estabilización de suelos arenosos en la ciudad Pachacútec, Ventanilla, Callao», Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Cesar Vallejo, Lima, Perú, 2020. Accedido: 18 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/71396>
- [10] C. S. Ricra Huaman, «Adición de ceniza de caña de azúcar en la estabilización de suelos tropicales en el centro poblado Naranjal, Selva Central - 2021», Tesis para optar el título profesional de Ingeniera Civil, Universidad Continental, Huancayo, Perú, 2021. Accedido: 18 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/11453/2/IV_FIN_105_TE_Ricra_Huaman_2022.pdf
- [11] R. S. Requejo Carrillo, «Estabilización de suelos arenosos utilizando oryza sativa (arroz), Pueblo joven Las dunas – Lambayeque- Perú 2019», Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil, Universidad Señor de Sipán, Chiclayo, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://orcid.org/0000-0002-4767-1691>

- [12] Y. I. Llauce Davila y D. Perez Gonzales, «Análisis comparativo del uso de ceniza de cascarilla de arroz y ceniza de bagazo de caña de azúcar en el mejoramiento de suelos arenosos, Chiclayo-2021», Tesis para optar el título profesional de ingeniero civil, Universidad Privada del Norte, Cajamarca, Perú, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://orcid.org/0000-0003-0849-3607>
- [13] W. A. Mory Espinoza, «Efecto de la incorporación de las cenizas de cáscara de arroz en subrasantes arenosas», Tesis para obtener el título de Ingeniero Civil, Universidad de Piura, Piura, Perú, 2020. Accedido: 18 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/G90pIj>
- [14] E. Juárez Badillo y A. Rico Rodriguez, *Mecánica de suelos Tomo I*, 2da Edición. México: Limusa, 2005.
- [15] C. Crespo Villalaz, *Mecánica de Suelos y Cimentaciones*, 5ta Edición. México: Limusa, 2004.
- [16] B. M. Das, *Fundamentals of geotechnical engineering*, 4th ed. Stamford, CT: Cengage Learning, 2013.
- [17] S. Dai y R. B. Finkelman, «Coal as a promising source of critical elements: Progress and future prospects», *International Journal of Coal Geology*, vol. 186, pp. 155-164, feb. 2018, doi: 10.1016/j.coal.2017.06.005.
- [18] J. Alam *et al.*, «Recent Advances in Methods for the Recovery of Carbon Nanominerals and Polyaromatic Hydrocarbons from Coal Fly Ash and Their Emerging Applications», *Crystals*, vol. 11, n.º 2, Art. n.º 2, feb. 2021, doi: 10.3390/cryst11020088.
- [19] L. Yang, Z. Zhu, D. Li, X. Yan, y H. Zhang, «Effects of particle size on the flotation behavior of coal fly ash», *Waste Management*, vol. 85, pp. 490-497, feb. 2019, doi: 10.1016/j.wasman.2019.01.017.
- [20] N. F. Basirun, M. H. W. Ibrahim, N. Jamaludin, y R. P. Jaya, «A Review: The Effect of Grinded Coal Bottom Ash on Concrete», *MATEC Web Conf.*, vol. 103, p. 01007, 2017, doi: 10.1051/mateconf/201710301007.
- [21] *Manual Ensayo de Materiales MTC*. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/dmo5t>
- [22] INDECI, «Estudios de Ciudades Sostenibles: Mapa de peligros de la región Lambayeque.» [En línea]. Disponible en: http://bvpad.indeci.gob.pe/html/es/estudios_cs/lambayeque.htm
- [23] *Suelos y cimentaciones E.050*. [En línea]. Disponible en: <https://acortar.link/Q51kqv>
- [24] P. A. Rogerson, «Spatial Sampling», en *Encyclopedia of Social Measurement*, K. Kempf-Leonard, Ed., New York: Elsevier, 2005, pp. 633-638. doi: 10.1016/B0-12-369398-5/00346-7.
- [25] J. F. Chingay Nicolas y W. E. Quesquen Isique, «Análisis del proceso de consolidación en suelos con presencia de carbonatos de calcio en la urbanización los sauces distrito de Pimentel», feb. 2024, Accedido: 22 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/13103>
- [26] M. F. Noaman, M. A. Khan, K. Ali, y A. Hassan, «A review on the effect of fly ash on the geotechnical properties and stability of soil», *Cleaner Materials*, vol. 6, p. 100151, dic. 2022, doi: 10.1016/j.clema.2022.100151.

Anexos

Anexo N°1 Carta de validación de ensayos



UNIVERSIDAD CATOLICA SANTO TORIBIO DE MOGROVEJO
 ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL
 • LABORATORIO DE ENSAYO DE MATERIALES, SUELOS Y PAVIENTOS
 • CONCRETO Y ASFALTO

INFORME N° LEM USAT 019-2025-I

FECHA: 23 de Mayo 2025

VALIDACIÓN DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ESTUDIANTE: Piero Alessandro Cieza Ramirez

TITULO DE LA TESIS: Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de suelos arenosos aplicando ceniza de carbón en la región Lambayeque.

El que suscribe, responsable del laboratorio de Ingeniería Civil, verifica y da conformidad que los siguientes ensayos de laboratorio realizados por el indicado estudiante se han efectuado en las instalaciones de la USAT, asimismo valida los ensayos realizados fuera de nuestras instalaciones siempre que no se puedan realizar en esta universidad:

- Densidad de campo
- Análisis químico de la ceniza (Fluorescencia de rayos x)
- Contenido de humedad
- Análisis granulométrico del suelo
- Límites de Atterberg
- Gravedad específica
- Corte directo
- Ensayo Edométrico o de consolidación
- Ensayo de permeabilidad de carga constante

Se alcanza al interesado para los fines pertinentes.

Observación: Adjunto



Henry Rivadeneyra Oblitas
 Tec. Laboratorio USAT
 Henry Rivadeneyra Oblitas
 Responsable de Lab Ing. Civil Ambiental

Anexo N°2 Ensayo de Fluorescencia de rayos X



EL TRÉBOL
LABORATORIO QUÍMICO Y METALÚRGICO

**ENSAYOS QUÍMICOS - METALÚRGICOS Y
SERVICIOS GENERALES**

RUC 20611589004 RNP S2333404

**REPORTE DE MEDICION Y ANALISIS DE
MUESTRA POR FLUORESCENCIA DE RAYOS X**

SOLICITANTE	• PIERO ALESSANDRO CIEZA RAMÍREZ
PROYECTO	EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE SUELOS ARENOSOS APLICANDO CENIZA DE CARBÓN EN LA REGIÓN LAMBAYEQUE
MUESTRA	CENIZA DE CARBÓN MINERAL
FECHA	11 DE ABRIL DEL 2025

ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN QUÍMICA:

MUESTRA RECIBIDA EN LABORATORIO

1. CONSIDERACIONES EXPERIMENTALES

CONDICIONES DE LA MEDICION:
El análisis se realizó en un espectrómetro de fluorescencia total de rayos x marca
**BRUKER, MODELO S2-
PICOFOX.** Fuente de rayos x:
tubo de Mo, Tiempo de medida:
2000 segundos.

**ESTANDAR INTERNACIONAL PARA
CUANTIFICACION:** Elemento: Galio (Ga)
Concentración: g/l.

2. CARACTERISTICAS DE LA MUESTRA ANALIZADA

Se analizó 100.06 g de la muestra de CARBÓN MINERAL, la cual fue reducida previamente, para luego pasar al tratamiento respectivo para ser leída por el equipo.

3. METODO

- **BASADO EN LA NORMA** : ASTM C618
- **VOLUMETRIA** : USAQ-ME06



USAT
LABORATORIO QUÍMICO Y METALÚRGICO



USAT
LABORATORIO QUÍMICO Y METALÚRGICO



EL TRÉBOL
LABORATORIO QUÍMICO Y METALÚRGICO

www.laboratorioeltrebol.com

974320865 - 979704933

lab@eltrebol@gmail.com

Scanned with

4. RESULTADOS

COMPOSICION QUIMICA	RESULTADOS (%)	METODO UTILIZADO
DIOXIDO DE SILICIO (Si O ₂)	13.82	Espectrometría de fluorescencia de rayos X
CARBONO (C)	62.03	
TRIOXIDO DE ALUMINIO (Al ₂ O ₃)	2.18	
TRIOXIDO DE HIERRO (Fe ₂ O ₃)	0.29	
OXIDO DE POTASIO (K ₂ O)	2.97	
OXIDO DE MAGNESIO (Mg O)	0.46	
PENTOXIDO DE FOSFORO (P ₂ O ₅)	6.17	
OXIDO DE COBRE (Cu O)	0.03	
TRIOXIDO DE AZUFRE (SO ₃)	3.37	
OXIDO DE ZINC (Zn O)	0.06	
OXIDO DE MANGANESO (Mn O)	1.69	

5. TAMAÑO PROMEDIO DE PARTÍCULA: 89.42µm

*Método: Determinación de tamaño de partícula con microscopía

6. CONCLUSION

- Al realizar la comparación del espectro de la muestra analizada con las energías características de los elementos de la tabla periódica a partir del sodio, se encontraron principalmente Carbono (C) con un alto porcentaje. Y en menores porcentajes se encontró; Silíce (Si), Aluminio (Al), Hierro (Fe), Potasio (K), Magnesio (Mg), Fósforo (P), Cobre (Cu), Azufre (S), Zinc (Zn) y Manganese (Mn),

TRUJILLO, 22 DE ABRIL DEL 2025


ING. MIKE PINCO
ING. QUÍMICO - ANALISTA




ING. WILSON TRALÓZ LIRIA
GERENTE GENERAL
C.P. 38217





**ENSAYOS QUÍMICOS - METALÚRGICOS Y
SERVICIOS GENERALES**

RUC: 20611589094, RNP S2333404

**INFORME DE ANÁLISIS
LAB. QUIM. MET. "EL TRÉBOL"**

SOLICITANTES	: PIERO ALESSANDRO CIEZA RAMÍREZ
PROYECTO	: EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE SUELOS ARENOSOS APLICANDO CENIZA DE CARBÓN EN LA REGIÓN LAMBAYEQUE
MUESTRA	: CENIZA DE CARBÓN MINERAL
PRESENTACIÓN DE MUESTRA	: BOLSA SELLADA
CODIFICACIÓN DE MUESTRA	: PRECINTO - CMI10401
FECHA DE INGRESO	: 11 DE ABRIL DEL 2025
MUESTRA RECIBIDA EN LABORATORIO	

ANÁLISIS DE MUESTRA

PARÁMETRO	UNIDADES	RESULTADO
DENSIDAD	g/cm ³	1.26

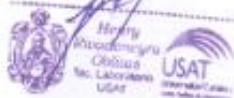
*Los ensayos se realizaron teniendo en cuenta la norma ASTM C618 y NTP 334.127

OBSERVACIONES: Este informe no debe reproducirse total ni parcial sin la autorización de Laboratorio Químico Metalúrgico EL TRÉBOL S.A.C. Los resultados de este certificado solo corresponden a la muestra recibida en nuestras instalaciones

TRUJILLO, 22 DE ABRIL DEL 2025

ING. MIKE PINEDO
ING. QUÍMICO - ANALISTA

ING. WILSON TIRADO LIBIA,
GERENTE GENERAL
CIP: 162371



www.laboratorioeltrebol.com
 974320865 - 979704933
 inh_rns_@trebol@gmail.com

Scanned with

Anexo N°3 Ensayo de Densidad de Campo

INFORME DE ENSAYO N° 1909

Expediente N° : 1789 - 2024 L.E.M. AMAZING S.A.C
 Solicitante : GEZA RAMIREZ PIERO ALESSANDRO
 Proyecto : "EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE SUELOS ARENOSOS APLICANDO CENIZA DE CARBÓN EN LA REGIÓN LAMBAYEQUE"
 Ubicación : PROV. CHICLAYO, REG. LAMBAYEQUE
 Fecha de emisión : Chiclayo, 31 de Agosto del 2024

ENSAYO : SUELOS, Método de ensayo estándar para la densidad y peso unitario del suelo In-Situ mediante el cono de arena.
 REFERENCIA : NORMA N.T.P. 339.143 ASTM D-1556

I.- Ubicación y/o Descripción de Prueba

Nº de Prueba / Nº Bazo	D-01	D-02	D-03		
Cono	3	3	3		
Placa	B	B	B		

II.- Datos de Campo y de Laboratorio

1.-Peso de frasco + arena calibrada	g.	7302	7224	7220	
2.-Peso de frasco + arena que queda	g.	4323	3164	2603	
3.-Peso de la arena en el cono	g.	1613	1613	1613	
4.-Densidad de la arena	g/cm ³	1.35	1.35	1.35	
5.-Volumen del material extraído	cm ³	1012	1813	2225	
6.-Peso del material + recipiente	g.	2093	3193	3902	
7.-Peso del recipiente	g.	9.0	9.0	9.0	
8.-Peso del material retenido 3/4"	g.	0	0	0	
9.-Peso específico de la grava	g/cm ³	2.41	2.41	2.41	
10.-Volumen de la grava	cm ³	0	0	0	
11.-Peso de finos	g.	2084	3184	3893	
12.-Volumen de finos	cm ³	1012	1813	2225	
13.-Densidad natural húmeda	g/cm ³	2.060	1.757	1.750	


III.- Contenido de Humedad

14.-Humedad (Speedy)	(%)	6.5	7.2	5.8	
15.-Densidad natural seca	g/cm ³	1.934	1.639	1.654	

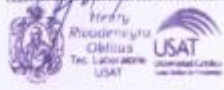
D - 01 C-1-FERREÑAFE - LAMBAYEQUE
 D - 02 C-2-LAS DELICIAS - REQUE
 D - 03 C-3-LAMBAYEQUE - LAMBAYEQUE

OBSERVACIONES:


- Ensayo realizado : Chiclayo, 30 de Agosto del 2024
- Identificación y Ubicación de pruebas designadas por el solicitante.
- El presente documento no deberá reproducirse sin la autorización escrita del Laboratorio.




Gerardo Oscar Galdino Córdova
INGENIERO CIVIL



USAT
UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CHILE



Juan Carlos Pizarro Guedes
INGENIERO CIVIL
Reg. C.R. 120391



USAT
UNIVERSIDAD SANTIAGO DE CHILE


Oficina y Laboratorio: Francisco Cabrera N° 1201 Chiclayo - Lambayeque, T: (074) 516906 D.C: 964 423 859
 Oficina Chiclayo: Alfonso Ugarte N° 496 Int. 201 - Chiclayo D.C. 924 387 254 - 963 547 718

RECIBO N° 48 S/100.00
FECHA: 30/08/24

RECIBI DE: CIEZA RAMIREZ PIERO ALESSANDRO
LA CANTIDAD DE: CIEN SOLES SOLES
POR CONCEPTO DE: ENSAYO DE COMPACTACION DE CAMPO

TOTAL: 100.00 ACTA: _____ SALDO: _____

CHEQUE N° _____
BANCO _____
EFECTIVO _____

 FURSA Y SELLO


Henry
Rodríguez
Cottas
TIC LABORATORIO
USAT




USAT
INSTITUTO NACIONAL DE INGENIERIA CIVIL
RECIBO DE LABORATORIO

Anexo N°3 Panel fotográfico



Fotografía 1

*Zona de extracción de muestras y ensayo de densidad de campo
(Lambayeque)*



Fotografía 2

Ensayo de densidad de campo luego de haber realizado la calicata a 1.50 m



Fotografía 3

Determinación del contenido de humedad de las muestras



Fotografía 4

Tamizado para obtener la curva granulométrica de las muestras



Fotografía 5

Lugar de proveniencia de las cenizas de carbón mineral - Ladrillera artesanal en las afueras de Ferreñafe



Fotografía 6

Carbón Mineral con ceniza en proporción 1:3 utilizada para dar poder calorífico a los hornos artesanales



Fotografía 7

Tamizado de la ceniza de carbón mineral por la malla N° 40



Fotografía 8

Preparación de muestras para realizar Límites de Atterberg



Fotografía 9

Adición en % de ceniza para el ensayo de límites de consistencia



Fotografía 10

Elaboración de Límite plástico para un 15 % de ceniza (El suelo presenta poca cohesión)



Fotografía 11

Realización del ensayo de gravedad específica



Fotografía 12

Pesado de la muestra luego de sacarla de la bomba de vacío



Fotografía 13

Eliminación de aire atrapado con bomba de vacíos



Fotografía 14

Muestras natural, con 5% y 15% de ceniza



Fotografía 15

Remoldeo de la muestra para ensayo de consolidación



Fotografía 16

Celda de carga donde va el anillo con la muestra para consolidar.



Fotografía 17

Equipo de consolidación antes de colocar las muestras ensayadas



Fotografía 18

Montaje de muestras en el equipo de consolidación



Fotografía 19

Muestras de suelo con 1kg de carga aplicada



Fotografía 20

Deformímetro utilizado durante los ensayos de consolidación



Fotografía 21
Realización del ensayo de consolidación



Fotografía 22
Muestras secas luego del ensayo de consolidación para la determinación de su humedad



Fotografía 23
Máquina de corte directo



Fotografía 24
Remoldeo de la muestra en los moldes para corte directo



Fotografía 25

Colocación de la muestra en la caja de corte



Fotografía 26

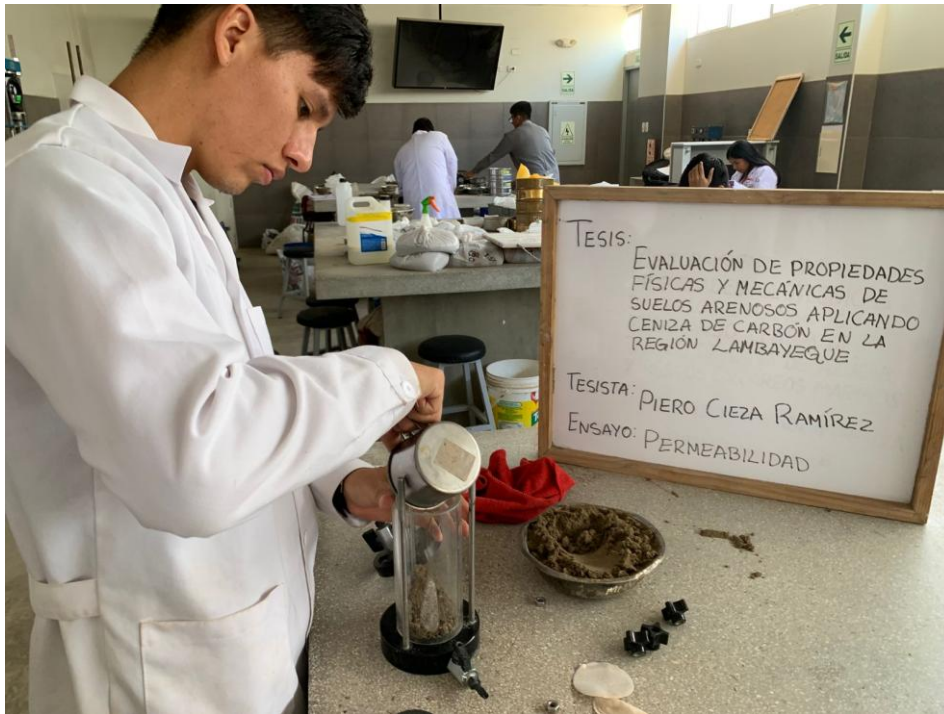
Ensayo de corte directo en las muestras



Fotografía 27
Permeámetro de carga constante



Fotografía 28
Preparación del equipo antes del ensayo



Fotografía 29

Compactación leve de la muestra en el permeámetro de carga constante



Fotografía 30

Pesado de la muestra más el permeámetro



Fotografía 31

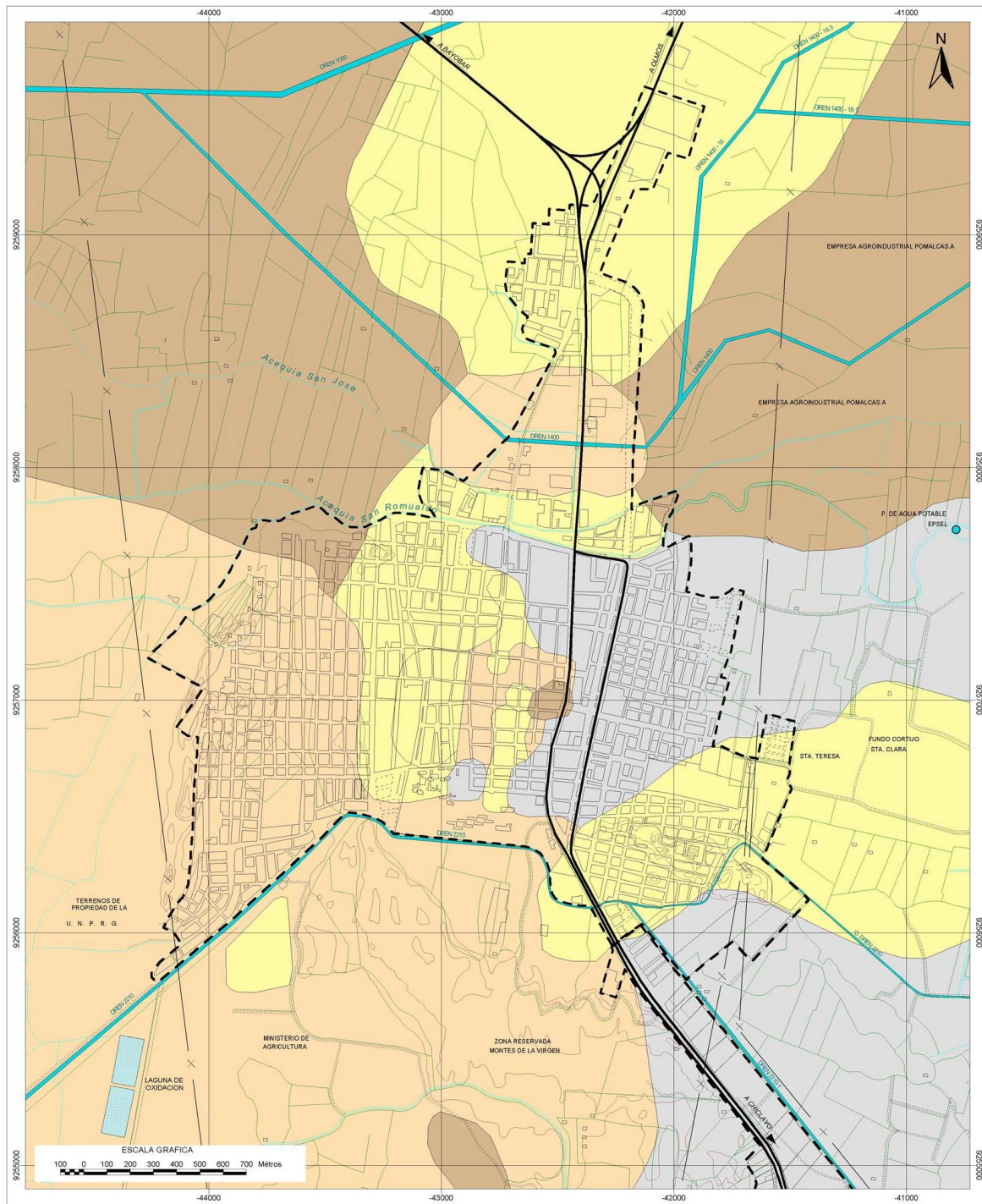
Colocación de mangueras para el paso de agua en el equipo



Fotografía 32

Medición del volumen de agua pasante


Anexo N° 4 Mapas de vulnerabilidad de INDECI



CLASIFICACION	DESCRIPCION	
CH, MH	ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD O LIMO DE ALTA PLASTICIDAD. SUELO FINO	0.80 a 0.90 Kg/Cm2
CL, ML	ARCILLA DE BAJA PLASTICIDAD O LIMO DE BAJA PLASTICIDAD. SUELO FINO	0.70 a 0.80 Kg/Cm2
SC, SM	ARENA ARCILLOSA O ARENA LIMOSA, ARENA CON FINOS	0.70 a 0.90 Kg/Cm2
SP	ARENA POBREMENTE GRADADA, SUELO GRANULAR	0.50 a 1.00 Kg/Cm2

FUENTE: MAPA DE PELIGROS: CIUDAD DE LAMBAYEQUE - INDECI
 ELABORACION: EQUIPO TECNICO - INDECI, 2004

INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA CIVIL
 PROYECTO : INDECI - PNUD
 PER 02 / 051 CIUDADES SOSTENIBLES
 CIUDAD DE LAMBAYEQUE



ESTUDIO: **PLAN DE USOS DEL SUELO Y MEDIDAS DE MITIGACION ANTE DESASTRES**

MAPA GEOTECNICO

LAMINA:

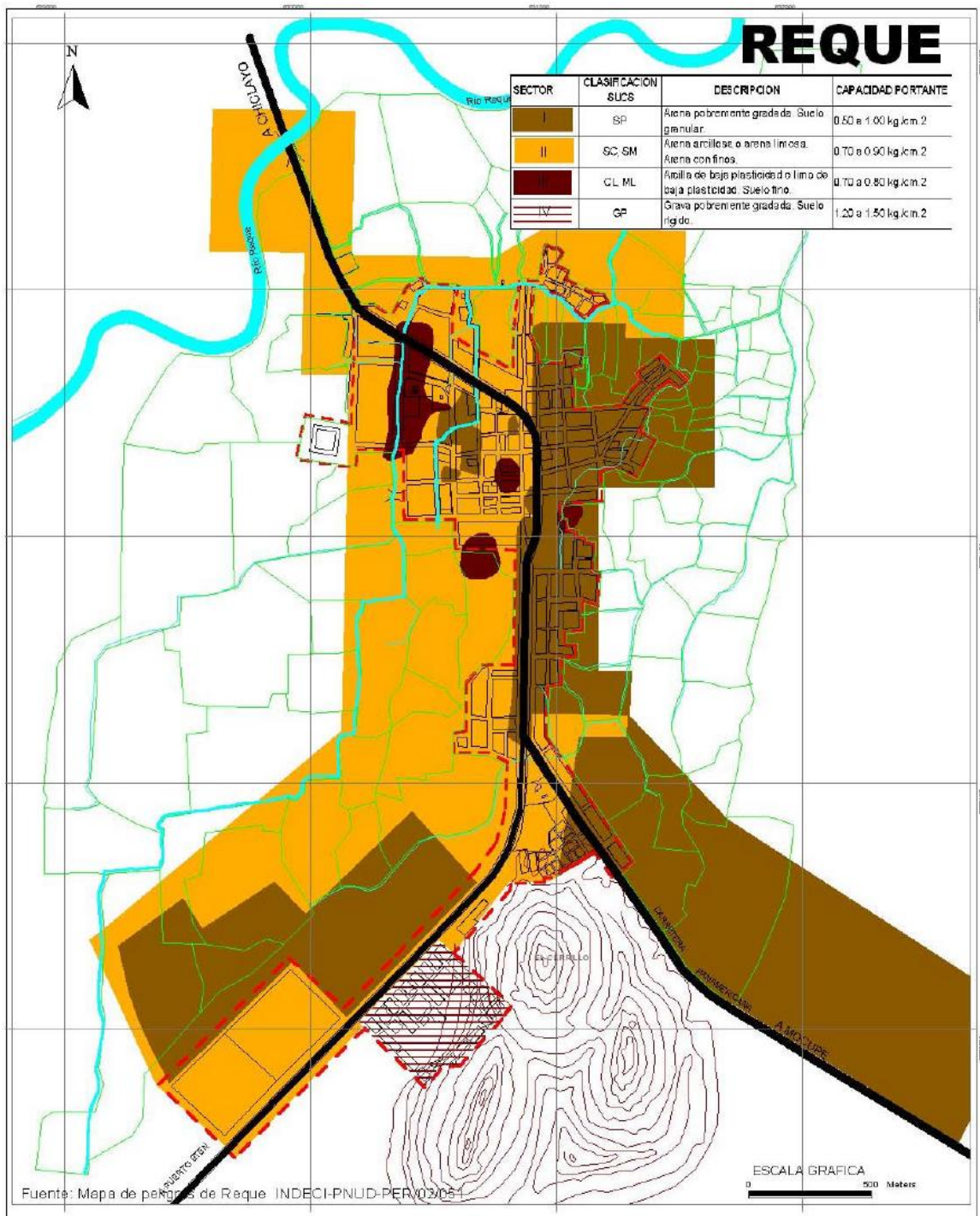
16

ESCALA: 1 : 15 000

ZONA 18
 DATUM HORIZONTAL WGS 84

FECHA: MAYO 2004

Fig. 29 Mapa de vulnerabilidad Ciudad de Lambayeque



INSTITUTO NACIONAL DE DEFENSA CIVIL
DIRECCION NACIONAL DE PROYECTOS ESPECIALES

PROYECTO INDECI - PNUD - PER/02/051
CIUDADES SOSTENIBLES

ESTUDIO: **PLAN DE PREVENCIÓN ANTE DESASTRES : USOS DEL SUELO Y MEDIDAS DE MITIGACIÓN CIUDAD DE REQUENA**

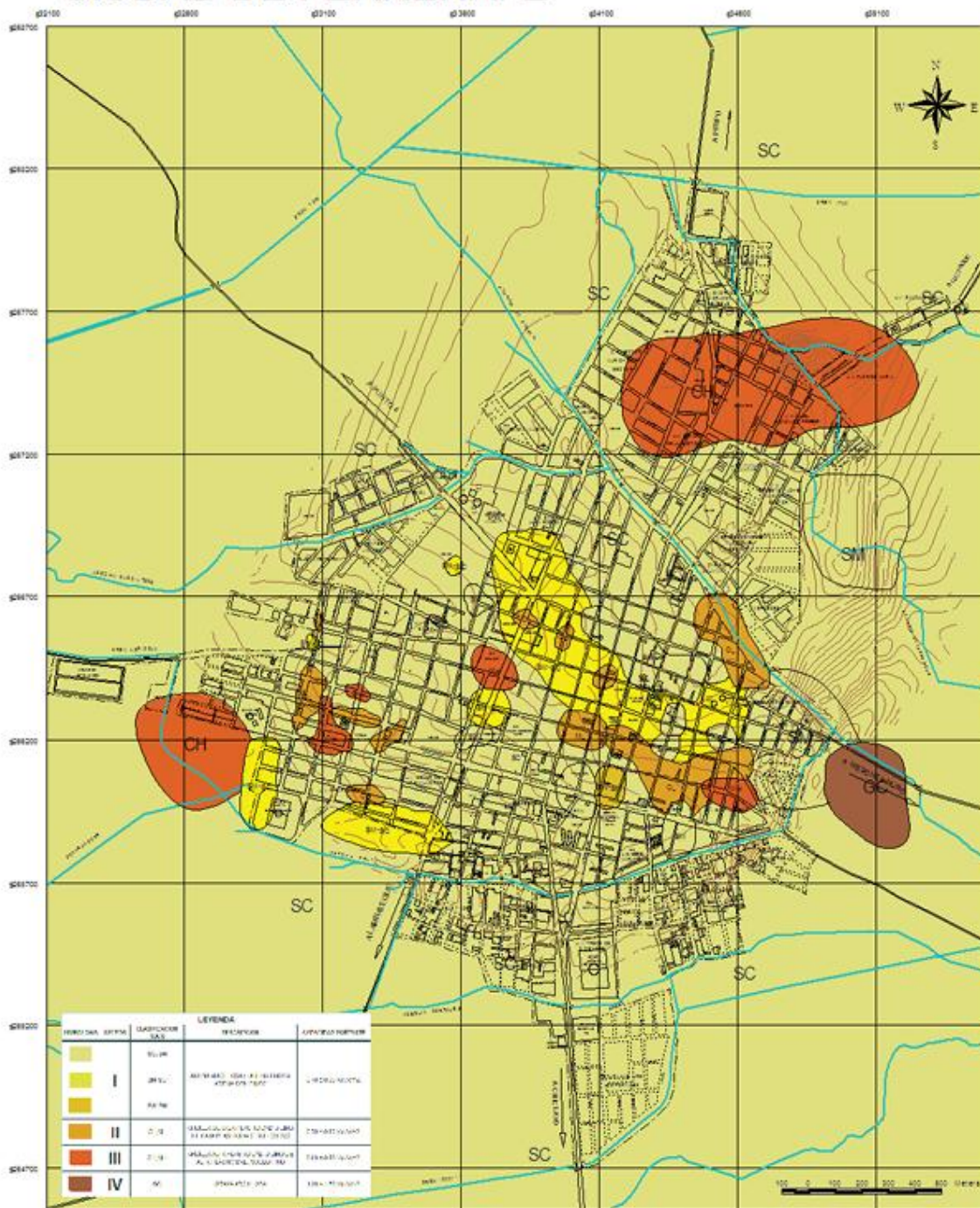
PARTE: **GEOTECNICO**

FECHA: 08/01/2005 ESCALA: GRUPELA

LAMINA: **10**

Fig. 30 Mapa de vulnerabilidad de la ciudad de Requena

CIUDAD DE FERREÑAFE



FUENTE : ESTUDIO MAPA DE PELIGROS DE LA CIUDAD DE FERREÑAFE "INDECI-PNUD PER/02/051"



PROYECTO		INDECI - PNUD - PER / 02 / 051	
		CIUDADES SOSTENIBLES	
TÍTULO		PLAN DE USOS DEL SUELO Y PROPUESTA DE MEDIDAS DE MITIGACION ANTE DESASTRES DE LA CIUDAD DE FERREÑAFE	
DESCRIPCION		MICROZONIFICACION GEOTECNICA	
FECHA		MAYO 2001	
ESCALA		1 : 12.500	
LAPINA DE		19	

Fig. 31 Mapa de vulnerabilidad de la ciudad de Ferreñafe

**Anexo N° 5 Formatos de ensayos
realizados en el Laboratorio de
suelos USAT**