

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**EVALUACIÓN DE ENSAYOS DE COMPACTACIÓN E ÍNDICE CBR
DE SUELOS MEJORADOS CON CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ
ACTIVADA ALCALINAMENTE CON CAL**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Luis Enrique Caceres Crispin

ASESOR:

Juan Pablo Zamora Beyk

Lima, octubre 2024

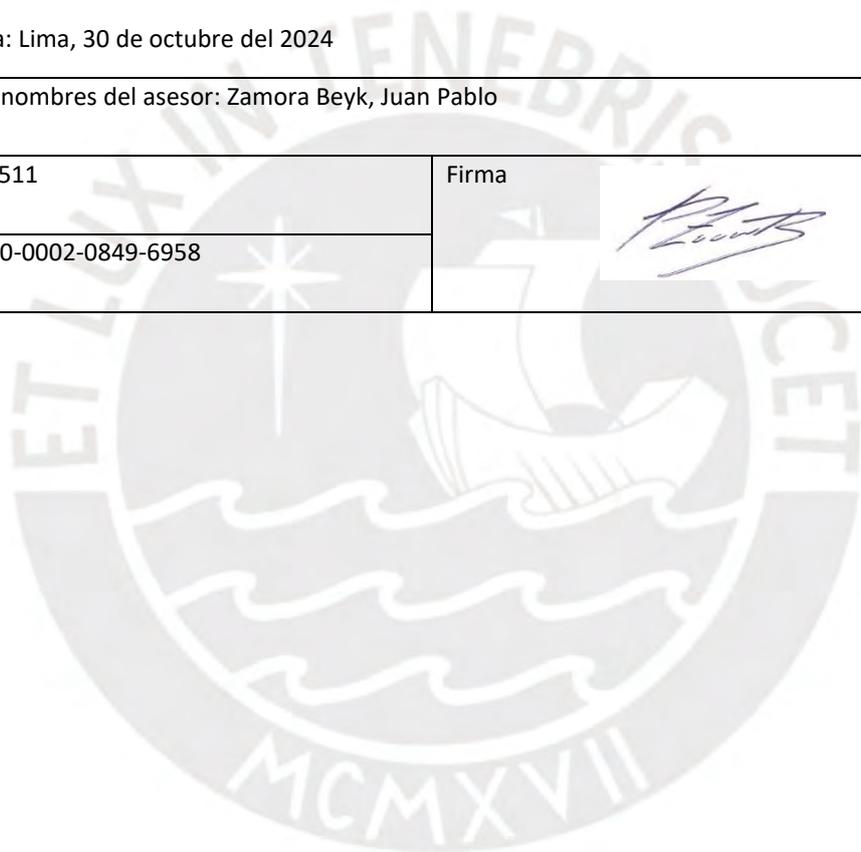
Informe de Similitud

Yo, Juan Pablo Zamora Beyk, docente de la Facultad de Ciencias e Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada EVALUACIÓN DE ENSAYOS DE COMPACTACIÓN E ÍNDICE CBR DE SUELOS MEJORADOS CON CENIZA DE CÁSCARA DE ARROZ ACTIVADA ALCALINAMENTE CON CAL, del autor Luis Enrique Caceres Crispin, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 8%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 30/10/2024.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 30 de octubre del 2024

Apellidos y nombres del asesor: Zamora Beyk, Juan Pablo	
DNI: 42867511	Firma 
ORCID: 0000-0002-0849-6958	



Resumen

La presente investigación tiene como objetivo el uso en conjunto de residuos orgánicos de arroz y cal para la estabilización de suelos de subrasante de baja resistencia para proyectos de pavimentación.

Para el caso elegido se opta por realizar la estabilización química a muestras de suelos obtenidas de una campaña de exploración geotécnica en la Provincia Constitucional del Callao. Para los ensayos de laboratorio se utiliza ceniza de cáscara de arroz, el cual es un residuo orgánico con alto contenido de sílice, activada alcalinamente con cal de obra. Las proporciones que se utilizaron son de 3% y 6% para la ceniza de cascara de arroz, y 1% y 3% para la cal (proporciones respecto al peso seco del suelo).

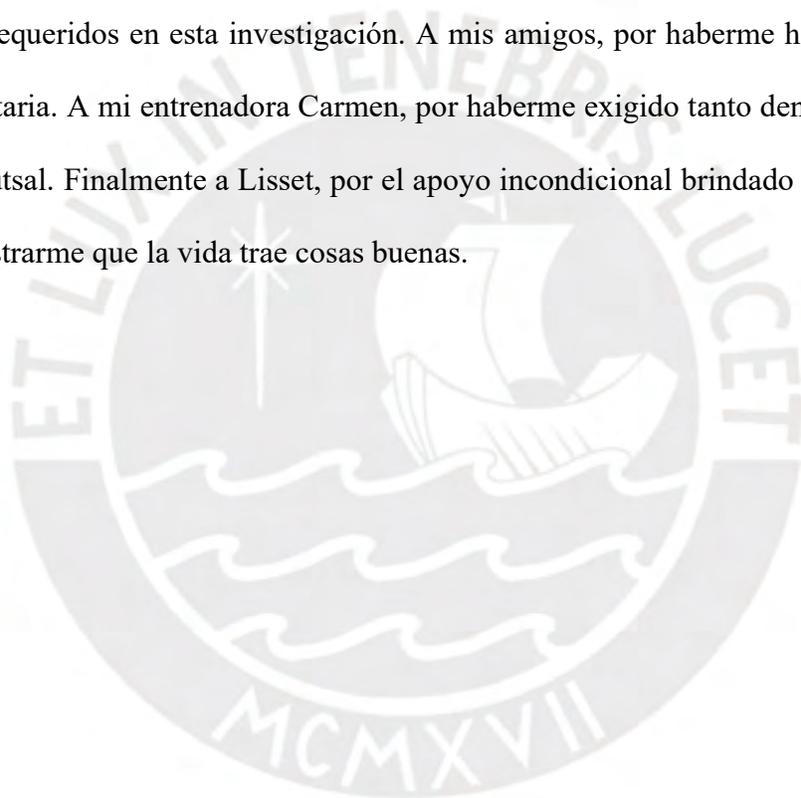
A las muestras naturales y estabilizadas, se realizaron ensayos de laboratorio con fines de clasificación, luego se determinaron la máxima densidad seca y humedad óptima, mediante ensayos de Proctor modificado. Posteriormente, se realizaron ensayos de índice de relación de soporte de California (CBR), con el fin de evaluar la resistencia de los suelos de subrasante para el diseño de pavimentos. Asimismo, se realizó el diseño de un pavimento flexible para analizar la influencia del mejoramiento propuesto en los espesores de sus capas.

Finalmente, a partir de los resultados de los ensayos de laboratorio y diseño de pavimentos, se observan incrementos del CBR de hasta seis veces respecto a la muestra natural, y por lo tanto, una optimización de espesores en la estructura del pavimento flexible.

Palabras clave: cal, cáscara de arroz, ceniza, mejoramiento de suelos, reacción, activación alcalina.

Dedicatoria

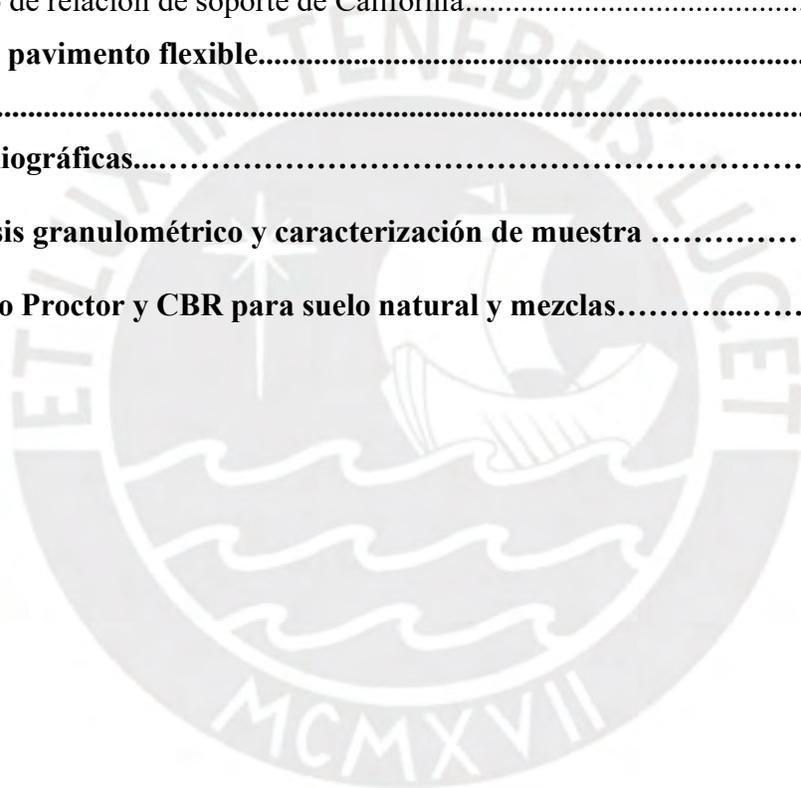
A mis padres, por siempre haberme apoyado y brindado ese empuje en los tiempos difíciles para poder convertirme en profesional. A mis hermanos, por sacarme sonrisas en cada momento que me veían preocupado por mis investigaciones y actividades laborales. A mi asesor, por haberme brindado su apoyo, conocimiento, tiempo y dedicación con mi investigación. A las instituciones, que me brindaron sus instalaciones para poder desarrollar los ensayos requeridos en esta investigación. A mis amigos, por haberme hecho disfrutar mi vida universitaria. A mi entrenadora Carmen, por haberme exigido tanto dentro y fuera de las canchas de futsal. Finalmente a Lisset, por el apoyo incondicional brindado durante todo este tiempo y mostrarme que la vida trae cosas buenas.



Índice

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Objetivos	4
1.3. Justificación	4
1.4. Limitaciones.....	5
2. Marco Teórico	6
2.1. Pavimentos.....	6
2.1.1. Pavimentos flexibles	6
2.1.2. Pavimentos rígidos.....	7
2.1.3. Pavimentos semirrígidos.....	8
2.2. Subrasante	10
2.3. Estabilización de suelos	12
2.3.1. Estabilización mecánica.....	12
2.3.2. Estabilización química.....	14
2.4. Estabilización de suelos con cal	15
2.4.1. Proceso de obtención de la cal y sus propiedades.....	17
2.4.2. Activación alcalina.....	19
2.5. Ceniza de cáscara de arroz.....	20
2.6. Evaluación de la reactividad puzolánica de la ceniza de cáscara de arroz y cal.....	22
2.6.1. Medición de conductividad eléctrica y pH	23
2.6.2. Ensayo de Frattini	23
2.6.3. Análisis termogravimétrico.....	24
3. Metodología	26
3.1. Materiales para la investigación	26
3.2. Ensayos de laboratorio	30
3.2.1. Ensayo de contenido de humedad.....	31
3.2.2. Análisis granulométrico por tamizado	31
3.2.3. Límites de Atterberg	33
3.2.4. Clasificación SUCS	34
3.2.5. Clasificación AASHTO	34
3.2.6. Ensayo Proctor modificado.....	35

3.2.7. Ensayo CBR.....	36
3.3. Diseño experimental.....	38
3.4. Procedimiento experimental	39
4. Análisis de los resultados de los ensayos	41
4.1. Caracterización de muestra	41
4.1.1. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos.....	41
4.1.2. Análisis granulométrico por tamizado	41
4.2. Ensayos mecánicos de las mezclas	42
4.2.1. Compactación con Proctor modificado.....	43
4.2.2. Ensayo de relación de soporte de California.....	44
4.3. Diseño de pavimento flexible.....	47
5. Conclusiones	54
Referencias bibliográficas.....	56
Anexo A: Análisis granulométrico y caracterización de muestra	61
Anexo B: Ensayo Proctor y CBR para suelo natural y mezclas.....	64



Lista de Figuras

Figura 2.1. (a) Pavimentos flexible, (b) semirrígido y (c) rígido.....	6
Figura 2.2. Sección típica de pavimento flexible.....	7
Figura 2.3. Sección típica de pavimento rígido.	8
Figura 2.4. Sección típica de pavimento semirrígido adoquinado.....	10
Figura 2.5. Compactación de terreno con rodillo vibratorio (Yepes, 2012).	13
Figura 2.6. Método de precarga para terraplenes (Terratest, 2019).....	13
Figura 2.7. Estabilización de suelos con cal (Probisa, 2020).....	14
Figura 2.8. Diagrama de flujo del proceso de obtención de cal (Secretaría de economía de México, 2022).....	18
Figura 2.9. Procedimiento para realización de activación alcalina.....	20
Figura 2.10. Esquema del ensayo de conductividad eléctrica y pH (Hidalgo, 2018).	23
Figura 2.11. Ensayo de Frattini (Rojas et al., 2000).	24
Figura 2.12. Curva termogravimétrica de mezcla de cal y ceniza de cáscara de arroz a diferentes edades de curado (Hidalgo, 2018).	25
Figura 3.1. Extracción de muestra mediante calicatas en Callao.....	26
Figura 3.2. Ceniza de cáscara de arroz.	27
Figura 3.3. Pesaje de muestra de cal utilizada en los ensayos.....	28
Figura 3.4. Mezcla de suelo, ceniza de cáscara de arroz y cal.....	29
Figura 3.5. Proceso de combinación de suelo y aditivos.....	30
Figura 3.6. Mezcla homogeneizada e hidratada de suelo, ceniza y cal.	30
Figura 3.7. Muestra tamizada por la malla #4.	33
Figura 3.8. Muestra seca extraída para llevar a cabo los ensayos de límites de Atterberg.....	34
Figura 3.9. Personal técnico realizando compactación de muestra.	36
Figura 3.10. Estado de la muestra durante el ensayo Proctor modificado.....	36
Figura 3.11. Materiales utilizados para ensayos CBR.	37
Figura 3.12. Curado de especímenes CBR.	38
Figura 3.13. Penetración de especímenes CBR.	38
Figura 3.14. Diagrama de flujo para el desarrollo de investigación.	40
Figura 4.1. Curva granulométrica de muestra.....	42
Figura 4.2. Curvas de compactación de las muestras y mezclas del distrito Callao.....	43
Figura 4.3. CBR al 95% de acuerdo a los porcentajes de ceniza de cáscara de arroz.	45

Figura 4.4. Coeficientes para base a_2 (AASHTO, 1993). 51

Figura 4.5. Coeficientes para subbase a_3 (AASHTO, 1993). 51

Figura 4.6. Diseño de espesores subrasante natural y mejorada. 53



Lista de Tablas

Tabla 2.1. Categorías de subrasante según CBR (MTC, 2014).....	11
Tabla 2.2. Fórmulas para diseños de pavimento de acuerdo con el tipo (MTC, 2014).	11
Tabla 2.3. Composición química requerida (Instituto Nacional de Calidad, 2021).	16
Tabla 2.4. Composición química de ceniza de cáscara de arroz según estudios previos.	22
Tabla 3.1. Simbología de materiales iniciales.	29
Tabla 3.2. Proporciones y especímenes utilizados en los ensayos.	29
Tabla 3.3. Variables utilizadas para la investigación.....	39
Tabla 4.1. Límites de Atterberg de la muestra analizada.....	41
Tabla 4.2. Resultados del análisis granulométrico realizado a la muestra.....	41
Tabla 4.3. Resultados de clasificación SUCS y AASHTO de muestra natural.	42
Tabla 4.4. Resultados de ensayo Proctor modificado tipo A para la muestra natural y mezclas. 43	
Tabla 4.5. Resultados de ensayos CBR de las muestras naturales y mezclas con aditivos.	44
Tabla 4.6. Porcentajes de mejora obtenidos en investigaciones pasadas.....	46
Tabla 4.7. Variables consideradas para cálculo de ESAL.	48
Tabla 4.8. Condiciones para diseño de espesores de pavimento natural y mejorado.	49
Tabla 4.9. Números estructurales obtenidos.	49
Tabla 4.10. Coeficientes de drenaje, estructurales y espesores de capa.	52
Tabla 4.11. Valores de diseño de espesores de subbase.	52

1. Introducción

Existen en el mundo diversas investigaciones que buscan generar innovaciones y menor impacto ambiental en el tema de estabilización de suelos con fines de pavimentación. Es por ello que en los últimos años se han realizado investigaciones sobre subproductos o residuos industriales como alternativas de aditivos para ser utilizados en el proceso de estabilización de suelos.

En el presente trabajo de investigación se opta por utilizar ceniza de cáscara de arroz activado alcalinamente con cal de obra como agente estabilizante para suelos de baja resistencia, ya que algunos estudios previos demuestran que este residuo orgánico tiene una alta concentración de sílice.

En la investigación se ejecutaron diversos ensayos de laboratorio a muestras alteradas de suelos con contenido de cenizas de cáscara de arroz y otras a las que adicionalmente se les agregó cal para analizar la influencia de estas.

A partir de los resultados de los ensayos, se verifica la influencia de estos aditivos en las características físicas y mecánicas de la subrasante. Luego, se realizó un diseño de pavimento flexible con el fin de optimizar los espesores de las capas de la estructura del pavimento.

1.1. Antecedentes

Los suelos cumplen la función de subrasante en los proyectos de obras viales, sin embargo, muchas veces estos no cumplen con los requerimientos mínimos establecidos en la Norma CE.010 Pavimentos Urbanos (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2010) y el Manual de Carreteras: Sección Suelos y Pavimentos (Ministerio de Transporte y Comunicaciones [MTC], 2014). Uno de los requerimientos es que el suelo de subrasante tenga un valor de CBR mayor o igual a seis. En caso no se cumpla, se debe aplicar

un método de estabilización de suelos, entre los cuales se tienen la sustitución o mejoramientos con aditivos, como pueden ser cemento Portland, cal, escoria, productos asfálticos, entre otros.

En el año 2017, fue desarrollada la tesis de pregrado “Mejoramiento de suelo arcilloso con ceniza volante y cal para su uso como pavimento a nivel de afirmado en la carretera Desvío Huancané – Chupa – Puno” (Huancoillo, 2017). Para esta tesis se utilizaron las cenizas del carbón y cal como aditivos para realizar el comparativo entre los valores relacionados al suelo natural, que es una arena arcillosa con clasificación SUCS “SC” y clasificación AASHTO “A-6 (1)”, y las muestras mejoradas. Durante el desarrollo de los ensayos CBR se pudo observar mejoras de los valores de resistencia y una reducción de la expansión de los suelos utilizando proporciones de 10 al 20% de ceniza y con un 3% de cal. Los resultados de esta tesis de pregrado ayudaron a reducir los espesores de las capas que conformaban el pavimento inicial (Huancoillo, 2017).

De igual manera, en el mismo año se desarrolló una tesis de pregrado titulada “Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante”. La tesis se llevó a cabo con muestras de suelo arcilloso, con clasificación SUCS “CL” y clasificación AASHTO “A-6”, del departamento de San Martín. Para el desarrollo de la tesis se utilizó ceniza de cascarilla de arroz como agente estabilizante y se realizó la comparativa al incluir la cal en la mezcla, ya que incrementa las mejoras de las propiedades. Los resultados finales muestran mejoras tanto utilizando solo ceniza de cáscara de arroz y utilizando la mezcla de ceniza con cal. La primera en mención brindó una mejoría de 5% hasta 19% del valor de CBR natural; mientras que al utilizar la mezcla de ceniza con cal se obtuvo una mejoría del 5% hasta el 39%. Además, se llevaron a cabo ensayos de compresión no confinada, en los cuales se obtuvo un incremento de hasta 20%, utilizando una dosificación

óptima de 20% de ceniza de cáscara de arroz y 80% de suelo. Sin embargo, se pudo observar que dosificaciones más altas de ceniza se reduce el porcentaje de mejora hasta un 10% (Castro, 2017).

Al siguiente año, 2018, se desarrolló la tesis de pregrado titulada “Influencia de la adición de ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente sobre la estabilización ecológica de la mezcla suelo – sedimento en la provincia de Virú” por parte de los ingenieros Alvarado y Guerra, de la Universidad Nacional de Trujillo. Los objetivos de esta tesis fueron determinar la mejor proporción añadida de ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente para tener un mejoramiento óptimo de las muestras, y con ello sugerir un espesor de la subrasante que cumpla con los requisitos mínimos establecidos en la Norma Peruana CE.010 de Pavimentos Urbanos. En los resultados obtenidos de los ensayos realizados a las muestras se pudo observar mejoras de más del 100% del valor de CBR correspondientes a las muestras de suelo natural, el cual se clasificó como una arena mal gradada con clasificación SUCS “SP” y clasificación AASHTO “A-3”, utilizando como activador alcalino el residuo calcáreo de las conchas de abanico (Alvarado & Guerra, 2018).

En países de Latinoamérica, se han desarrollado múltiples estudios en los que se tratan los residuos orgánicos como aditivos para su reaprovechamiento y uso en mejoramientos de suelos. Por ejemplo, se han realizado investigaciones en los países de Paraguay, Guatemala, Argentina y Perú. Sin embargo, en estas investigaciones no se menciona el correcto procesamiento de producción de la ceniza proveniente de la cáscara de arroz, la cual debería ser mediante combustión controlada a fin de obtener materia amorfa, lo cual favorecería la actividad puzolánica produciendo un incremento mayor de la resistencia.

1.2. Objetivos

Para esta investigación se tiene como objetivo principal evaluar las mejoras obtenidas en los ensayos de compactación e índice CBR como resultado de utilizar la ceniza proveniente de la cáscara de arroz activada alcalinamente con cal.

Asimismo, para complementar el objetivo principal descrito, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar físicamente y clasificar el tipo de suelo estudiado.
- Determinar y comparar los resultados de los ensayos de compactación e índices CBR, con distintas dosificaciones de ceniza de cascara de arroz y cal.
- Comparar los resultados obtenidos con los valores que se tuvieron en estudios previos realizados.
- Diseñar un pavimento flexible y analizar la influencia de la estabilización en los espesores de las capas.

1.3. Justificación

Debido a la presencia de suelos finos que se encuentran en diversos proyectos de pavimentación, se han generado daños a lo largo del tiempo de vida útil de las carreteras, estos a su vez, generan altos costos de reparaciones y mantenimientos tempranos que no están contemplados.

El Manual de Carreteras (2014) sugiere el uso de aditivos como el cemento Portland o cal para la estabilización de suelos con capacidades bajas, sin embargo, debido al impacto ambiental generado tanto en su producción como en su uso se ha optado por iniciar investigaciones de aditivos alternativos de características eco amigables.

Es por ello, que se desarrolló la presente investigación, con el fin de utilizar la ceniza de cáscara de arroz como una alternativa de impacto ambiental bajo, ya que se está reaprovechando un residuo de la producción de arroz. Se optó por este aditivo orgánico debido a la alta concentración de sílice que tiene dentro de su composición química, el cual es un componente de características cementicias. Sin embargo, este producto no contiene un alto contenido de óxido de calcio, el cual es requerido para que sus propiedades cementicias puedan activarse; por lo que además del aditivo orgánico se utiliza, en menor cantidad, la cal como activador alcalino.

1.4. Limitaciones

Una de las principales limitaciones del presente trabajo fue la obtención de la ceniza de cáscara de arroz. La composición química de la ceniza puede variar teniendo en cuenta el proceso de combustión utilizado. Para el caso de esta tesis se utilizó un tipo de combustión artesanal a bajas temperaturas, lo cual pudo afectar su composición química, específicamente el contenido de sílice.

Otra limitación, fue el uso de la cal como activador alcalino, ya que este producto es regulado en el país por la Superintendencia Nacional de Aduanas y de Administración Tributaria (SUNAT), por lo cual se utilizó una cal comercial de baja concentración y pureza.

2. Marco Teórico

2.1. Pavimentos

Los pavimentos son estructuras conformadas por capas construidas sobre la subrasante, estos tienen como propósito ofrecer una superficie de rodadura que facilite el tránsito vehicular para que este se desarrolle de manera cómoda y segura. Además, se clasifican según su capa superficial, entre los cuales se tienen opciones como pavimentos rígidos (concreto), flexibles (asfalto) y semirrígidos de adoquines de concreto (MTC, 2014). Este detalle se puede observar en la Figura 2.1.



Figura 2.1. (a) Pavimentos flexible, (b) semirrígido y (c) rígido.

La estructura del pavimento normalmente está conformada por las capas subbase, base y capa de rodadura. Estas capas tienen como funciones principales sostener, distribuir y transmitir las cargas generadas por el tránsito a la subrasante.

2.1.1. Pavimentos flexibles

Son estructuras compuestas por tres capas principales: una capa de rodadura de asfalto, una base granular y una subbase granular. En ellas, los esfuerzos y deformaciones causadas por las cargas de las ruedas se distribuyen de manera que las capas de revestimiento y base absorben los esfuerzos de compresión vertical. Además, los esfuerzos y deformaciones verticales repetitivas que se generan en todas las capas del pavimento ocasionan hundimientos

en la trilla de rueda, cuando el tráfico está concentrado, y ondulaciones longitudinales en la superficie si existe una notable heterogeneidad en el pavimento (Núñez, 2004).

El periodo de diseño promedio para este tipo de pavimentos es de 15 años, esto será ajustado según los requerimientos y condiciones específicas del proyecto. Además, es una de las opciones más económicas en la etapa inicial de su proceso constructivo. No obstante, la principal desventaja de los pavimentos flexibles es su requerimiento de mantenimiento constante para cumplir con los estándares de servicialidad. Esto puede deberse al desgaste continuo por fricción de la capa de asfalto o que no se realizaron los controles de calidad debidos durante su etapa constructiva. En la Figura 2.2 se muestra una sección típica de un pavimento flexible.

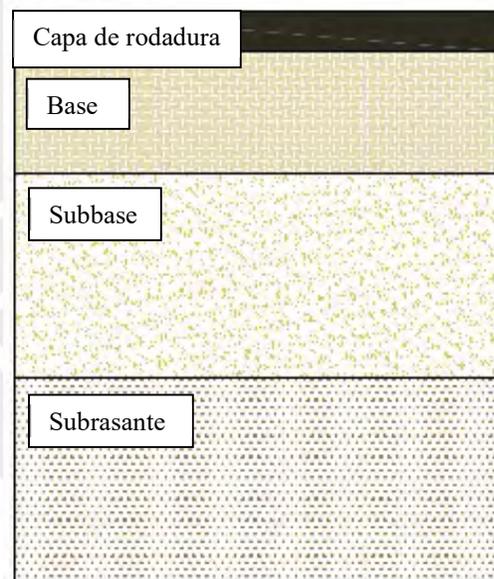


Figura 2.2. Sección típica de pavimento flexible.

2.1.2. Pavimentos rígidos

Estos elementos se caracterizan por tener una losa de concreto de cemento Portland como componente estructural principal, la cual reduce los esfuerzos generados en las demás capas que conforman el pavimento gracias a su alta resistencia a la flexión. Sin embargo, cuando se generan esfuerzos que superan repetitivamente la resistencia del material a lo largo del tiempo

se pueden generar fisuras por fatiga. Por otro lado, debido a la alta resistencia de la losa de concreto, la subbase puede estar compuesta por materiales con una capacidad de soporte menor que la requerida en la capa base de los pavimentos flexibles (Núñez, 2004).

A diferencia de los pavimentos flexibles, la realización de un pavimento rígido conlleva un mayor costo debido a los materiales y el proceso constructivo que se debe seguir para la construcción de la losa de concreto. Otro punto para considerar es el periodo de vida de diseño, ya que para pavimentos rígidos el rango oscila entre 20 y 40 años. Además, no requieren de un mantenimiento continuo para satisfacer los requisitos de transitabilidad; generalmente, se realiza el control de las juntas de las losas como parte del plan de su mantenimiento. En la Figura 2.3 se observa una sección típica de este tipo de pavimento.

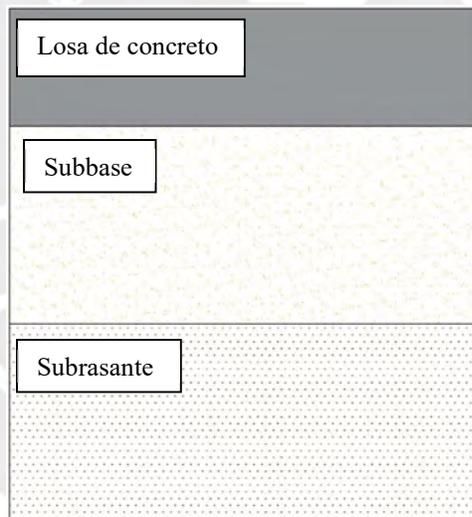


Figura 2.3. Sección típica de pavimento rígido.

2.1.3. Pavimentos semirrígidos

Un pavimento semirrígido combina características de los pavimentos flexibles y rígidos. Su estructura por capas incluye una carpeta de rodadura de asfalto flexible sobre una base de concreto o granular estabilizada con cemento Portland. A diferencia de los pavimentos flexibles, la resistencia de la capa de rodadura no es un aspecto determinante, ya que la capa estabilizada proporciona una alta capacidad estructural. Esto permite el uso de materiales con

menor capacidad de soporte, siempre que estén disponibles cerca del lugar del proyecto (Núñez, 2004).

Este pavimento representa una opción de costo intermedio entre las alternativas de tipo flexibles y rígidas. Ofrece una alta capacidad estructural en la capa estabilizada, lo que permite reducir el espesor de la capa inferior a la carpeta de rodadura asfáltica. La capa de rodadura disminuye las fallas por fatiga y la construcción sigue procedimientos preestablecidos. Teniendo en cuenta una vida útil de entre 20 y 30 años para este tipo de pavimentos, se necesita un riguroso control de calidad en la inspección del acabado final de la capa asfáltica.

En Perú, es más usual los pavimentos semirrígidos especiales, también llamados adoquinados o intertrabados. Se emplean unidades de concreto prefabricadas sobre una capa de arena, con los espacios entre ellos rellenos también con arena para asegurar su trabazón, esto también facilita su colocación y reparación.

Para la instalación de los elementos prefabricados de concreto no se requiere personal especializado para esta partida, esto genera una disminución en el costo del proyecto, sin embargo, si se requiere un aumento de la productividad en la colocación, se deberá considerar la inclusión de maquinaria especial. Además, considerando el control de calidad de la fabricación se estima que los pavimentos semirrígidos cuentan con un periodo de vida en promedio de 20 años. Finalmente, un detalle a tener en cuenta al momento de considerar este tipo de pavimentos es el diseño riguroso del sistema de drenaje, ya que si no se realiza un diseño óptimo puede que se lleguen a tener filtraciones que ocasionen el lavado de la cama de arena o del material utilizado para el sellado y trabazón. En la Figura 2.4 se puede observar una sección típica de este tipo de pavimentos.

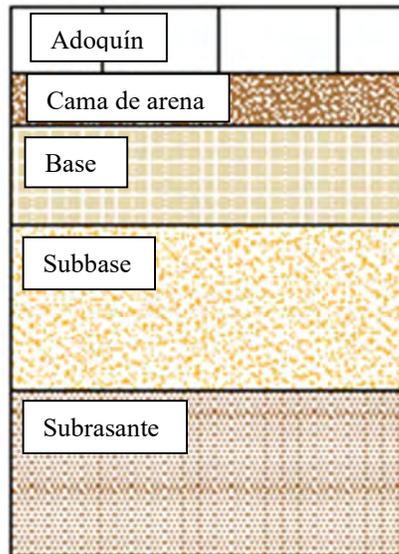


Figura 2.4. Sección típica de pavimento semirrígido adoquinado.

2.2. Subrasante

La subrasante es la superficie finalizada de la carretera tras la realización del movimiento de tierras requerido, sobre la cual se constituyen las capas de la estructura del pavimento. Asimismo, esta es la encargada de soportar las cargas transmitidas por las capas del pavimento.

Los suelos que conforman la subrasante son seleccionados teniendo en consideración ciertas características aceptables y la compactación de estos se da por capas con el fin de garantizar su estabilidad y su condición óptima frente a las cargas mencionadas.

Según el Manual de Carreteras, se indica que los suelos que se encuentren en los últimos 0.60 m por debajo del nivel superior de la subrasante deberán ser suelos estables, adecuados y contar con un CBR mayor o igual a seis, en caso esta última condición no se cumpla, el ingeniero responsable definirá, teniendo en cuenta la naturaleza del terreno, las alternativas para un mejoramiento como una estabilización mecánica, estabilización química, colocación de geosintéticos, entre otros; entre los cuales se elegirá la opción más conveniente económica y técnicamente (MTC, 2014).

En la Tabla 2.1 se puede observar la clasificación establecida para las subrasantes, teniendo en cuenta el índice de CBR del suelo utilizado, según el Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Tabla 2.1. Categorías de subrasante según CBR (MTC, 2014).

Categorías de subrasante	CBR
S0: Subrasante inadecuada	CBR < 3
S1: Subrasante insuficiente	De CBR ≥ 3 a CBR < 6
S2: Subrasante regular	De CBR ≥ 6 a CBR < 10
S3: Subrasante buena	De CBR ≥ 10 a CBR < 20
S4: Subrasante muy buena	De CBR ≥ 20 a CBR < 30
S5: Subrasante excelente	CBR ≥ 30

Además, el valor del CBR permite, mediante correlaciones, estimar el Módulo de Resiliencia (M_R), parámetro que indica la capacidad de un suelo para almacenar energía sin deformarse, este se utiliza para el diseño de pavimentos flexibles. Por otro lado, para el diseño de pavimentos rígidos se requiere realizar la conversión a módulo de reacción de la subrasante (k). En la Tabla 2.2 se pueden observar las correlaciones que se pueden utilizar para hallar el módulo requerido a partir del CBR. Estas correlaciones fueron extraídas del Manual de Carreteras Sección Suelos y Pavimentos (2014), capítulo 14 “Pavimentos Rígidos”.

Tabla 2.2. Correlaciones para obtención de módulos a partir del CBR (MTC, 2014).

Descripción	Correlación
Módulo de Resiliencia (M_R)	$M_R \text{ (psi)} = 2555 \times \text{CBR}^{0.64}$
Módulo de reacción (k)	$k \text{ (pci)} = 2.55 + 52.5 \log (\text{CBR}), \text{CBR} \leq 10$ $k \text{ (pci)} = 46 + 9.08 [\log (\text{CBR})]^{4.34}, \text{CBR} > 10$
Módulo de reacción compuesto (k_c)	$k_c \text{ (pci)} = [1 + (h/38)^2 \times (K_1/K_0)^{2/3}]^{0.5} \times K_0$ $K_1 \text{ (kg/cm}^3\text{): Coeficiente de reacción de la subbase granular}$ $K_c \text{ (kg/cm}^3\text{): Coeficiente de reacción combinado}$ $K_0 \text{ (kg/cm}^3\text{): Coeficiente de reacción de subrasante}$ h : Espesor de la subbase granular

El módulo de reacción de la subrasante compuesto es el valor resultante obtenido al incluir la presencia de una subbase o base granular, de una mejor calidad que la subrasante, lo cual permite obtener un módulo de reacción mayor para el diseño y se pueda reducir el espesor considerado para la capa de rodadura del pavimento rígido.

2.3. Estabilización de suelos

Se tienen dos tipos de estabilización del suelo, por compactación (mecánica) y mediante la adición de aditivos (química). La estabilización mecánica utiliza una mezcla de suelos de diferentes propiedades y compactación, en cambio, la estabilización química mezcla el suelo con aditivos lo cual busca mejorar las propiedades de estos.

2.3.1. Estabilización mecánica

Como su propio nombre lo indica, se utilizan procesos mecánicos para realizar el proceso de mejoramiento, este se logra al mezclar dos o más tipos de suelos con propiedades distintas y realizando un proceso de compactación. La humedad óptima requerida será la obtenida del ensayo Proctor de la muestra del suelo mezclado. Según la norma CE.020 Suelos y Taludes (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2012), el proceso de compactación debe generar el aumento de la resistencia al corte, disminuir la compresibilidad para reducir asentamientos, reducir la relación de vacíos y con ello disminuir la permeabilidad del suelo, así como también el potencial de contracción, expansión y exposición al congelamiento. El proceso de compactación se realiza con rodillos de compactación, existen distintos tipos según la necesidad del proyecto, pueden ser de pisón, vibratorio, pata de cabra, liso, tándem, neumáticos, entre otros. En la Figura 2.5 se puede observar el procedimiento realizado para la compactación de un suelo.



Figura 2.5. Compactación de terreno con rodillo vibratorio (Yepes, 2012).

Otro tipo de estabilización mecánica es el método de precarga, el cual consiste en aplicar una sobrecarga, igual o mayor a la que generará la estructura prevista en el proyecto, sobre el terreno para inducir asentamiento elástico por consolidación. Esto permite incrementar la resistencia del suelo y reducir los asentamientos posteriores. El método descrito está destinado principalmente a suelos cohesivos blandos, los cuales tienden a tener problemas de asientos importantes bajo sobrecargas pequeñas. Este método se puede observar en la Figura 2.6, donde se aplicó para el proyecto “Parque Comercial Bahía Real” ubicado en Maliaño, España.



Figura 2.6. Método de precarga para terraplenes (Terratest, 2019).

2.3.2. Estabilización química

Se logra al mezclar el suelo con cemento, cal, ceniza volante o algún aditivo que produzca alguna mejora de propiedades.

Este tipo de estabilización busca modificar la composición del suelo con la adición de productos que generan una reacción química entre sus componentes. Estos métodos se utilizan normalmente al no encontrar la solución a la condición actual del suelo con una estabilización mecánica mediante compactación o sustitución de suelos con materiales adecuados cercanos al proyecto. Esto comúnmente sucede en las zonas donde abundan materiales finos con capacidad de carga muy baja.

Por lo general, la estabilización con cemento y cal son las más comunes y en general con estos métodos se logra aumentar los tamaños de las partículas de suelo debido a la floculación, disminuir el contenido de finos, disminuir la plasticidad de los suelos, aumentar la capacidad de soporte, reducir la expansión, modificar la permeabilidad y mejorar la resistencia a los ciclos de hielo y deshielo.

En la Figura 2.7 se puede observar la etapa de colocación de cal para la estabilización de una subrasante de una carretera en una zona rural de Salamanca, España.



Figura 2.7. Estabilización de suelos con cal (Probisa, 2020).

2.4. Estabilización de suelos con cal

La cal puede ser utilizada en suelos para estabilizar, modificar o secar, según lo que se requiere para el proyecto. En cuanto al secado de un suelo húmedo con cal, esta absorbe el agua del terreno mediante una reacción exotérmica, reduciendo la humedad entre un 2% y 5% inmediatamente luego de aplicar la cal.

Las propiedades químicas de los suelos tienen un rol importante para la determinación de la reactividad que tienen con la cal y la resistencia que se alcanza. Los suelos arcillosos con un índice de plasticidad mayor a diez son buenos candidatos para este tipo de mejoramiento, ya que las partículas de la arcilla reaccionan con el contenido de calcio presente en la cal y forman silicatos y aluminatos, los cuales se clasifican como productos cementantes similares a los que se forman en el cemento Portland. En caso no se cuente con este tipo de suelos, se requeriría la inclusión de una ceniza volante que contenga sílice para formar los componentes cementantes y generar un incremento en la resistencia del suelo tratado (*National Lime Association*, 2004).

Al momento de utilizar la cal para mejoramiento, esta modifica en distintos aspectos al suelo tratado; uno de los cambios más comunes es que el suelo se hace friable y granular, en otras palabras, se obtiene un suelo más trabajable con facilidad para la compactación. Asimismo, como la cal es un agente absorbente de humedad esto genera que se reduzca drásticamente la plasticidad y potencial de hinchamiento de los finos.

A manera de ejemplo, en México se utiliza con mucha frecuencia la cal como aditivo y esto se debe a que presenta un bajo costo frente a otras alternativas que bien podrían ser usadas. La cal brinda un mejoramiento de las características tanto físicas como químicas, lo que

conlleva a una mayor durabilidad de los suelos. Mediante esta estabilización química se logra incrementar el índice CBR, y por ende el módulo resiliente (*National Lime Association*, 2004).

Con respecto al uso de cal para estabilización de suelos en Perú, se tiene la norma técnica peruana NTP 334.125:2021, en la cual se detalla la composición química requerida tanto para la cal viva y cal hidratada, y se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Composición química requerida (Instituto Nacional de Calidad, 2021).

Componente	Porcentaje (%)
Óxido de calcio y magnesio (mín)	90
Dióxido de carbono (máx)	5
Humedad libre (máx)	2

Por otro lado, en la norma CE.020 Suelos y Taludes (2012) se detalla el rango recomendado de adición de porcentaje de cal. Este rango va del 2% al 8% de cal por peso seco de suelo. El porcentaje óptimo de adición de cal se determinarán siguiendo los siguientes pasos.

- Estimar el porcentaje de cal en función del pH.
- Preparar muestras para la prueba de compresión no confinada a la humedad óptima y máxima densidad seca.
- Evaluar el aumento de la resistencia en el suelo tratado con cal.
- En caso el incremento de resistencia sea mayor a 3.5 kg/cm^2 con la dosificación elegida, se evaluará la variación de la resistencia para las muestras preparadas con un 2% adicional de cal.
- Identificar el contenido de cal agregado a partir del cual no se observen incrementos significativos.
- Elaborar un gráfico en el que se muestre la relación entre el incremento de resistencia de las muestras y el porcentaje de cal agregado.

Teniendo en cuenta los pasos mencionados, la norma CE.020 Suelos y Taludes (2012) también indica que los cálculos realizados y resultados tendrán que adjuntarse en un informe técnico en el que se muestren las mejoras obtenidas al utilizar la cal hidratada. Se tendrán que incluir los porcentajes de adición y el criterio utilizado para la determinación del porcentaje utilizado.

Ciertamente, la cal es un agente estabilizador muy bueno, sin embargo, en Perú se tiene una problemática sobre el desvío de distintos insumos químicos para la producción de drogas, en especial de la cocaína. El óxido de calcio es un componente utilizado junto a otros químicos para la producción de drogas mencionada, esto ha hecho que el Gobierno Peruano clasifique este químico como un insumo químico fiscalizado, esto quiere decir que se realiza un riguroso seguimiento al proceso de producción, transporte, almacenamiento y uso de este insumo, lo que limita su uso como agente estabilizador.

2.4.1. Proceso de obtención de la cal y sus propiedades

La cal es un material obtenido de la calcinación de rocas calizas, las cuales están compuestas principalmente de carbonato de calcio (CaCO_3). En este estado se denomina cal viva y si se hidrata se denomina cal apagada o hidróxido de calcio ($\text{Ca}[\text{OH}]_2$). Ambos tipos de cal tienen propiedades distintas debido a su composición química. Por ejemplo, la cal viva es altamente cáustica, generalmente se encuentra en forma de gránulos, tiene una densidad mayor a la cal apagada, es poco soluble y es reactiva con agua liberando calor en el proceso de hidratación. Por otro lado, la cal apagada es menos reactiva, es moderadamente soluble en agua, tiene un pH alto lo que permite neutralizar ácidos como el ácido sulfhídrico (H_2S). Ambos tipos de cal se utilizan en diversos rubros como la minería, agricultura, construcción, medio ambiental, entre otros (Calmosacorp, 2019).

En la Figura 2.8 se puede observar el procedimiento típico realizado para la obtención de la cal a partir de la materia prima, la piedra caliza.

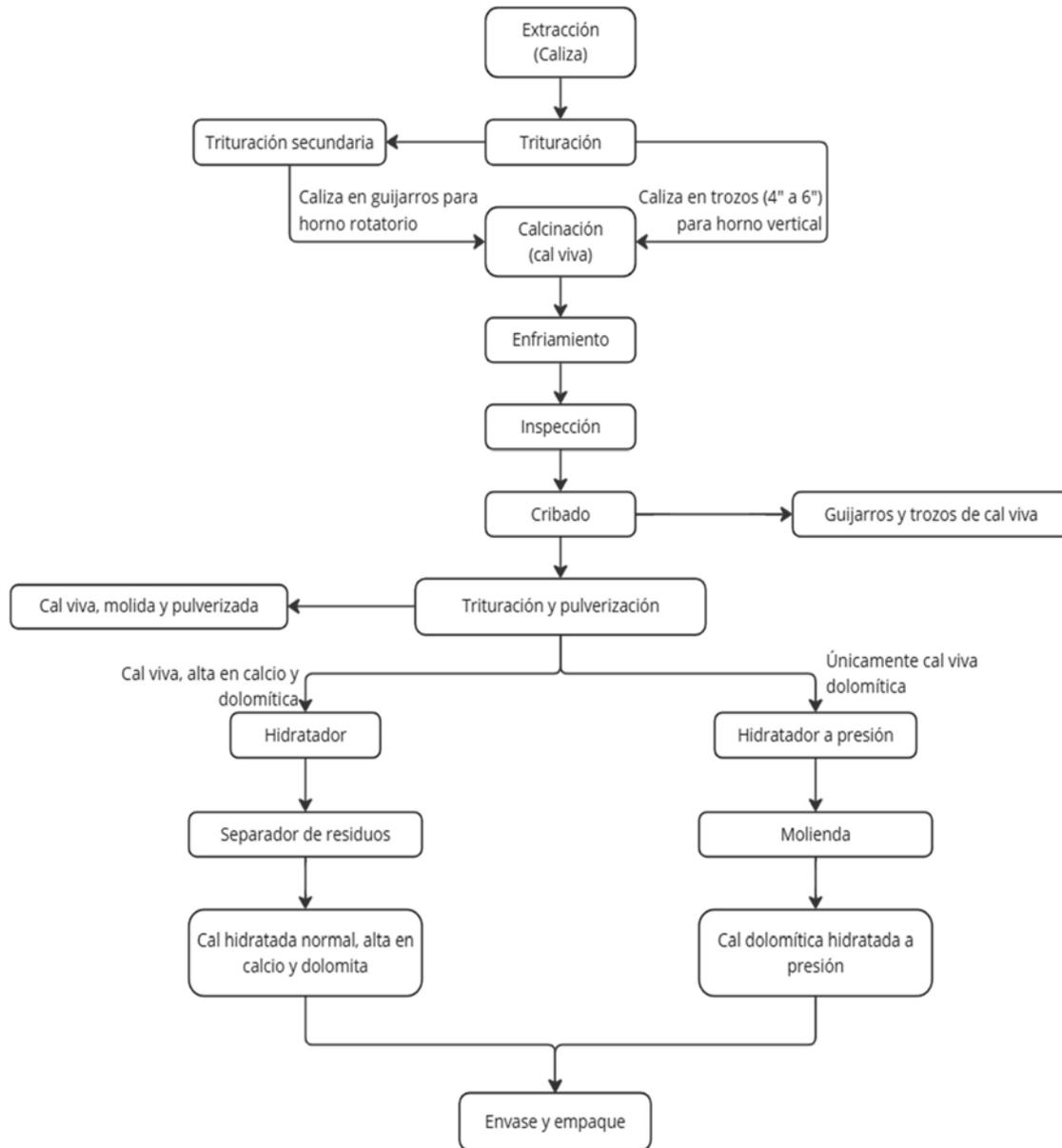


Figura 2.8. Diagrama de flujo del proceso de obtención de cal (Secretaría de economía de México, 2022).

2.4.2. Activación alcalina

La activación alcalina es una reacción química mediante la cual algunos materiales, residuos industriales, residuos orgánicos, subproductos como cenizas volantes, ceniza de cáscara de arroz, escorias de alto horno, ceniza de bagazo, entre otros, se transforman en materiales con propiedades cementantes. Esta reacción se produce al mezclar un material puzolánico y un activador alcalino, hidróxido de calcio, en un medio acuoso.

Los productos principales obtenidos de la reacción son magnesio y silicatos hidratados de calcio, mediante algunos ensayos se determinan las proporciones óptimas a utilizar, tanto el porcentaje de activador alcalino que se debe tener como la relación “agua/sólido”, los valores por debajo y por encima de este inducen a una reducción de resistencias mecánicas (Kovalchuk et al., 2008).

Además, teniendo en cuenta la reactividad puzolánica de algunos productos, como es el caso de las cenizas de cáscara de arroz debido a su alto contenido de sílice, estos compuestos son activados alcalinamente y pueden formar parte de la base para el desarrollo de una nueva generación de cementos con propiedades mecánicas destacables.

Asimismo, los mejores candidatos para aplicar un mejoramiento químico con el método de activación alcalina son los suelos de media a baja plasticidad y con poco contenido de arcilla, debido a que tiene componentes como la sílice que al reaccionar con un agente activador, que en este caso es la cal apagada, se generan componentes cementantes que aportan una alta resistencia al suelo, reducción de humedad y expansión (Alvarado & Guerra, 2018).

En la Figura 2.9 se muestra al procedimiento seguido para realizar una activación alcalina con hidróxido de calcio para obtener un “cemento alcalino”.

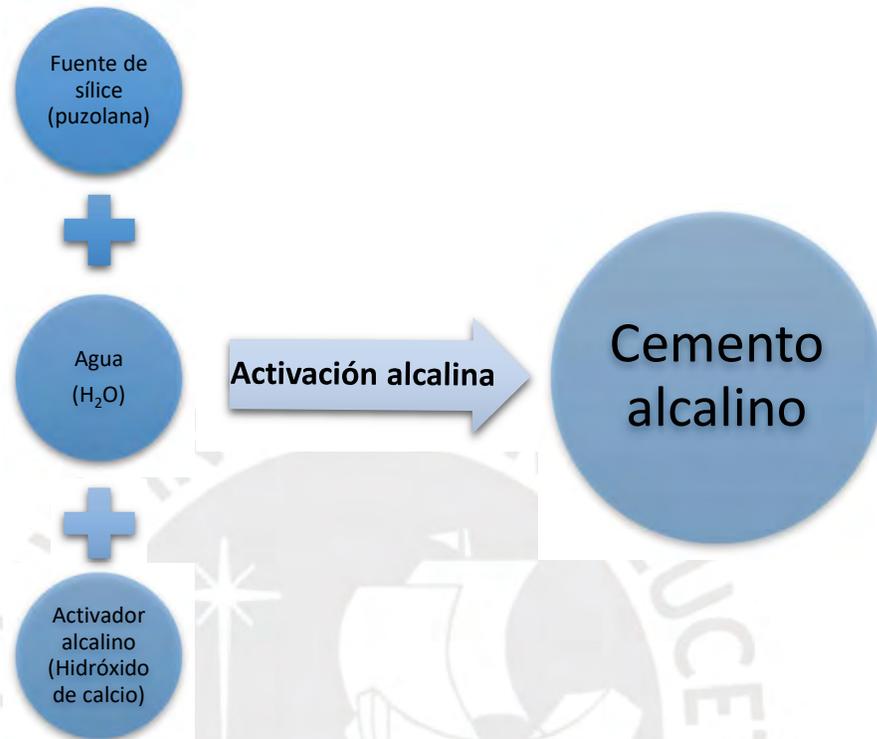


Figura 2.9. Procedimiento para realización de activación alcalina.

2.5. Ceniza de cáscara de arroz

Los residuos orgánicos son aquellos que provienen de especies de flora o fauna y que experimentan un proceso de descomposición a través de la actividad de microorganismos. Incluyen restos, sobras o productos desechados de cualquier organismo.

La cascarilla de arroz es un residuo orgánico proveniente de la agricultura, que al pasar por el proceso de combustión es utilizada comúnmente para la generación de energía, sin embargo, no se utiliza el total de la cascarilla para estas actividades, por lo que la parte no utilizada se considerara como un desecho (Hidalgo, 2018).

La ceniza es un subproducto que resulta de la incineración de la cascarilla de arroz, esto hace que se considere como un recurso orgánico, ya que, en lugar de desecharlo está siendo reutilizado para diferentes actividades. Se ha estimado que por cada tonelada de arroz se generan 200 kg de cáscara, la cual, tras ser incinerada, produce aproximadamente 40 kg de ceniza. Este derivado es un material silíceo que debe ser utilizado o dispuesto de forma adecuada para prevenir la contaminación. Para poder obtener una ceniza de alta calidad, esta tiene que ser producida bajo una combustión controlada, se indica esto; ya que la mayoría de las veces se producen en calderas sin medidores de temperatura, lo cual genera que la microestructura de la ceniza sea cristalina y no amorfa, todo lo contrario a lo requerido para favorecer la actividad puzolánica y obtener un mayor incremento de resistencia, el cual es el objetivo del presente trabajo (Giaccio et al., 2006).

El proceso de quemado de cáscara de arroz al ser realizado en hornos industriales reduce drásticamente la inclusión de impurezas en su composición y tiende a generarse un mayor porcentaje de ceniza amorfa, la cual tiene un contenido de sílice mayor a 90%, lo que indicaría una mejor calidad de puzolana y sea más reactiva. En la Tabla 2.4 se pueden observar valores obtenidos en estudios previos sobre la composición química de las cenizas de cáscara de arroz obtenidas de diferentes muestras producidas en hornos adecuados bajo temperaturas controladas.

Tabla 2.4. Composición química de ceniza de cáscara de arroz según estudios previos.

Componente	Estudios previos realizados		
	Salas et al. (1986)	Xinyu et al. (2015)	Jimenez & Eguez (2001)
SiO ₂ (%)	91.26	92.40	94.10
Al ₂ O ₃ (%)	0.94	0.30	0.12
Fe ₂ O ₃ (%)	0.37	0.40	-
CaO (%)	2.15	0.70	0.55
MgO (%)	0.88	0.30	0.95
Na ₂ O (%)	-	0.07	0.11
K ₂ O (%)	-	2.54	2.10
Otros componentes (%)	3.24	-	1.98
Pérdida por ignición (%)	0.17	2.31	-

Se recomienda realizar ensayos químicos para obtener la composición química del aditivo utilizado, dentro de estos ensayos se consideran el análisis de fluorescencia de rayos x, difracción de rayos x, análisis de pérdida por ignición, análisis térmico diferencial y termogravimetría; entre otros. Estos ensayos nos ayudan a tener un detalle más completo sobre la composición de la ceniza de cáscara de arroz.

2.6. Evaluación de la reactividad puzolánica de la ceniza de cáscara de arroz y cal

Según Hidalgo (2018), en su estudio sobre la evaluación de la reactividad puzolánica de la Ceniza de Cáscara de Arroz (CCA), se analizó esta propiedad aplicando tres métodos distintos para realizar la comparación de los resultados y extraer conclusiones sobre ello. Entre los métodos utilizados se tuvieron las medidas de conductividad eléctrica y variación del pH, ensayo de Frattini y el análisis termogravimétrico. Estos métodos tienen la misma finalidad, monitorear la reacción que se da entre la cal y la ceniza de cáscara de arroz; ya que los valores obtenidos de estos métodos indican el grado de comportamiento puzolánico que tiene la cáscara de arroz.

2.6.1. Medición de conductividad eléctrica y pH

La finalidad de realizar estos ensayos es monitorear, teniendo en cuenta las medidas de pH y conductividad eléctrica, las suspensiones acuosas cal/puzolana a distintas temperaturas y distintas dosificaciones de ensayo a lo largo de un tiempo determinado. Para el método propuesto se utilizan suspensiones con exceso de hidróxido de calcio, las cuales reaccionan con las puzolanas adheridas, para este caso se utilizó la Ceniza de Paja de Arroz (CPA), y luego de un tiempo determinado se observan reducciones en los valores de pH y conductividad eléctrica, esto debido a la insaturación que se produce por esta reacción. Asimismo, se tiene en cuenta el factor temperatura como un agente que podría influir en la actividad puzolánica, ya que las reacciones químicas generalmente se aceleran al incrementar la temperatura (Mitsuuchi, 2012). En la Figura 2.10 se puede observar el esquema detallado de las fases del proceso de reacción puzolánica.

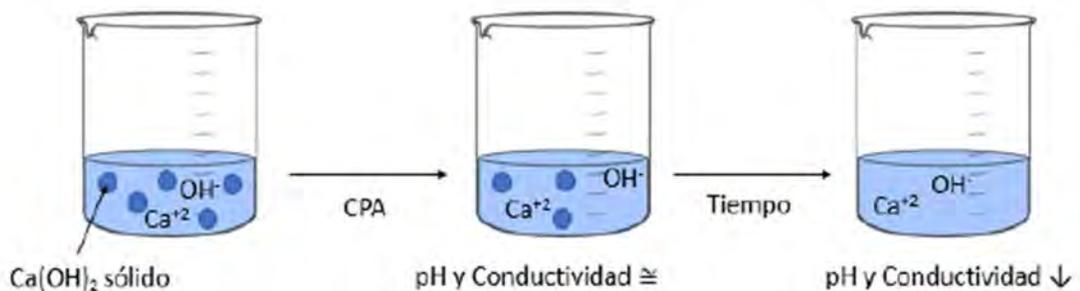


Figura 2.10. Esquema del ensayo de conductividad eléctrica y pH (Hidalgo, 2018).

2.6.2. Ensayo de Frattini

El ensayo de Frattini es un método que se utiliza para evaluar el comportamiento puzolánico de cementos elaborados a partir de puzolanas activadas con cal. Este método consiste en determinar la cantidad de cal consumida por la reacción puzolánica comparando la cantidad de hidróxido de calcio que contiene la disolución acuosa en contacto con la puzolana hidratada, durante un periodo de tiempo, con la cantidad de hidróxido de calcio requerido para

saturar una disolución de la misma alcalinidad que la anterior. Finalmente, se considera que el ensayo se cumple cuando los valores obtenidos se encuentran por debajo de la curva de saturación, es decir, la concentración del hidróxido de calcio es menor que la concentración de saturación (Hidalgo, 2018).

En la Figura 2.11 se muestran los resultados del ensayo de Frattini teniendo en cuenta unas dosificaciones utilizadas y su curva de saturación.

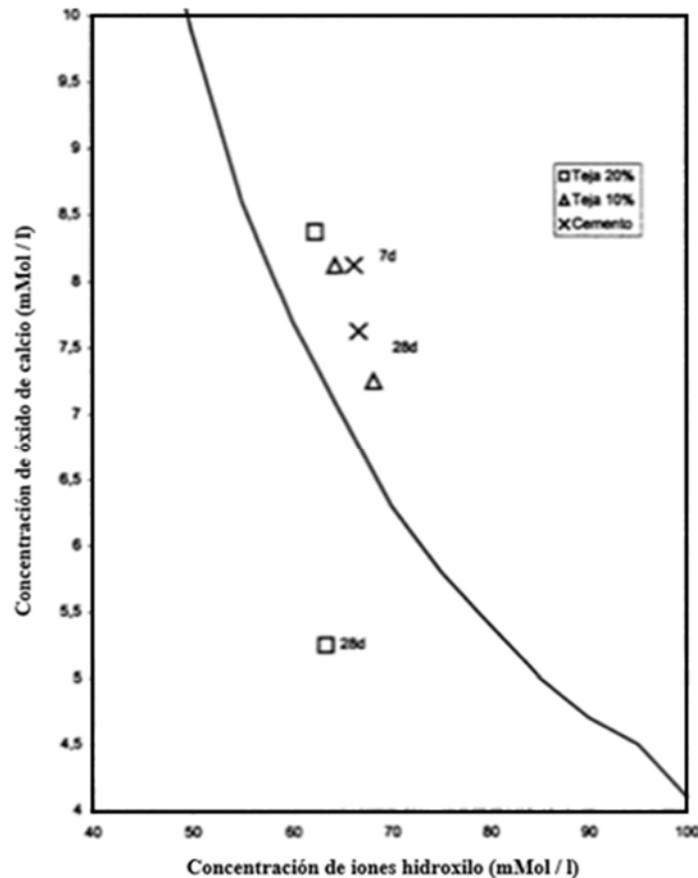


Figura 2.11. Ensayo de Frattini (Rojas et al., 2000).

2.6.3. Análisis termogravimétrico

El análisis termogravimétrico es un método cuantitativo de análisis termoquímico basado en la medición de la masa de una muestra que varía a lo largo del tiempo debido a los cambios de temperatura aplicados durante el ensayo. Este ensayo se puede representar gráficamente con la variación de la masa en función del tiempo o temperatura, lo que se denomina como curva

TG. La finalidad de realizar este ensayo radica en la obtención de una pérdida de masa debido a la deshidratación de los compuestos, y se traduce como un alto porcentaje de cal que ha reaccionado con el material puzolánico, en este caso la ceniza de cáscara de arroz y así contrastar su carácter como puzolana. En la Figura 2.12 se observa que el descenso del porcentaje de la masa de una pasta con mezcla de ceniza de cáscara de arroz y cal se da alrededor de una temperatura de 150°C a diferentes edades de curado de los especímenes, este descenso es producto de la reacción puzolánica que se genera por sus compuestos (Hidalgo, 2018).

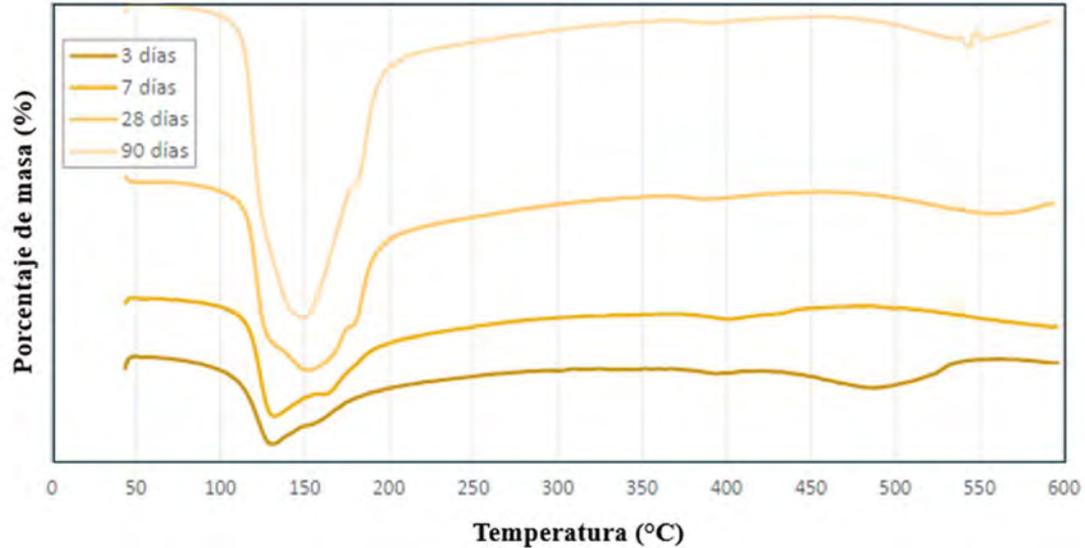


Figura 2.12. Curva termogravimétrica de mezcla de cal y ceniza de cáscara de arroz a diferentes edades de curado (Hidalgo, 2018).

3. Metodología

3.1. Materiales para la investigación

Para la presente investigación se utilizaron distintos materiales para llevar a cabo los ensayos requeridos por el proceso experimental. Estos materiales son los siguientes:

- Muestras de suelo natural.
- Cáscara de arroz.
- Hidróxido de cal o cal apagada.
- Agua destilada y potable.

En la Figura 3.1 se presenta el lugar de donde se extrajeron las muestras mediante calicatas, esta exploración fue parte del estudio de mecánica de suelos realizado para un proyecto de edificaciones para viviendas multifamiliares.



Figura 3.1. Extracción de muestra mediante calicatas en Callao.

No se consideraron los primeros 30 cm del terreno, ya que era un material de relleno. Por ello, las muestras fueron extraídas entre los 0.90 y 3.00 m de profundidad con el fin de tener un material limpio y más uniforme.

Debido a la abundancia del material fino en esta zona del distrito, en la mayoría de los proyectos viales, el suelo no cumple los requerimientos de resistencia para ser usado como subrasante, por lo que se tendría que optar por un mejoramiento de terreno.

Por otro lado, la cascarilla de arroz fue producida en el molino Guadalupe, ubicado en el departamento de la Libertad y fueron trasladadas hacia Lima en sacos de 10 kg. La cáscara de arroz fue incinerada en un horno artesanal y calderas con leña y sustancias químicas como aceite y ron de quemar; ya que no se contó con un horno especial para controlar la temperatura. Finalmente se obtuvo una materia fina, la cual fue tamizada por la malla #200 para librarse de partículas que no hayan sido incineradas totalmente o restos de la leña utilizada y de esta manera fue obtenida la ceniza de cáscara de arroz utilizada en la investigación. En la Figura 3.2 se observa la ceniza utilizada en los ensayos.



Figura 3.2. Ceniza de cáscara de arroz.

Para la obtención de la Ceniza de Cascara de Arroz (CCA) se utilizó un método artesanal de incineración, el cual no es recomendable por la utilización de leña y aceleradores como alcoholes o combustibles. Se recomienda que la incineración sea realizada en un horno

industrial, para así obtener una mezcla más pura, lo que podría incrementar la resistencia brindada por la ceniza y reducir la emisión de humo durante su producción.

Además, se recomienda realizar ensayos de análisis químico con el fin de determinar la pureza de la ceniza obtenida y el componente predominante en esta, así como su reactividad puzolánica mediante ensayos de conductividad eléctrica, determinación de pH, termogravimetría y ensayo de Frattini.

La cal apagada fue suministrada por la empresa MYCAL, la cual se ubica en el distrito de Huachipa, se brindó un saco de muestra de 25 kg para fines de investigación de mejoramiento de suelos. Para ser utilizada en los ensayos se colocó en el horno para el secado respectivo y la humedad de esta no afecte la mezcla suelo-aditivo.



Figura 3.3. Pesaje de muestra de cal utilizada en los ensayos.

Para etiquetar los especímenes ensayados, se utilizaron las siguientes simbologías detalladas en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Simbología de materiales iniciales.

Descripción	Simbología
Suelo Callao	SC
Ceniza de Cáscara de Arroz	CCA
Cal	C

Se realizaron los ensayos en base a tres proporciones del aditivo estabilizador, el cual comprende ceniza de cáscara de arroz y cal. Las proporciones fueron realizadas con respecto al peso seco del suelo natural y se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Proporciones y especímenes utilizados en los ensayos.

Muestra	Porcentaje de suelo (%)	Porcentaje de ceniza de cáscara de arroz (%)	Porcentaje de cal (%)	Simbología
M1	100	0	0	SC
M2	97	3	0	SC97 CCA3
M3	96	3	1	SC96 CCA3 C1
M4	91	6	3	SC91 CCA6 C3

En las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7 se muestra el proceso de mezcla de los materiales.



Figura 3.4. Mezcla de suelo, ceniza de cáscara de arroz y cal.



Figura 3.5. Proceso de combinación de suelo y aditivos.



Figura 3.6. Mezcla homogeneizada e hidratada de suelo, ceniza y cal.

3.2. Ensayos de laboratorio

Para la presente investigación se realizaron ensayos de contenido de humedad, análisis granulométrico por tamizado, límites de Atterberg, clasificación de suelos SUCS, Proctor modificado y CBR. Estos ensayos se describen brevemente a continuación.

3.2.1. Ensayo de contenido de humedad

Para este ensayo, el espécimen ensayado fue colocado en un horno y secado hasta alcanzar a un peso constante. Se considera que el peso perdido durante el secado corresponde al agua presente en el espécimen. La humedad se calculó utilizando el peso seco y el peso del agua.

De primera instancia se determinó la cápsula de secado, luego se seleccionó un espécimen de la muestra a ensayar. Se colocó la muestra húmeda en la cápsula y luego se determinó el peso de esta, luego se colocó la cápsula en el horno y se puso a secar durante 24h.

Luego de haber transcurrido el tiempo de secado, se retiró la cápsula y se dejó enfriar ligeramente, luego se pesó la muestra y se obtuvo el peso seco de la muestra.

Finalmente, teniendo en cuenta el peso seco y el peso húmedo, se determinó la diferencia entre ambos que es el peso del agua, con ello se determinó el contenido de humedad de la muestra.

3.2.2. Análisis granulométrico por tamizado

El análisis granulométrico de un suelo implica la separación y clasificación los granos que lo componen según su tamaño. Este ensayo proporciona una aproximación de algunas propiedades del suelo. El análisis granulométrico por tamizado se realiza al pasar el suelo a través de una serie de mallas que definen el tamaño de las partículas.

Se inicia tomando el peso inicial de la muestra, luego se emplea la malla N°4 para dividirla en 2 partes: la primera está compuesta por el material retenido en la malla y la segunda, por el material que pasa a través de ella.

Para la porción retenida, se pesa la porción total en una bandeja y luego se coloca agua, tal que cubra toda la porción, se deja remojando durante 30 minutos. Después de este periodo,

se lava el material que quedó retenido en la malla N°4 y se coloca en el horno durante 24 horas. Posteriormente, se retira del horno y se deja enfriar antes de manipularlo.

Luego de esto se pesa la muestra seca y se separa según el tamaño de sus partículas con ayuda de las mallas 3", 2", 1 ½", 1", ¾", 3/8" y # 4. Luego de tamizar la muestra, se determina el peso de cada parte retenida en cada malla y se procede a verificar que la sumatoria de las porciones no difiera del valor inicial tomado antes del tamizado.

Para la porción pasante de la malla N°4, cuartear la muestra y tomar aproximadamente 115 g y anotar el peso exacto. Seguidamente, se coloca la muestra en un recipiente y se agrega agua hasta que cubrirla, dejándola remojar durante 30 minutos. Luego, pasar la muestra al tamiz #200 para lavarla hasta que el agua que pase sea lo más clara posible. Posteriormente, se traslada la muestra a otro recipiente y se deja reposar durante 15 minutos para permitir que el material se asiente.

Transcurridas las 24 horas de secado al horno, se realiza el tamizado de la muestra por las mallas #4, #10, #20, #40, #60, #140 y #200, de forma similar a la porción analizada anteriormente. Se pesan cada una de las fracciones retenidas en los distintos tamices y se corrobora que no haya una diferencia mayor a 1% entre el peso tomado previo al tamizado y después de haberlo realizado.

Teniendo en los valores de las proporciones obtenidas después de los tamizados se puede graficar la curva granulométrica de la muestra.

En la Figura 3.8 se observan las mallas y los demás instrumentos utilizados.



Figura 3.7. Muestra tamizada por la malla #4.

3.2.3. Límites de Atterberg

El límite líquido se obtiene mediante varias pruebas en las cuales una parte de la muestra se coloca en la Cuchara de Casagrande, se divide en 2 porciones con un ranurador se fuerza a unirse nuevamente producto del movimiento y golpeteo continuo realizado de la cuchara en un dispositivo mecánico. Se requieren 3 o más valores dentro de un rango de porcentajes de agua para determinar el límite líquido. Este valor es la humedad necesaria para que la ranura se cierre en una longitud de 13 mm (1/2") con 25 golpes de la cuchara.

Para determinar el límite plástico, se procede a masar y enrollar continuamente de una porción de suelo hasta que su contenido de agua disminuya para que, al formar un rollo aproximadamente de 3.2 mm de diámetro, la muestra se agriete. La humedad del suelo para que se de esta condición se conoce como límite plástico.

En la Figura 3.9 se muestran los materiales y muestras utilizados para realizar los ensayos de límites de Atterberg.



Figura 3.8. Muestra seca extraída para llevar a cabo los ensayos de límites de Atterberg.

3.2.4. Clasificación SUCS

La clasificación de suelos más utilizada en la mecánica de suelos es el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Este sistema asigna un símbolo a cada tipo de suelo, tanto orgánico o inorgánico. Los principales parámetros de clasificación que se utilizan son el Límite Líquido (LL), el Límite Plástico (LP) y su granulometría, estos describen el comportamiento mecánico del suelo.

Para aplicar este sistema de clasificación, primero se evalúa si más de la mitad del material pasa a través de la malla #200. Luego, para el caso de suelos granulares se verifica si más del 50% de la parte gruesa es retenida en la malla #4. A partir de estos resultados, se elige la denominación correspondiente según los límites de Atterberg, los coeficientes de curvatura y uniformidad.

3.2.5. Clasificación AASHTO

La clasificación AASHTO es un sistema utilizado para clasificar los suelos en diferentes grupos, desde los más adecuados para subbases y bases en carreteras, hasta los que requieren

tratamiento especial debido a su baja resistencia y mayor contenido de finos. Este sistema basa su criterio en el tamaño de partículas y los índices de plasticidad de los suelos.

Los suelos se agrupan en siete categorías principales, de A-1 a A-7. Los suelos que se encuentran en la clasificación A-1 a A-3 representan suelos granulares que suelen ser mejores para la construcción de pavimentos, y, por otro lado, los suelos que se clasifican en el rango de A-4 a A-7 que suelen ser más finos.

3.2.6. Ensayo Proctor modificado

El ensayo de compactación tipo Proctor modificado se aplica únicamente a los suelos que tienen un 30% o menos del peso retenido en la malla #4 (19 mm). Para las muestras estudiadas, se utiliza el método A debido a que se observó un 100% de material pasante en la malla #4.

El suelo, con un porcentaje de humedad elegido, se colocó en 5 capas dentro de un molde específicamente diseñado para este ensayo. Como se muestran en las Figuras 3.10 y 3.11, cada capa fue compactada con 25 golpes, utilizando de un martillo con peso y altura de caída estandarizados. Se determinó la densidad seca del espécimen y se repitió el procedimiento con diferentes porcentajes de humedad, tantas veces como fuera necesario para establecer la relación entre los parámetros de densidad seca y la humedad. Al graficarse estos datos, forman la curva de compactación. Con esta curva se determinan los valores de máxima densidad seca ($\gamma_d \text{ máx}$) y humedad óptima (ω_{opt}).

Para este estudio se utilizó el Proctor Modificado Tipo A, debido a las características que presenta del suelo de muestra.



Figura 3.9. Personal técnico realizando compactación de muestra.



Figura 3.10. Estado de la muestra durante el ensayo Proctor modificado.

3.2.7. Ensayo CBR

Este método de ensayo comprende la determinación de la Relación de Soporte de California (CBR) de materiales de subrasante, subbase y base de pavimentos a partir de muestras compactadas en laboratorio. Este ensayo tiene como objetivo principal evaluar la resistencia de materiales que tienen un tamaño máximo de partícula menor a $\frac{3}{4}$ " (19 mm).

Cuando se requiere probar materiales con un tamaño de partícula máximo mayor que $\frac{3}{4}$ ", este ensayo permite modificarlo mediante la pulverización, de manera que todo el material puede ser utilizado para el ensayo pase el tamiz $\frac{3}{4}$ ".

El procedimiento de este ensayo consiste en realizar compactaciones de 56, 25 y 12 golpes por capa, teniendo en cuenta el tipo de ensayo Proctor utilizado, en nuestro caso fue el tipo A. Según ello, se utilizaron 5 capas para la compactación de los especímenes. Luego de haber realizado la compactación se procedió a curar los especímenes, por lo que se sumergen en la poza respectiva durante 4 días para luego realizar la penetración con ayuda de una prensa. Al momento de realizar la penetración de los especímenes, se tomó nota de las lecturas mostradas para los tiempos ya establecidos, a fin de determinar los esfuerzos correspondientes para este ensayo. En las Figuras 3.12, 3.13 y 3.14 se puede observar evidencia del procedimiento anteriormente detallado.



Figura 3.11. Materiales utilizados para ensayos CBR.



Figura 3.12. Curado de especímenes CBR.



Figura 3.13. Penetración de especímenes CBR.

Adicionalmente, se recomienda realizar ensayos químicos para obtener el porcentaje de pureza de la ceniza y cal utilizadas, a fin de poder determinar la influencia de su pureza en el incremento de resistencia.

3.3. Diseño experimental

Esta investigación se clasifica como de diseño experimental debido a la presencia de un control en el cual se manipulan deliberadamente las variables independientes para observar sus

efectos en la variable dependiente. Las variables independientes son aquellas que se manipulan en una investigación para corroborar la veracidad o falsedad de una hipótesis. Por otro lado, las variables dependientes son aquellas que se ven afectadas como consecuencia de la variación de las variables independientes, estas son las que se evalúan para interpretar los resultados finales obtenidos.

El diseño empleado es de tipo bifactorial, es decir, se tienen dos tipos de variables de entrada independientes, el porcentaje de ceniza de cáscara de arroz añadido y el porcentaje de cal agregada; como se muestra en la Tabla 3.3. Los porcentajes considerados fueron elegidos con fines experimentales.

Tabla 3.3. Variables utilizadas para la investigación.

Variables independientes	Variables dependientes
Contenido de ceniza de cáscara de arroz	Compactación con Proctor modificado tipo A (%)
Activador alcalino (cal)	Capacidad de soporte con índice CBR (%)

La hipótesis será válida si es que luego de analizar los resultados obtenidos del laboratorio muestran un incremento en el índice CBR.

3.4. Procedimiento experimental

En la Figura 3.15 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento experimental que se utilizó para realizar la caracterización de las muestras extraídas.

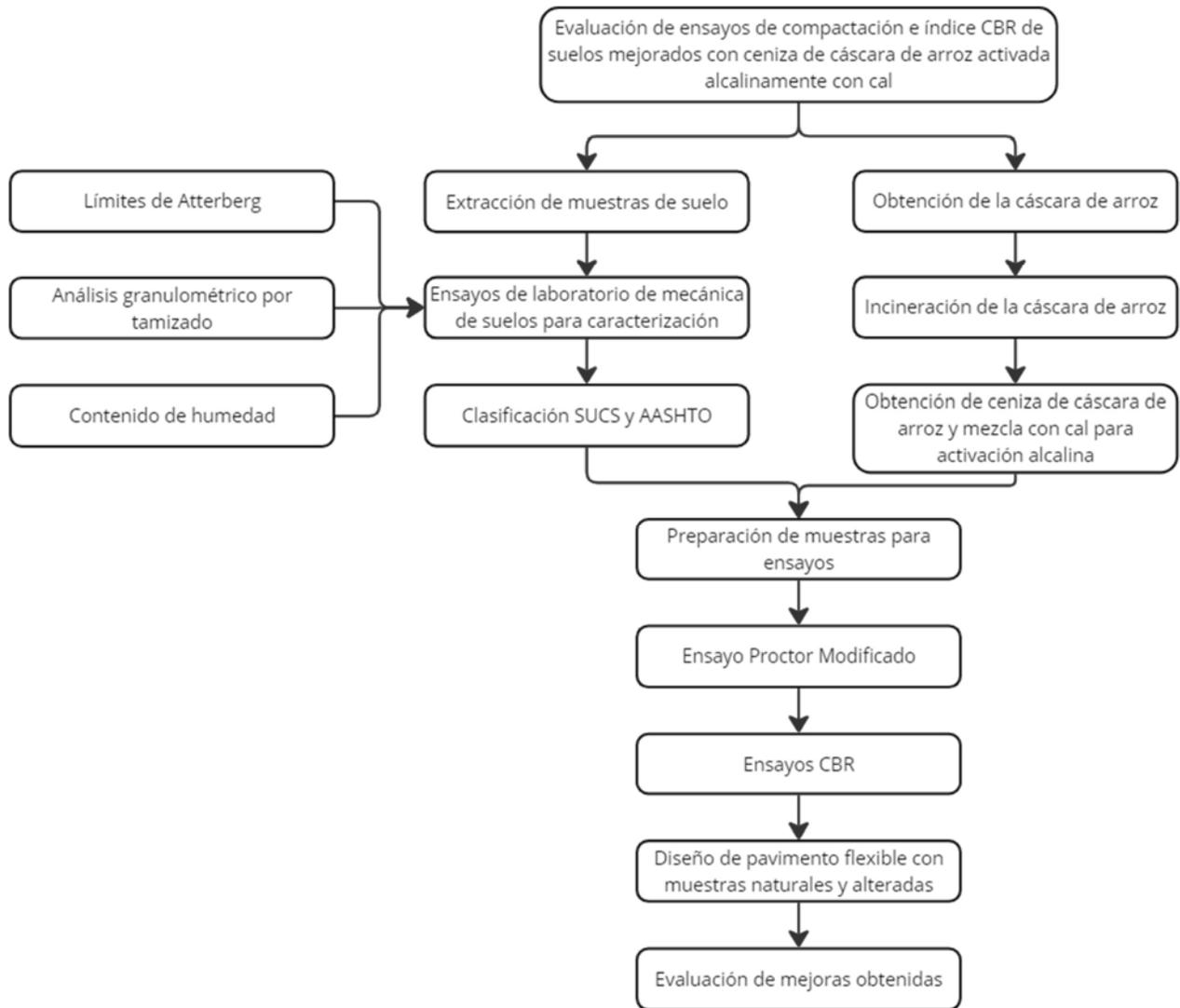


Figura 3.14. Diagrama de flujo para el desarrollo de investigación.

La extracción de muestras de suelo fue realizada mediante la excavación de calicatas. Se trasladaron las muestras a los laboratorios de suelos de la empresa MAPID y de la Pontificia Universidad Católica del Perú, donde se realizaron los ensayos detallados anteriormente para la investigación respectiva.

4. Análisis de los resultados de los ensayos

Para los ensayos de clasificación de suelo se tuvo que triturar la muestra y se analizó la muestra pasante de la malla #4, esto con el fin de analizar la composición fina.

Para la adición de la ceniza de cáscara de arroz se tuvo que tamizar por la malla #200 para que no se incluyan residuos de leña, los cuales se utilizaron para la incineración de la cáscara, esto parte como una idea propia del autor en utilizar este tamaño de partícula.

4.1. Caracterización de muestra

Este capítulo abarca los ensayos requeridos para poder caracterizar el suelo. En el Anexo A se pueden observar los resultados obtenidos de los ensayos y los formatos utilizados.

4.1.1. Límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad de los suelos

Se muestra la Tabla 4.1 elaborada con los valores obtenidos de los límites de Atterberg para las muestras ensayadas.

Tabla 4.1. Límites de Atterberg de la muestra analizada.

Muestra	Límites de Atterberg		
	LL	LP	IP
SC	40	31	9

4.1.2. Análisis granulométrico por tamizado

Se presenta la Tabla 4.2 en la que se resume los porcentajes del análisis granulométrico.

Tabla 4.2. Resultados del análisis granulométrico realizado a la muestra.

Muestra	Análisis granulométrico		
	% grava	% arena	% finos
SC	0	29.3	70.7

En la Figura 4.1 se muestra la curva granulométrica elaborada para la muestra natural del suelo.

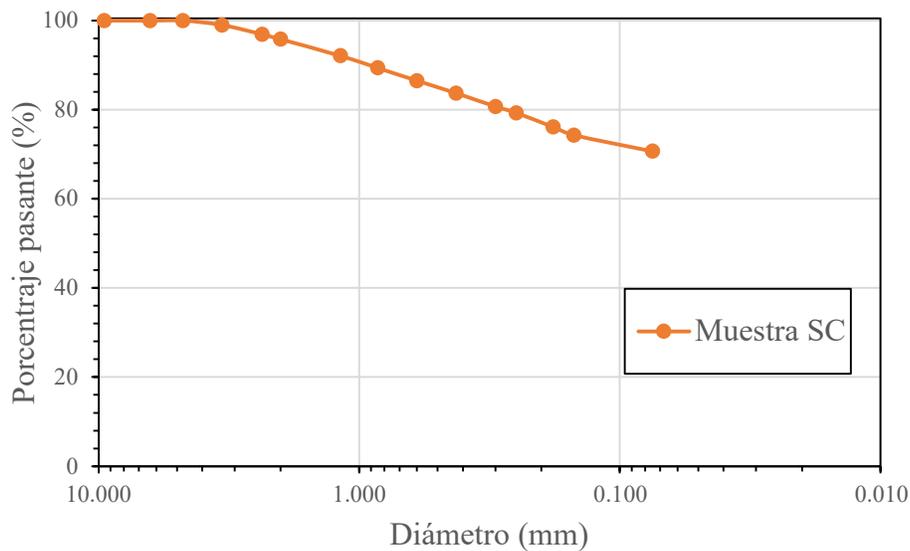


Figura 4.1. Curva granulométrica de muestra.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de los ensayos de análisis granulométrico, el índice de plasticidad, los límites líquido y plástico se concluyó que la muestra obtenida del distrito del Callao es un limo arenoso de baja plasticidad con clasificación SUCS de ML y clasificación AASHTO de A-4 (7).

Tabla 4.3. Resultados de clasificación SUCS y AASHTO de muestra natural.

Muestras	Clasificación	
	AASHTO	SUCS
SC	A-4 (7)	ML

Asimismo, es altamente recomendable realizar ensayos como gravedad específica, granulometría por sedimentación, determinación de sulfatos, cloruros, sales y pH; con el fin de poder caracterizar de manera más completa y detallada el tipo de suelo obtenido antes y luego del mejoramiento.

4.2. Ensayos mecánicos de las mezclas

Dentro de los ensayos mecánicos realizados a las mezclas se encuentran los ensayos de Proctor modificado y relación de soporte de California (CBR). En el Anexo B se pueden

observar los resultados obtenidos de los ensayos realizados a la muestra natural y a las mezclas con aditivos.

4.2.1. Compactación con Proctor modificado

A continuación, se muestra la Tabla 4.4 con los resultados de los ensayos Proctor modificado tipo A del suelo natural y mezclas.

Tabla 4.4. Resultados de ensayo Proctor modificado tipo A para la muestra natural y mezclas.

Muestras	Humedad óptima (%)	Densidad seca máxima (g/cm ³)
M1 – SC natural	18.0	1.651
M2 – SC97 CCA3	24.5	1.501
M3 – SC97 CCA3 C1	24.2	1.595
M4 – SC91 CCA6 C3	25.0	1.447

Se muestran las curvas de compactación elaboradas en la Figura 4.2 con los datos contemplados de la Tabla 4.4.

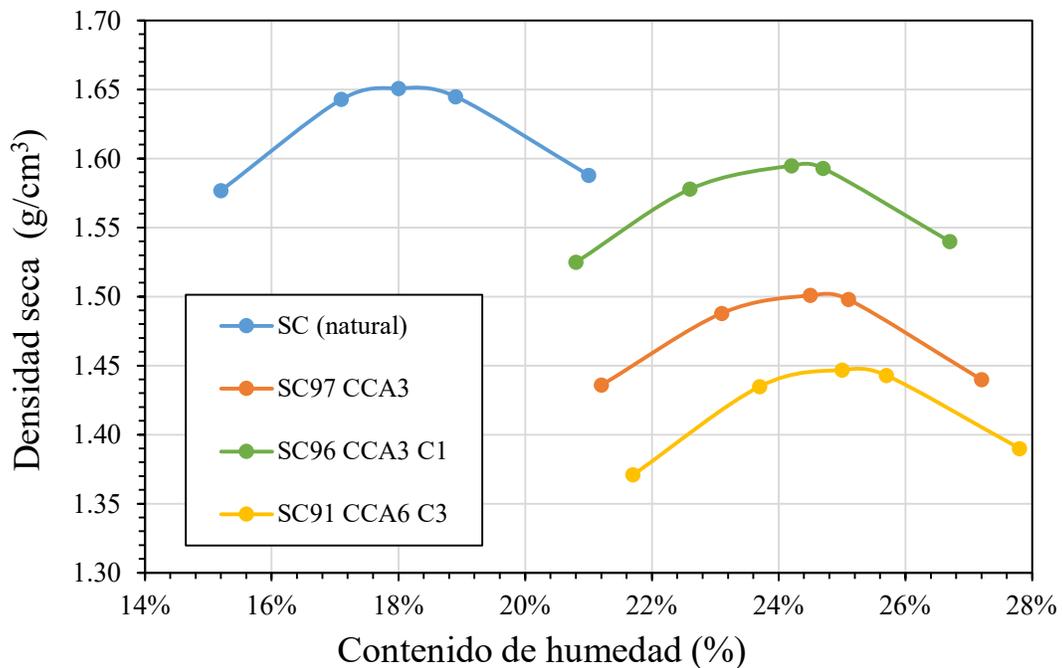


Figura 4.2. Curvas de compactación de las muestras y mezclas del distrito Callao.

Se observan reducciones en las densidades secas, como resultado de la influencia de la ceniza de cáscara de arroz y la cal, ya que ambos tienen menor densidad que los suelos estudiados. Según los porcentajes utilizados, se pueden observar reducciones entre 8% y 13%. Estos porcentajes pueden variar dependiendo de la dosificación de cal y ceniza de cáscara de arroz que se utilice.

Asimismo, se observa un incremento de las humedades óptimas de las mezclas en comparación con el valor correspondiente a las muestras naturales, esto debido al rol que tiene la cal de absorber agua (*National Lime Association, 2004*).

4.2.2. Ensayo de relación de soporte de California

En el Manual de Carreteras Sección Suelos y Pavimentos (2014), en el subcapítulo 4.3 “Descripción de los suelos”, se establece una correlación para la determinación del módulo resiliente, a partir del valor del índice CBR de un suelo. Esta correlación viene dada por la siguiente ecuación:

$$M_R (\text{psi}) = 2555 \times \text{CBR}^{0.64} \quad (1)$$

En la Tabla 4.5 se muestran los porcentajes de CBR y módulo de resiliencia obtenidos, de acuerdo con la Ecuación 1. Asimismo, se añadió la categoría establecida en el Manual de Carreteras para subrasantes, las cuales se detallan en el subcapítulo 4.3 “Descripción de los suelos”, según los valores de CBR del suelo el cual se encuentra detallado en la Tabla 2.1 del presente trabajo.

Tabla 4.5. Resultados de ensayos CBR de las muestras naturales y mezclas con aditivos.

Muestras	CBR al 95 %	Módulo resiliente (psi)	Categoría
M1 – SC (natural)	7.7	9435	Regular
M2 – SC 97 CCA 3	13.0	13192	Buena
M3 – SC97 CCA3 C1	28.1	21605	Muy buena
M4 – SC91 CCA6 C3	46.8	29947	Excelente

En la Figura 4.3 se muestran los incrementos de los valores CBR luego de agregar los aditivos para el mejoramiento de las muestras.

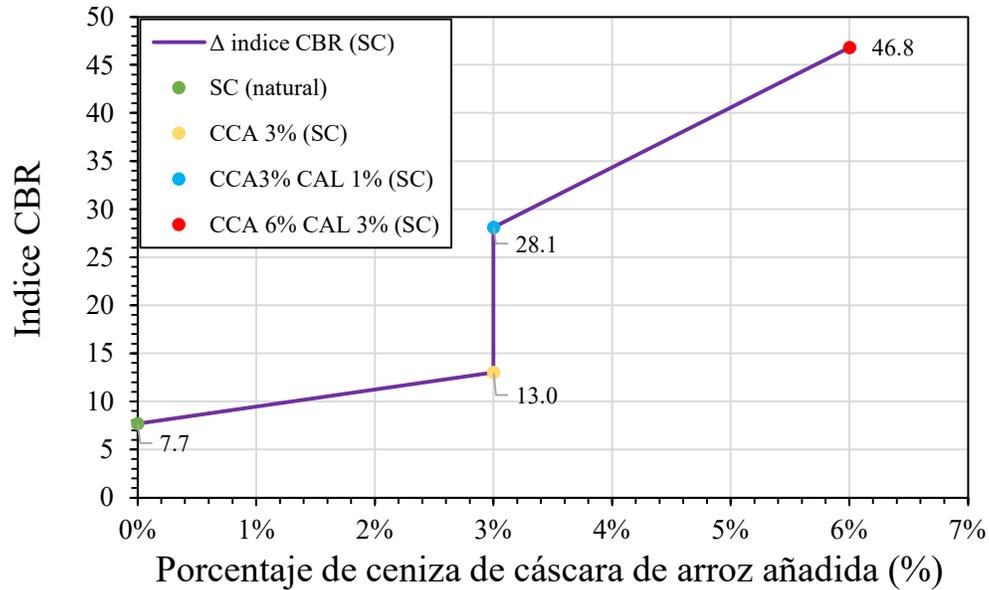


Figura 4.3. CBR al 95% de acuerdo a los porcentajes de ceniza de cáscara de arroz.

Se agregaron los porcentajes indicados en el capítulo de metodología para contrastar el mejoramiento obtenido y se observaron mejoras de hasta seis veces en los valores de CBR de las mezclas en comparación a los valores iniciales. Asimismo, las mezclas pasaron de tener una condición inicial de subrasante regular a excelente, con los contenidos de ceniza y cal en mayor proporción.

En la Tabla 4.6 se muestran los porcentajes de CBR mejorados obtenidos en la presente investigación en comparación con las mejoras que se obtuvieron en los trabajos de referencia utilizados para la investigación.

Tabla 4.6. Porcentajes de mejora obtenidos en investigaciones pasadas.

Investigación	Tipo de suelo	Dosificación		CBR natural		Porcentaje de mejora obtenido
		CAL (%)	CCA (%)	Natural	Mejorado	
Propia	ML	3	6	7.7	46.8	608%
Castro (2017)	CL	3	20	5.0	38.5	670%
Alvarado & Guerra (2018)	SP	2	8	21.5	118.2	450%
Esquivel & Gamez (2019)	CL	2	5	10.0	26.0	260%
Centeno et al. (2024)	CH	1	15	2.3	20.0	770%
Mendez & Lopez (2020)	CH-OH	3	12	1.2	10.2	750%
Propia	ML	0	3	7.7	13.0	69%
Llauce & Perez (2022)	CL	0	15	3.1	6.4	106%
Andaluz (2022)	ML	0	8	7.8	12.1	55%
Cenizario (2022)	SP	0	5	23.0	34.3	49%
Gomez & Gonzales (2020)	SP	0	10	11.7	20.7	77%
Gonzales (2023)	SC	0	15	9.5	14.0	47%
Torres (2022)	CL	0	7.5	16.4	36.0	120%

Como se puede observar en las investigaciones pasadas se obtuvieron mejoras en los índices CBR con un promedio del incremento de seis veces del valor inicial de este parámetro, precisamente la mejora obtenida en nuestra investigación, utilizando la ceniza de cáscara de arroz y el activador alcalino.

Por otro lado, también se realizó la comparación con el espécimen en el que solo se utilizó la ceniza de cáscara de arroz, sin activador. Según estudios previos desarrollados en los que se utilizaron la misma metodología, se observaron porcentajes de mejora promedio de 75%, un valor muy cercano al obtenido en la investigación desarrollada, el cual fue de 69%. Con ello se puede evidenciar la función de la cal como activador alcalino y las bajas propiedades cementantes de la ceniza de cáscara de arroz por si sola.

Además, se debe tener en consideración que los porcentajes de mejora pueden variar dependiendo de las dosificaciones utilizadas, la pureza de los componentes utilizados, la tipología del suelo y otros parámetros que podrían ser considerados para una próxima investigación.

4.3. Diseño de pavimento flexible

Para el desarrollo del trabajo de investigación sobre mejoramiento de suelos aplicado a pavimentos, se realizó un diseño de pavimento flexible para una vía local aledaña al lugar de extracción de las muestras de suelo. Se utilizó el método de diseño desarrollado por la AASHTO (1993).

La metodología AASHTO-93 emplea la Ecuación 2 para establecer una relación entre distintas variables para el diseño de pavimentos flexibles y mediante la cual se obtiene el número estructural (SN), valor requerido para obtener los espesores de cada capa que conforman el pavimento, considerando los coeficientes estructurales de cada una de ellas.

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_r * S_0 + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.4 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} M_R - 8.07 \quad (2)$$

Donde:

W_{18} : Número de cargas de 18000 lb aplicadas durante vida útil del pavimento

Z_r : Desviación estándar normal

S_0 : Variabilidad

SN: Número estructural (*Structural Number*)

ΔPSI : Diferencia entre índice de servicio inicial y final

M_R : Módulo resiliente de subrasante (psi)

Con respecto a la determinación del ESAL utilizado, se tuvo en cuenta que este era una vía local con aproximadamente 950 vehículos. Se consideró como un tipo de vía local-urbana

de 2 sentidos y 1 carril en cada sentido, con un periodo de diseño de 20 años y una tasa de crecimiento de 2.9%, este último dato extraído de un informe vehicular desarrollado por la INEI en 2024.

Para la determinación del ESAL se utiliza la Ecuación 3, detallada a continuación:

$$ESAL = ADT_0 * T * T_f * G * D * L * 365 * Y \quad (3)$$

Donde:

ADT₀: Tráfico diario promedio al inicio del periodo de diseño

T: porcentaje de camiones en el ADT

T_f: factor por camión

G: tasa de crecimiento

D: factor de distribución direccional

L: factor de líneas de tráfico

Y: periodo de diseño en años

Se muestra la Tabla 4.7 con los valores correspondientes para determinar el valor de ESAL requerido.

Tabla 4.7. Variables consideradas para cálculo de ESAL.

Variables	Valor
ADT ₀	950
T	60%
T _f	2.149
G	1.386
D	0.5
L	1
Y	20

El valor obtenido para número de cargas equivalentes ESAL fue de 6.197×10^6 . Este valor fue utilizado dentro de la metodología AASHTO-93, junto con las variables mencionadas que se involucran para la obtención del número estructural del pavimento. En la Tabla 4.8 se muestran los valores obtenidos según las condiciones del caso estudiado para el diseño del pavimento; asimismo, dentro de esta tabla se muestran los valores de índice CBR y módulo resiliente de la muestra de suelo natural y las mezclas mejoradas con ceniza de cáscara de arroz y cal.

Tabla 4.8. Condiciones para diseño de espesores de pavimento natural y mejorado.

Datos	Natural		Modificado	
Muestra	M1	M2	M3	M4
Tipo de pavimento	Flexible			
ESAL (10^6)	6.197			
Tipo de vía	Local - Urbana			
Confiability (R)	65%			
Z_r	-0.3885			
Variabilidad " S_0 "	0.49			
ΔPSI	2.2			
CBR	7.7	13	28.1	46.8
M_R	9435	13192	21605	29947

Utilizando los valores expuestos anteriormente en la ecuación de relación de número de cargas equivalentes, se obtuvieron los números estructurales para cada muestra utilizada. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4.9.

Tabla 4.9. Números estructurales obtenidos.

Datos	Natural		Modificado	
Muestra	M1	M2	M3	M4
SN (pulg)	3.53	3.14	2.64	2.34
SN (cm)	8.96	7.98	6.70	5.95

Luego, se determinaron coeficientes estructurales, coeficientes de drenaje y espesor por cada capa que conforma el pavimento. A continuación, se muestra la Ecuación 4, utilizada para establecer una relación entre las variables mencionadas.

$$SN = a_1 D_1 + a_2 D_2 m_2 + a_3 D_3 m_3 \quad (4)$$

Donde:

a_i : Coeficiente estructural de la capa i

D_i : Espesor de la capa i

m_i : Coeficiente de drenaje de la capa i

Se consideran los valores mínimos establecidos en el Manual de Carreteras (2014). El espesor mínimo requerido para las capas superficiales con mezcla asfáltica en caliente es de 5 cm y el espesor mínimo constructivo para las capas granulares es de 15 cm (MTC, 2014).

Para el caso de los coeficientes de estructurales por capa, se asumió que las capas granulares cumplirán con el requerimiento mínimo de CBR establecido por la norma CE.010 (2010), en la cual se detalla que se requiere un CBR mínimo de 80% para la base y 40% para la subbase granular.

Con respecto al coeficiente estructural de la capa de rodadura (a_1), se consideró el valor de 0.40. Para determinar los valores de los coeficientes a_2 y a_3 , correspondientes a las capas de base y subbase respectivamente, se utilizaron las Figuras 4.4 y 4.5, en las cuales se observan los valores de coeficientes relacionados con el índice CBR del suelo.

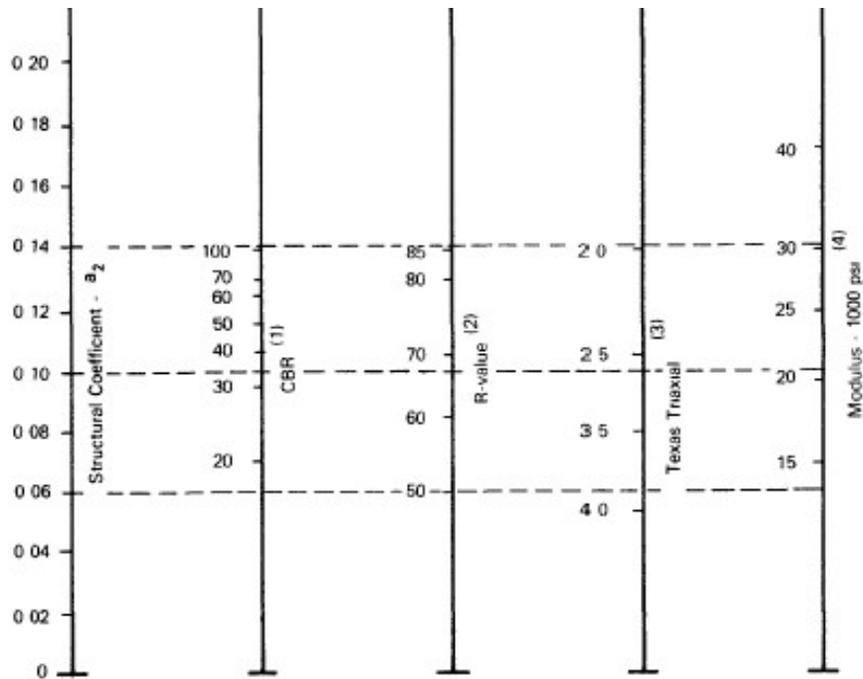


Figura 4.4. Coeficientes para base a_2 (AASHTO, 1993).

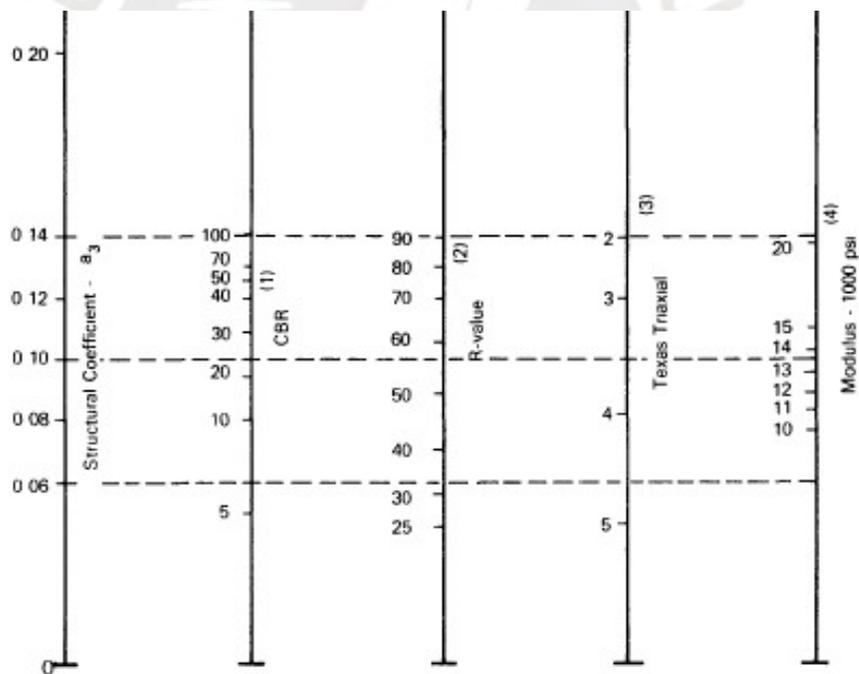


Figura 4.5. Coeficientes para subbase a_3 (AASHTO, 1993).

Finalmente, ya que no se tiene información exacta sobre la pluviometría en la zona, no es factible determinar los coeficientes de las capas de base y subbase que definen la calidad de su drenaje. Por ello se tomó el valor unitario en ambos casos para realizar un cálculo de manera

conservadora. En la Tabla 4.10 se muestran los valores de las variables requeridas para la determinación de los espesores de las capas del pavimento.

Tabla 4.10. Coeficientes de drenaje, estructurales y espesores de capa.

Variables	Valores
a ₁	0.4
D ₁ (cm)	5
a ₂	0.135
D ₂ (cm)	15
a ₃	0.12

Con los datos mostrados en las Tablas 4.9 y 4.10 se pudieron determinar los valores de los espesores para la capa de subbase, tanto para la subrasante natural (M1) como para las mezclas con aditivos (M2, M3 y M4). Estos espesores se muestran en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Valores de diseño de espesores de subbase.

Espesores	M1	M2	M3	M4
D ₃ (cm)	40	35	25	15

En la Figura 4.6 se muestra el detalle de los espesores obtenidos con las distintas mezclas y sus dosificaciones de ceniza de cáscara de arroz y cal respectivas. Se puede observar reducciones de los espesores en la capa de subbase de 40 a 15 cm.

Esta reducción se debe al aumento del módulo resiliente (Mr) e índice de CBR a medida que se aumentan las dosificaciones de ceniza y cal.

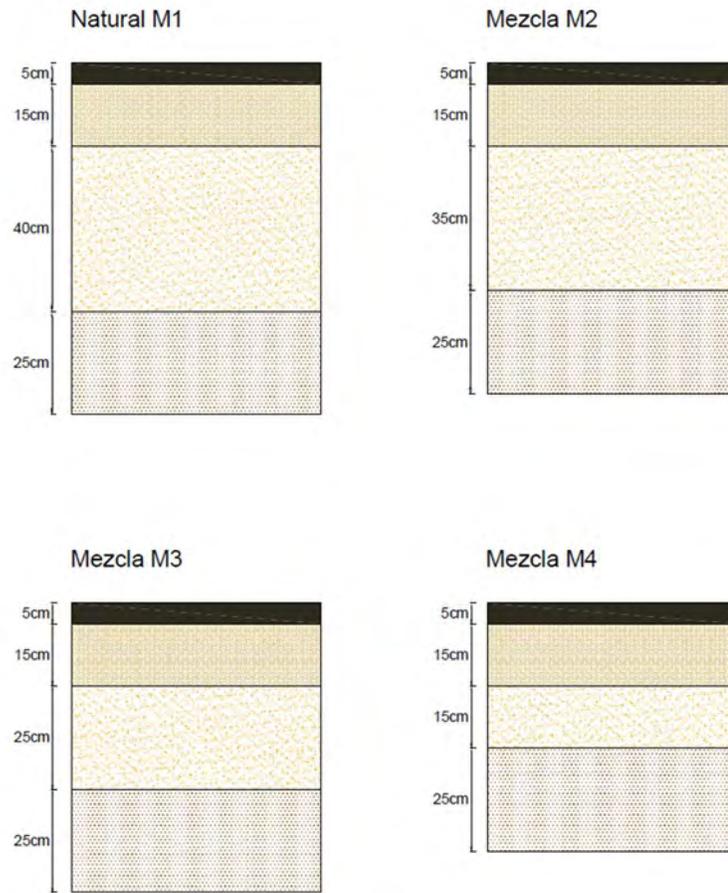


Figura 4.6. Diseño de espesores subrasante natural y mejorada.

5. Conclusiones

- Según la clasificación SUCS realizada, la muestra extraída mediante calicatas en el distrito del Callao fue clasificada como ML, limo arenoso de baja plasticidad, el cual es un suelo aplicable al método de mejoramiento químico propuesto en el estudio.

- Según los resultados obtenidos en los ensayos Proctor modificado, se visualizaron reducciones en las máximas densidades secas; esto debido a la influencia de la ceniza como un aditivo de baja densidad. Asimismo, se observaron incrementos en la humedad óptima debido a la adición de la cal y de la ceniza, los cuales son agentes que absorben humedad.

- Según el Manual de Carreteras, un suelo de subrasante se considera bueno cuando este tiene un valor CBR entre 10 y 20, este requisito lo cumple la muestra mejorada solo con un 3% de CCA. Con la dosificación de 1% de cal y 3% de CCA se obtuvo una calificación de muy buena para la subrasante. Finalmente, utilizando la dosificación de 3% de cal y 6% de CCA, se obtiene una subrasante con calificación de excelente.

- Al hacer la comparación de los resultados obtenidos utilizando 3% de CCA y 1% de cal versus 3% de CCA únicamente, se observó que la cal tiene un papel importante, ya que se tuvo un incremento al doble del valor del CBR inicialmente mejorado solo con ceniza de cáscara de arroz, esto debido a la activación alcalina de la ceniza, la reducción de plasticidad que brinda la cal y el favorecimiento la compactación y trabajabilidad de las mezclas.

- Según los valores obtenidos de los ensayos CBR realizados a las muestras modificadas, se obtuvo una fiabilidad del ensayo del 100%, ya que todas las muestras modificadas mostraron un mejoramiento de los valores obtenidos con respecto del valor correspondiente a la muestra natural.

- Teniendo en cuenta los valores de diseño de los espesores de las capas granulares, se observaron mejoras en las muestras con los aditivos propuestos respecto al valor obtenido utilizando la muestra natural. La reducción del espesor de la capa de subbase granular expresa el mejoramiento del método aplicado, las cuales varían desde 40 hasta 15 cm.

- Se obtuvieron resultados similares a estudios previos sobre mejoramientos con ceniza de cáscara de arroz. Los porcentajes de mejora en el índice CBR utilizando ceniza de cáscara de arroz y cal concuerdan con los obtenidos en los estudios anteriormente realizados. La variabilidad en el porcentaje de mejora se debe a las dosificaciones utilizadas en los ensayos.

- El proceso de producción del arroz cumple con las características y políticas necesarias para formar parte de un modelo de economía circular. Es decir, se separan los granos de la cáscara (residuo orgánico), luego se reaprovecha mediante el proceso de incineración y se obtiene la ceniza para el mejoramiento de algunas propiedades de los suelos. Implementar un modelo de economía circular brinda muchas ventajas, como la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, reducción de dependencia de materias primas, exploración de alternativas sostenibles en diversas industrias, entre otros.

Referencias bibliográficas

- Alvarado, C., & Guerra, A. (2018). *Influencia de la adición de ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente sobre la estabilización ecológica de la mezcla de suelo - sedimento en la provincia de Virú*. [Tesis para título profesional, Universidad Nacional de Trujillo]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Trujillo. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/11041>.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (1993). *Guide for design of pavement structures*. AASHTO.
- Andaluz, R. (2022). *Estudio del efecto de ceniza de cáscara de arroz en las propiedades físico-mecánicas en suelos finos de subrasante*. [Tesis para título profesional, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio institucional de la Universidad Técnica de Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/34106>.
- Calmosacorp. (2019). *Uso del hidróxido de calcio en las industrias*. Calmosacorp.
- Castro, A. (2017). *Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cáscara de arroz para el mejoramiento de subrasante*. [Tesis para título profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería. <http://hdl.handle.net/20.500.14076/10054>.
- Cenizario, K. (2022). *Evaluación de la Capacidad de Soporte (CBR) del afirmado de la cantera Sol de Huarmey mediante la adición de ceniza de cáscara de arroz*. [Tesis para título profesional, Universidad San Pedro]. Repositorio institucional de la Universidad San Pedro. <http://repositorio.usanpedro.edu.pe/handle/20.500.129076/23004>.

- Centeno, Saltos, & Ortiz. (2024). Estabilización de suelos arcillosos con el empleo de las cenizas de cáscara de arroz combinada con cal. *Revista Científica "INGENIAR"*, 7(14), 101-113. <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14.0206>.
- Esquivel, G., & Gamez, M. (2019). *Cal y cenizas de cáscara de arroz para estabilizar la superficie de rodadura en la vía Santa Clemencia - Chachapoyas*. [Tesis para título profesional, Universidad Nacional del Santa]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Santa. <https://hdl.handle.net/20.500.14278/3501>.
- Giaccio, Zerbino, Tobes, Lopez, Isaia, & Sensale., R. d. (2006). Aprovechamiento de la ceniza de cáscara de arroz para la elaboración de hormigones. *Ciencia y Tecnología del Hormigón*(13), 7-20.
- Gomez, D., & Gonzáles, Y. (2020). *Mejoramiento del suelo utilizando cenizas de cáscara de arroz en la pavimentación AA. HH. Tahuantinsuyo, Nuevo Chimbote-Ancash-2020*. [Tesis para título profesional, Universidad César Vallejo]. Repositorio institucional de la Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/57572>.
- Gonzales, D. (2023). *Mejoramiento de la subrasante con cenizas de cáscara de arroz en el distrito de Cajaruro, Utcubamba, Amazonas 2021*. [Tesis para título profesional, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. Repositorio institucional de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo. <http://hdl.handle.net/20.500.12423/6618>.
- Hidalgo, S. (2018). *Evaluación de la reactividad puzolánica de la ceniza de paja de arroz*. [Tesis de máster, Universitat Politècnica de Valencia]. Repositorio institucional de la Universitat Politècnica de Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/105638>.
- Huancoillo, Y. (2017). *Mejoramiento de suelo arcilloso con ceniza volante y cal para su uso como pavimento a nivel de afirmado en la carretera desvío Huancané - Chupa - Puno*. [Tesis

- para título profesional, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/6963>.
- Instituto Nacional de Calidad. (2021). *CALES. Cal viva y cal hidratada para estabilización de suelos. Especificaciones*. INACAL.
- Jimenez, H., & Eguez, H. (2001). *Obtención de concreto de alta resistencia mediante adición en el diseño de un superplastificante y ceniza de cascarilla de arroz*. [Tesis para título profesional, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/3325>.
- Kovalchuk, Palomo, & Fernandez-Jimenez. (2008). Activación alcalina de cenizas volantes. Relación entre el desarrollo mecánico resistente y la composición química de la ceniza. En *Materiales de Construcción* (págs. 35-52). CSIC.
- Llauce, Y., & Perez, D. (2022). *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 título profesional, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional de la Universidad Privada del Norte. <https://hdl.handle.net/11537/31974>.
- Méndez, J., & López, C. (2020). *Evaluación del comportamiento físico-mecánico de la resistencia de un suelo arcilloso con adición de cal y cenizas de cascarilla de arroz*. [Tesis para título profesional, Universidad Piloto de Colombia]. Repositorio institucional de la Universidad Piloto de Colombia. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/7447>.
- Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones. (2014). Manual de Carreteras. En *Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección: Suelos y Pavimentos*.

- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2010). *CE. 010 Pavimentos urbanos*. MVCS.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2012). *CE. 020 Suelos y Taludes*. MVCS.
- Mitsuuchi, M. (2012). *Producción y caracterización de materiales cementantes a partir del Silicoaluminato Cálcico Vitreo (VCAS)*. [Tesis doctoral, Universitat Politècnica de Valencia]. Repositorio institucional de la Universidad Politècnica de Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/16879>.
- National Lime Association. (2004). *Lime-treated soil construction manual*. National Lime Association.
- Núñez, C. (2004). *Pavimentos*. Universidad Mayor de San Simón.
- Probisa. (2020). *Estabilización de suelos*. <https://www.probisa.com/soluciones-constructivas/portipo-de-aplicacion/tecnicas-amigables-con-el-medioambiente/estabilizacion-de-suelos>
- Rojas, S. d., Frías, Rivera, Escorihuela, & Marín. (2000). Investigación sobre la actividad puzolánica de materiales de desecho procedentes de arcilla cocida. *Materiales de construcción*, 51(261), 45-52.
- Salas, Castillo, Rojas, S. d., & Veras. (1986). Empleo de cenizas de cáscara de arroz como adiciones en morteros. *Materiales de construcción*, 36(203), 21-39.
- Secretaría de economía de México. (2022). *Perfil de mercado de la caliza*. Dirección General de Desarrollo Minero.
- Terratest. (2019). *Tecnologías Geopier para la mejora de suelos y cimentaciones intermedias*. www.terratest.com
- Torres, J. (2022). *Mejoramiento de las propiedades mecánicas de suelos arcillosos mediante la adición de ceniza de cascarilla de arroz para la pavimentación de la carretera Santa Rosa*

de Combayo, Cajamarca, 2021. [Tesis para título profesional, Universidad Privada del Norte]. Repositorio institucional de la Universidad Privada del Norte.
<https://hdl.handle.net/11537/31616>.

Xinyu, Xiaodong, Liu, Hongzhuo, Yumei, & Zichen. (2015). A review on recent advances in the comprehensive application of rice husk ash. *Res Chem Intermed*, 42, 893-913.
<https://doi.org/10.1007/s11164-015-2061-y>.

Yepes, V. (2012). *Universitat Politècnica de Valencia*. poliBlogs:
<https://victoryepes.blogs.upv.es/2012/06/01/>.



Anexo A: Análisis granulométrico y caracterización de muestra



INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : Luis E. Cáceres Crispin
 DIRECCIÓN : Av. Gerardo Unger 6342
 PROYECTO : Análisis del comportamiento mecánico de suelos blandos con ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente

EXPEDIENTE N° : 0251-2020/LAB_MAPID
 FECHA RECEPCIÓN : Lima, 29 de Octubre del 2020
 UBICACIÓN : Lima

REFERENCIA DE LA MUESTRA

IDENTIFICACION : Calicata C-01
 DESCRIPCIÓN : Muestra M-04

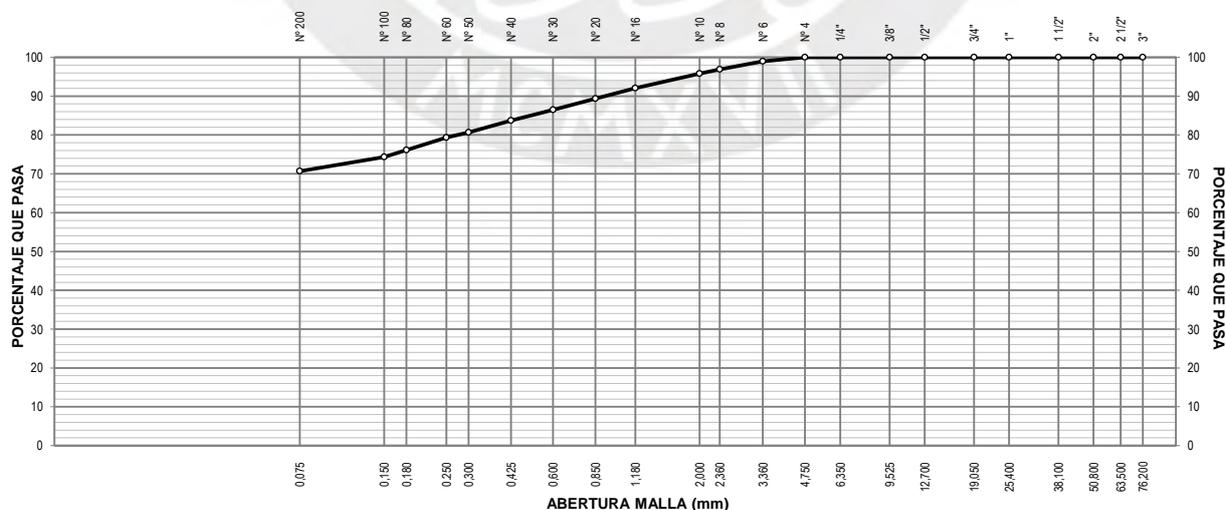
PRESENTACION : 04 Costal de polietileno
 CANTIDAD : 240 kg aprox.

ASTM D 422 MTC E 107	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO
---------------------------------	---

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO				
MALLAS		RETENIDO PARCIAL (%)	RETENIDO ACUMULADO (%)	PASA (%)
SERIE AMERICANA	ABERTURA (mm)			
3"	76.200			100.0
2 1/2"	63.500			100.0
2"	50.800			100.0
1 1/2"	38.100			100.0
1"	25.400			100.0
3/4"	19.050			100.0
1/2"	12.700			100.0
3/8"	9.525			100.0
1/4"	6.350			100.0
N° 4	4.750	0.0	0.0	100.0
N° 6	3.360	1.0	1.0	99.0
N° 8	2.360	2.1	3.1	96.9
N° 10	2.000	1.1	4.2	95.8
N° 16	1.180	3.8	7.9	92.1
N° 20	0.850	2.7	10.6	89.4
N° 30	0.600	2.9	13.5	86.5
N° 40	0.425	2.7	16.3	83.7
N° 50	0.300	3.1	19.3	80.7
N° 60	0.250	1.3	20.7	79.3
N° 80	0.180	3.2	23.9	76.1
N° 100	0.150	1.8	25.7	74.3
N° 200	0.075	3.7	29.3	70.7
<N°200	ASTM D 1140	70.7	100.0	

CARACTERISTICAS GENERALES	
ASTM D 2488 "Descripción e Identificación de suelos"	
Grava (Ret. N°4)	: 0.0 %
Arena	: 29.3 %
Fino (Pas. N°200)	: 70.7 %
ASTM D 4318 "Límites de Atterberg"	
Límite Líquido (L.L.)	: 40 %
Límite Plástico (L.P.)	: 31 %
Índice Plástico (I.P.)	: 9 %
ASTM D 3282, "Clasificación para el uso en vías transporte" (AASHTO)	
A-4 (7)	
ASTM D 2487, "Clasificación con propósito de ingeniería" (SUCS)	
ML	
Limo con arena	
ASTM D 2216, "Contenido de humedad"	
Cont. de humedad	: 26.4 %
OBSERVACIONES:	
- Muestra tomada e identificada por personal tecnico de laboratorio.	
- Ensayo efectuado al suelo natural.	

CURVA GRANULOMÉTRICA



Fecha de emisión : Lima, 16 de Diciembre del 2020

Tec.: J.N.C
Rev.: J.M.C

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : Luis E. Cáceres Crispin	EXPEDIENTE : 0251-2020/LAB_MAPID
DIRECCIÓN : Av. Gerardo Unger 6342	FECHA RECEPCIÓN : Lima, 29 de Octubre del 2020
PROYECTO : Análisis del comportamiento mecánico de suelos blandos con ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente	UBICACIÓN : Lima

REFERENCIA DE LA MUESTRA

IDENTIFICACION : Calicata C-01	PRESENTACION : 04 Costal de polietileno
DESCRIPCIÓN : Muestra M-04	CANTIDAD : 240 kg aprox.

ASTM D 2216 MTC E 108	DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD
----------------------------------	---

DENOMINACIÓN	CONTENIDO DE HUMEDAD	
	E - 1	E - 2
Cápsula N°	3117	
Peso cápsula + suelo húmedo (g)	3145.8	
Peso cápsula + suelo seco (g)	2554.2	
Peso del Agua (g)	591.6	
Peso de la cápsula (g)	312.5	
Peso del suelo seco (g)	2241.7	
Contenido de Humedad (%)	26.4	
Contenido de Humedad (RESULTADO) (%)	26.4	

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por personal tecnico de laboratorio.
- Ensayo efectuado al suelo natural.

Fecha de emisión : Lima, 16 de Diciembre del 2020

Tec.: J.N.C
Rev.: J.M.C

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

Anexo B: Ensayos Proctor y CBR para suelo natural y mezclas



INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : Luis E. Cáceres Crispin
 DIRECCIÓN : Av. Gerardo Unger 6342
 PROYECTO : Análisis del comportamiento mecánico de suelos blandos con ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente

EXPEDIENTE : 0251-2020/LAB_MAPID
 FECHA RECEPCIÓN : Lima, 29 de Octubre del 2020
 UBICACIÓN : Lima

REFERENCIAS DE LA MUESTRA

IDENTIFICACIÓN : Calicata C-01
 DESCRIPCIÓN : Muestra M-04

PRESENTACIÓN : 4 Bolsa de Polietileno
 CANTIDAD : 240 kg. aprox.

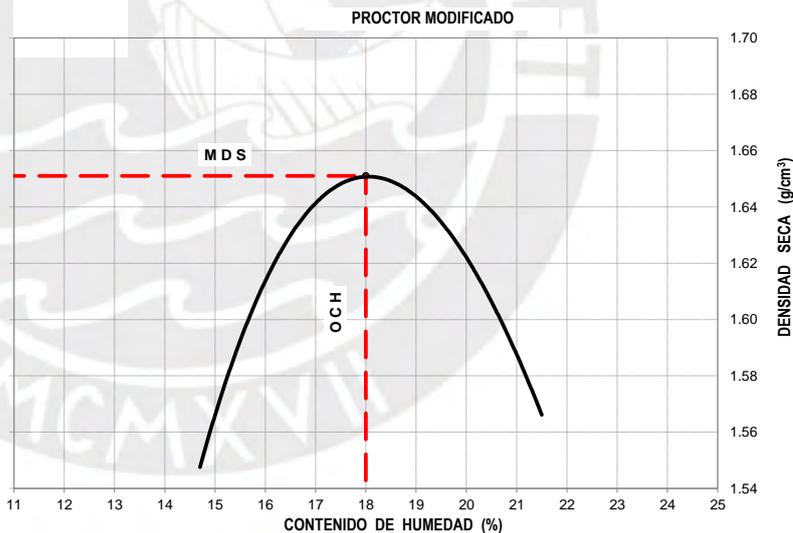
ASTM D 1557 MTC E 115	PROCTOR MODIFICADO
----------------------------------	---------------------------

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	ENSAYO							
			E-1		E-2		E-3		E-4	
1	Peso Suelo Humedo + Molde	gr	3664		3765		3795		3762	
2	Peso del Molde	gr	1961		1961		1961		1961	
3	Peso Suelo Humedo	gr	1703		1804		1834		1801	
4	Volumen del Molde	cm ³	937.4		937.4		937.4		937.4	
5	Densidad Suelo Humedo	gr/cm ³	1.817		1.924		1.956		1.921	
6	Tarro N°	-	43	90	21	264	423	8	383	126
7	Peso Suelo Humedo + Tarro	gr	457.3	536.9	456.8	432.1	466.2	492.2	468.7	444.1
8	Peso Suelo Seco + Tarro	gr	403.5	477.2	403.4	379.4	404.4	427.7	401.5	380.5
9	Peso del Tarro	gr	51.9	82.2	90.4	68.8	80.4	83.3	81.0	76.3
10	Peso del Agua	gr	53.8	59.7	53.4	52.7	61.8	64.5	67.2	63.6
11	Peso Suelo Seco	gr	351.6	395.0	313.0	310.6	324.0	344.4	320.5	304.2
12	Contenido de Humedad	%	15.3	15.1	17.1	17.0	19.1	18.7	21.0	20.9
13	Promedio de Humedad	%	15.2		17.1		18.9		21.0	
14	Densidad del Suelo Seco	gr/cm ³	1.577		1.643		1.645		1.588	

DATOS DESARROLLO DE ENSAYO	
Altura de caída del pisón :	45.7 cm
Peso del Pisón	4.5 Kg
Volumen del Molde	937.4 cm ³
N° de Capas	5
Energía de Compactación Modificada	27.4 kg-cm/cm ³
Número de Golpes / Capa	25

GRADACION DE MUESTRA		
Serie Americana	Ret. Parc. (%)	Pasa (%)
3"	0.0	100.0
2"	0.0	100.0
3/4"	0.0	100.0
3/8"	0.0	100.0
N°4	0.0	100.0
<N°4	100.0	0.0

RESULTADO	
MÉTODO	A
MDS	1.651 gr/cm ³
OCH	18.0 %



DATO:

- M.D.S. =Maxima Densidad Seca; O.C.H. = Optimo Contenido de Humedad.

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- Ensayo efectuado al suelo natural.

Fecha de emisión : Lima, 16 de Diciembre del 2020

Tec.: J.N.C
Rev.: J.M.C

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : Luis E. Cáceres Crispín
 DIRECCIÓN : Av. Gerardo Unger 6342
 PROYECTO : Análisis del comportamiento mecánico de suelos blandos con ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente

EXPEDIENTE : 0251-2020/LAB_MAPID
 FECHA DE RECEPCIÓN : jueves, 29 de Octubre de 2020
 UBICACIÓN : Lima

REFERENCIA DE LA MUESTRA

IDENTIFICACIÓN : Calicata C-01
 DESCRIPCIÓN : Muestra M-04
 PRESENTACIÓN : 04 Bolsa de polietileno
 CANTIDAD : 240 kg aprox.

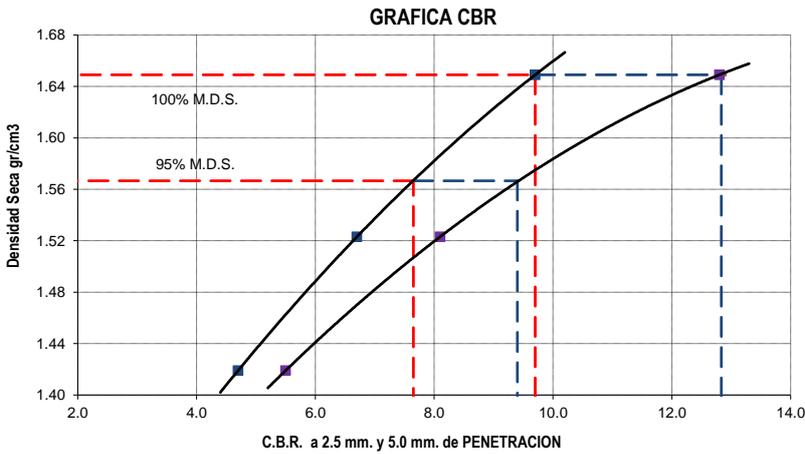
EQUIPO DE CBR

NOMBRE DE EQUIPO : PRENSA DIGITAL DE CBR
 MARCA / MODELO : SOILTEST (USA)
 FACTOR DE CELDA : X + 0
 AREA DEL PISTON : 3.0 Pulg² ó 19.35cm²

**ASTM D 1883
MTC E 132** **CBR DE SUELOS - LABORATORIO (RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA)**

CARACTERISTICAS FISICAS DE MUESTRA				EXPANSION						
Pasante Tamiz 2"	100.0%	Clasif. SUCS	ML	Horas	Lec. Pulg	Expansion	Lec. Pulg	Expansion	Lec. Pulg	Expansion
Pasante Tamiz 3/4"	100.0%	Clasif. AASTHO	A-4 (6)	00:00:00	0.118	0.000	0.160	0.000	0.171	0.000
Pasante Tamiz 3/8"	100.0%	Metodo utilizado	A	24:00:00	0.130	0.273	0.178	0.385	0.194	0.508
Pasante Tamiz N°4	100.0%	Maxima densidad seca (gr/cm ³)	1.649	48:00:00	0.143	0.546	0.195	0.770	0.217	1.016
Limite Liquido (%)	40	Optimo contenido humedad (%)	18.0	72:00:00	0.155	0.819	0.213	1.155	0.241	1.523
Indice Plastico (%)	9	Expansion (%)	1.09	96:00:00	0.168	1.092	0.230	1.540	0.264	2.031

CBR	0.1" PENETRACION	0.2" PENETRACION
100%	9.7	12.8
95%	7.7	9.4



COMENTARIO:

- Capacidad de celda de prensa CBR: 10000 lb.

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
 - Ensayo efectuado al suelo natural.

Fecha de emisión : Lima, 16 de Diciembre del 2020

Tec: J.N.C
 Rev: J.M.C

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : Luis E. Cáceres Crispín
 DIRECCIÓN : Av. Gerardo Unger 6342
 PROYECTO : Análisis del comportamiento mecánico de suelos blandos con ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente

EXPEDIENTE : 0251-2020/LAB_MAPID
 FECHA DE RECEPCIÓN : jueves, 29 de Octubre de 2020
 UBICACIÓN : Lima

REFERENCIA DE LA MUESTRA

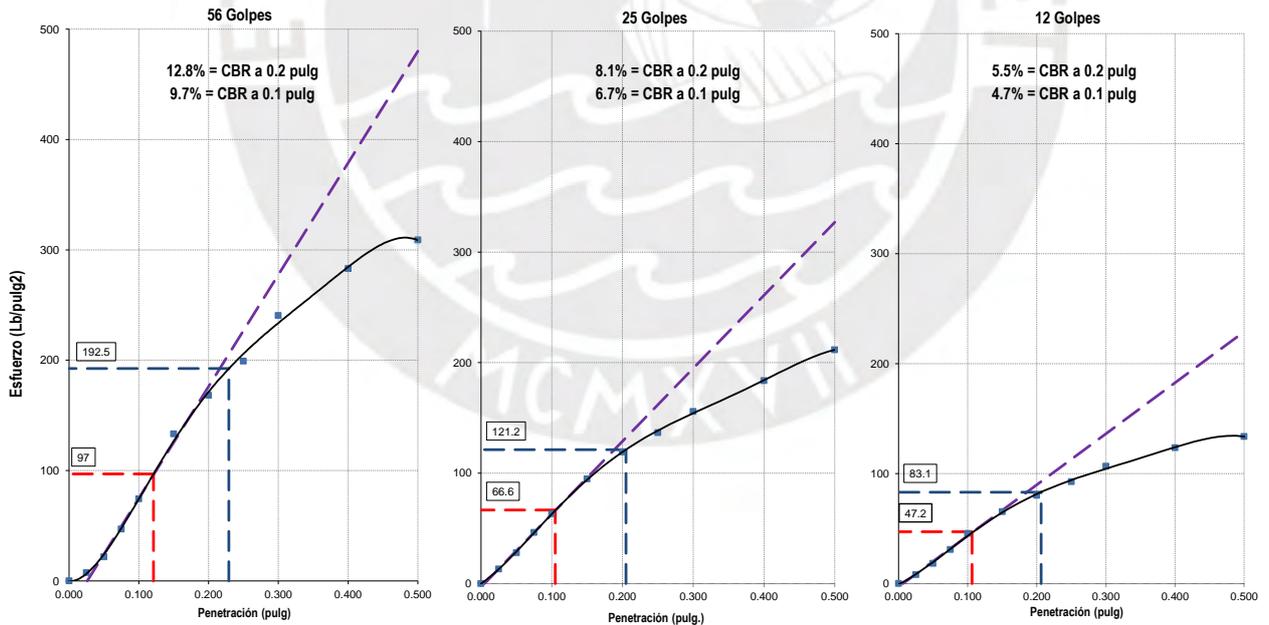
IDENTIFICACIÓN : Calicata C-01
 DESCRIPCIÓN : Muestra M-04
 PRESENTACIÓN : 04 Bolsa de polietileno
 CANTIDAD : 240 kg aprox.

EQUIPO DE CBR

NOMBRE DE EQUIPO : PRENSA DIGITAL DE CBR
 MARCA / MODELO : SOILTEST (USA)
 FACTOR DE CELDA : X + 0
 AREA DEL PISTON : 3.0 Pulg2 ó 19.35cm2

**ASTM D 1883
MTC E 132** **CBR DE SUELOS - LABORATORIO (RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA)**

DESCRIPCION	COMPACTACION DE ESPECIMENES						PENETRACION DE ESPECIMENES						
	M-23		M-48		M-12		Molde Nº	M-23		M-48		M-12	
Condicion de la Muestra:	Seca	Saturada	Seca	Saturada	Seca	Saturada	Penetra. (pulg)	Lec. Dial Lb	Carga Lb/pulg2	Lec. Dial Lb	Carga Lb/pulg2	Lec. Dial Lb	Carga Lb/pulg2
Nº Golpes por Capa	56 (5 Capas)		25 (5 Capas)		12 (5 Capas)		0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Peso Molde + Suelo Humedo	gr	8952	9190	8519	8943	8179	0.025	22.1	7.4	39.7	13.2	24.3	8.1
Peso del Molde	gr	4823	4823	4648	4648	4669	0.050	65.4	21.8	83.8	27.9	55.1	18.4
Peso del Suelo Humedo	gr	4129	4367	3871	4295	3510	0.075	140.9	47.0	138.9	46.3	92.6	30.9
Volumen del Molde	cm ³	2123.1	2123.1	2151.1	2151.1	2123.1	0.100	223.2	74.4	189.6	63.2	136.7	45.6
Densidad Humeda	gr/cm ³	1.945	2.057	1.800	1.997	1.653	0.150	399.8	133.3	284.4	94.8	196.2	65.4
Densidad Seca	gr/cm ³	1.649	1.663	1.523	1.547	1.395	0.200	504.2	168.1	357.1	119.0	240.3	80.1
Tarro Nº		90	--	7	--	53	0.250	597.5	199.2	410.1	136.7	277.8	92.6
Tarro + Suelo Humedo	gr	396.5	--	508.7	--	389.7	0.300	721.5	240.5	467.4	155.8	319.7	106.6
Tarro + Suelo Seco	gr	348.7	--	443.1	--	342.7	0.400	848.8	282.9	551.2	183.7	370.4	123.5
Peso del Tarro	gr	82.2	--	81.7	--	88.7	0.500	926.9	309.0	634.9	211.6	401.2	133.7
Contenido de Humedad	%	17.9	23.7	18.2	29.1	18.5							



COMENTARIO:

- Capacidad de celda de prensa CBR: 10000 lb.

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
 - Ensayo efectuado al suelo natural.

Fecha de emisión : Lima, 16 de Diciembre del 2020

Tec: J.N.C
 Rev: J.M.C

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : Luis E. Cáceres Crispin
 DIRECCIÓN : Av. Gerardo Unger 6342
 PROYECTO : Análisis del comportamiento mecánico de suelos blandos con ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente

EXPEDIENTE : 0251-2020/LAB_MAPID
 FECHA RECEPCIÓN : Lima, 29 de Octubre del 2020
 UBICACIÓN : Lima

REFERENCIAS DE LA MUESTRA

IDENTIFICACIÓN : Calicata C-01
 DESCRIPCIÓN : Muestra M-04

PRESENTACIÓN : 4 Bolsa de Polietileno
 CANTIDAD : 240 kg. aprox.

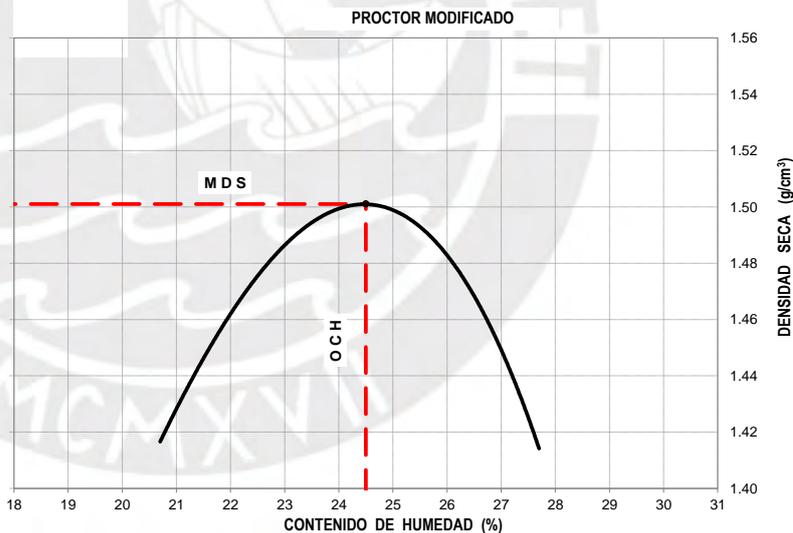
ASTM D 1557 MTC E 115	PROCTOR MODIFICADO
----------------------------------	---------------------------

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	ENSAYO							
			E-1		E-2		E-3		E-4	
1	Peso Suelo Humedo + Molde	gr	3592		3678		3718		3678	
2	Peso del Molde	gr	1961		1961		1961		1961	
3	Peso Suelo Humedo	gr	1631		1717		1757		1717	
4	Volumen del Molde	cm ³	937.4		937.4		937.4		937.4	
5	Densidad Suelo Humedo	gr/cm ³	1.740		1.832		1.874		1.832	
6	Tarro N°	-	140	509	454	591	456	475	256	421
7	Peso Suelo Humedo + Tarro	gr	571.4	515.8	448.6	485.8	737.7	495.7	733.8	675.4
8	Peso Suelo Seco + Tarro	gr	488.2	445.2	372.1	406.8	611.0	415.7	606.8	545.9
9	Peso del Tarro	gr	91.3	113.3	37.1	68.6	108.7	94.7	136.2	73.4
10	Peso del Agua	gr	83.2	70.6	76.5	79.0	126.7	80.0	127.0	129.5
11	Peso Suelo Seco	gr	396.9	331.9	335.0	338.2	502.3	321.0	470.6	472.5
12	Contenido de Humedad	%	21.0	21.3	22.8	23.4	25.2	24.9	27.0	27.4
13	Promedio de Humedad	%	21.2		23.1		25.1		27.2	
14	Densidad del Suelo Seco	gr/cm ³	1.436		1.488		1.498		1.440	

DATOS DESARROLLO DE ENSAYO	
Altura de caída del pisón :	45.7 cm
Peso del Pisón	4.5 Kg
Volumen del Molde	937.4 cm ³
N° de Capas	5
Energía de Compactación Modificada	27.4 kg-cm/cm ³
Número de Golpes / Capa	25

GRADACION DE MUESTRA		
Serie Americana	Ret. Parc. (%)	Pasa (%)
3"	0.0	100.0
2"	0.0	100.0
3/4"	0.0	100.0
3/8"	0.0	100.0
N°4	0.0	100.0
<N°4	100.0	0.0

RESULTADO	
MÉTODO	A
MDS	1.501 gr/cm ³
OCH	24.5 %



DATO:

- M.D.S. =Maxima Densidad Seca; O.C.H. = Optimo Contenido de Humedad.

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- Ensayo efectuado al suelo natural + Ceniza de cáscara de arroz (3%)

Fecha de emisión : Lima, 21 de Diciembre del 2020

Tec.: J.N.C
 Rev.: J.M.C

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : Luis E. Cáceres Crispín
 DIRECCIÓN : Av. Gerardo Unger 6342
 PROYECTO : Análisis del comportamiento mecánico de suelos blandos con ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente

EXPEDIENTE : 0251-2020/LAB_MAPID
 FECHA DE RECEPCIÓN : jueves, 29 de Octubre de 2020
 UBICACIÓN : Lima

REFERENCIA DE LA MUESTRA

IDENTIFICACIÓN : Calicata C-01
 DESCRIPCIÓN : Muestra M-04
 PRESENTACIÓN : 04 Bolsa de polietileno
 CANTIDAD : 240 kg aprox.

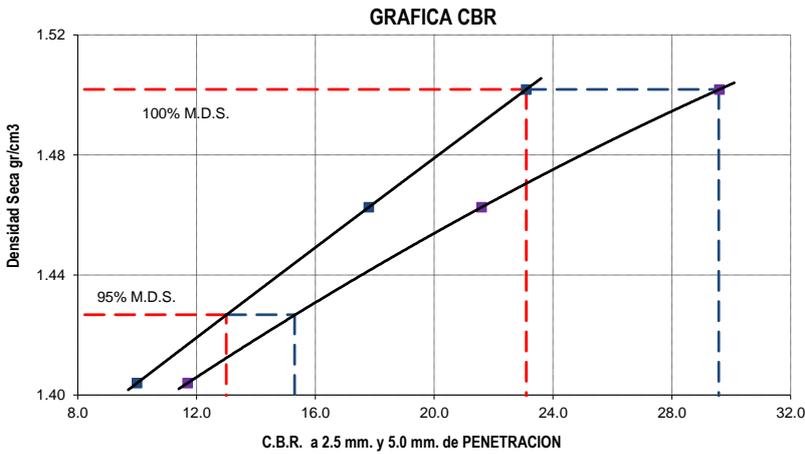
EQUIPO DE CBR

NOMBRE DE EQUIPO : PRENSA DIGITAL DE CBR
 MARCA / MODELO : SOILTEST (USA)
 FACTOR DE CELDA : X + 0
 AREA DEL PISTON : 3.0 Pulg² ó 19.35cm²

**ASTM D 1883
MTC E 132** **CBR DE SUELOS - LABORATORIO (RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA)**

CARACTERISTICAS FISICAS DE MUESTRA				EXPANSION						
Pasante Tamiz 2"	100.0%	Clasif. SUCS		Horas	Lec. Pulg	Expansion	Lec. Pulg	Expansion	Lec. Pulg	Expansion
Pasante Tamiz 3/4"	100.0%	Clasif. AASTHO		00:00:00	0.081	0.000	0.180	0.000	0.105	0.000
Pasante Tamiz 3/8"	100.0%	Metodo utilizado	A	24:00:00	0.093	0.252	0.196	0.346	0.126	0.457
Pasante Tamiz N°4	100.0%	Maxima densidad seca (gr/cm ³)	1.502	48:00:00	0.104	0.505	0.212	0.692	0.147	0.914
Limite Líquido (%)	NP	Optimo contenido humedad (%)	24.5	72:00:00	0.116	0.757	0.227	1.038	0.168	1.371
Indice Plastico (%)	NP	Expansion (%)	1.01	96:00:00	0.127	1.010	0.243	1.384	0.188	1.828

CBR	0.1" PENETRACION	0.2" PENETRACION
100%	23.1	29.6
95%	13.0	15.3



COMENTARIO:

- Capacidad de celda de prensa CBR: 10000 lb.

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
 - Ensayo efectuado al suelo natural + Ceniza de cáscara de arroz (3%)

Fecha de emisión : Lima, 21 de Diciembre del 2020

Tec: J.N.C
 Rev: J.M.C

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : Luis E. Cáceres Crispín
 DIRECCIÓN : Av. Gerardo Unger 6342
 PROYECTO : Análisis del comportamiento mecánico de suelos blandos con ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente

EXPEDIENTE : 0251-2020/LAB_MAPID
 FECHA DE RECEPCIÓN : jueves, 29 de Octubre de 2020
 UBICACIÓN : Lima

REFERENCIA DE LA MUESTRA

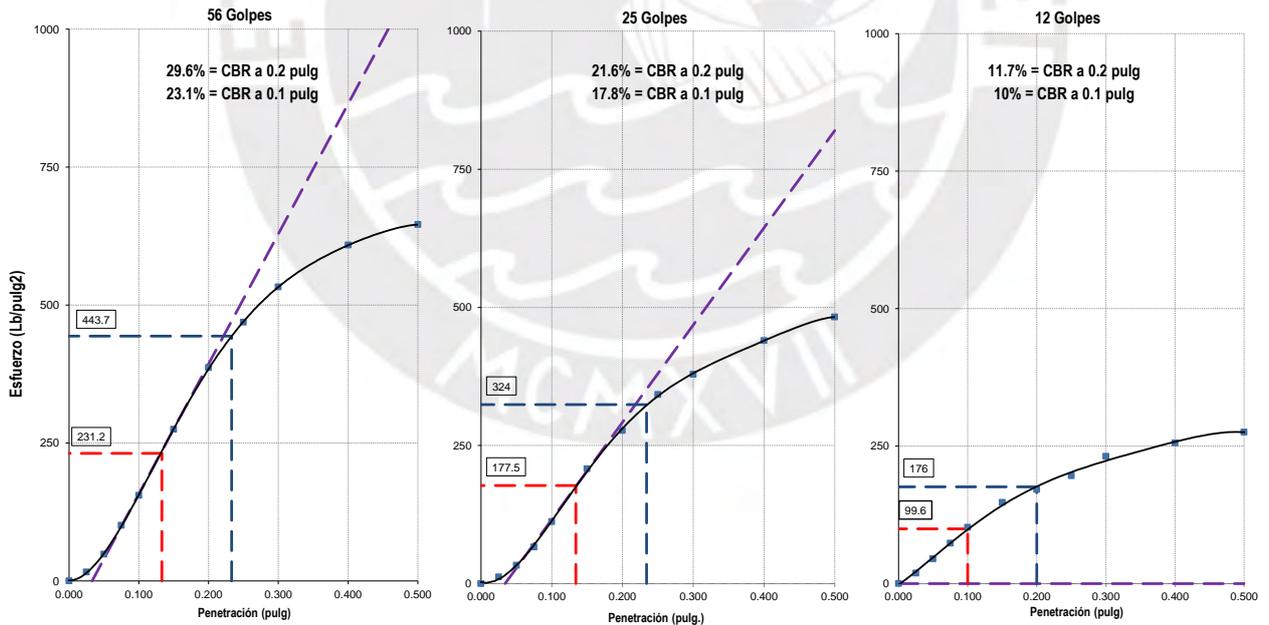
IDENTIFICACIÓN : Calicata C-01
 DESCRIPCIÓN : Muestra M-04
 PRESENTACIÓN : 04 Bolsa de polietileno
 CANTIDAD : 240 kg aprox.

EQUIPO DE CBR

NOMBRE DE EQUIPO : PRENSA DIGITAL DE CBR
 MARCA / MODELO : SOILTEST (USA)
 FACTOR DE CELDA : X + 0
 AREA DEL PISTON : 3.0 Pulg2 ó 19.35cm2

**ASTM D 1883
MTC E 132** **CBR DE SUELOS - LABORATORIO (RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA)**

DESCRIPCION	COMPACTACION DE ESPECIMENES						PENETRACION DE ESPECIMENES						
	M-46		M-32		M-5		Molde N°	M-46		M-32		M-5	
Condicion de la Muestra:	Seca	Saturada	Seca	Saturada	Seca	Saturada	Penetra. (pulg)	Lec. Dial Lb	Carga Lb/pulg2	Lec. Dial Lb	Carga Lb/pulg2	Lec. Dial Lb	Carga Lb/pulg2
N° Golpes por Capa	56 (5 Capas)		25 (5 Capas)		12 (5 Capas)								
Peso Molde + Suelo Humedo	gr	8814	8661	8178	7979	8379	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Peso del Molde	gr	4762	4762	4294	4294	4676	0.025	48.5	16.2	36.2	12.1	57.3	19.1
Peso del Suelo Humedo	gr	4052	3899	3884	3685	3703	0.050	145.5	48.5	99.4	33.1	134.5	44.8
Volumen del Molde	cm ³	2169.5	2169.5	2132.7	2132.7	2123.1	0.075	302.0	100.7	198.9	66.3	220.5	73.5
Densidad Humeda	gr/cm ³	1.868	1.797	1.821	1.728	1.744	0.100	465.2	155.1	336.2	112.1	306.4	102.1
Densidad Seca	gr/cm ³	1.502	1.490	1.463	1.447	1.404	0.150	824.5	274.8	623.7	207.9	443.1	147.7
Tarro N°		310	--	6	--	19	0.200	1159.6	386.5	831.6	277.2	513.7	171.2
Tarro + Suelo Humedo	gr	376.9	--	388.6	--	462.2	0.250	1406.5	468.8	1026.8	342.3	588.6	196.2
Tarro + Suelo Seco	gr	317.9	--	328.0	--	387.0	0.300	1598.3	532.8	1137.1	379.0	694.4	231.5
Peso del Tarro	gr	75.7	--	80.8	--	76.6	0.400	1825.4	608.5	1319.7	439.9	767.2	255.7
Contenido de Humedad	%	24.4	20.6	24.5	19.4	24.2	0.500	1937.8	645.9	1448.0	482.7	826.7	275.6



COMENTARIO:

- Capacidad de celda de prensa CBR: 10000 lb.

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- Ensayo efectuado al suelo natural + Ceniza de cáscara de arroz (3%)

Fecha de emisión : Lima, 21 de Diciembre del 2020

Tec: J.N.C
 Rev: J.M.C

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : Luis E. Cáceres Crispín
 DIRECCIÓN : Av. Gerardo Unger 6342
 PROYECTO : Análisis del comportamiento mecánico de suelos blandos con ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente

EXPEDIENTE : 0251-2020/LAB_MAPID
 FECHA RECEPCIÓN : Lima, 29 de Octubre del 2020
 UBICACIÓN : Lima

REFERENCIAS DE LA MUESTRA

IDENTIFICACIÓN : Calicata C-01
 DESCRIPCIÓN : Muestra M-04

PRESENTACIÓN : 4 Bolsa de Polietileno
 CANTIDAD : 240 kg. aprox.

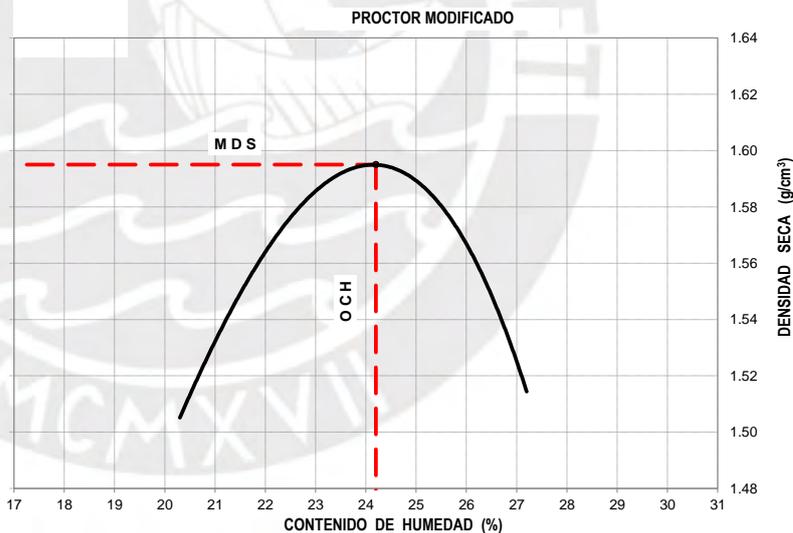
ASTM D 1557 MTC E 115	PROCTOR MODIFICADO
----------------------------------	---------------------------

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	ENSAYO							
			E-1		E-2		E-3		E-4	
1	Peso Suelo Humedo + Molde	gr	3688		3775		3823		3790	
2	Peso del Molde	gr	1961		1961		1961		1961	
3	Peso Suelo Humedo	gr	1727		1814		1862		1829	
4	Volumen del Molde	cm ³	937.4		937.4		937.4		937.4	
5	Densidad Suelo Humedo	gr/cm ³	1.842		1.935		1.986		1.951	
6	Tarro N°	-	206	238	24	486	179	403	532	124
7	Peso Suelo Humedo + Tarro	gr	612.5	548.9	716.7	467.1	625.3	650.4	600.9	701.6
8	Peso Suelo Seco + Tarro	gr	517.4	467.1	605.6	391.5	514.3	535.0	486.2	566.5
9	Peso del Tarro	gr	64.0	67.5	107.8	61.3	65.4	67.8	54.9	59.6
10	Peso del Agua	gr	95.1	81.8	111.1	75.6	111.0	115.4	114.7	135.1
11	Peso Suelo Seco	gr	453.4	399.6	497.8	330.2	448.9	467.2	431.3	506.9
12	Contenido de Humedad	%	21.0	20.5	22.3	22.9	24.7	24.7	26.6	26.7
13	Promedio de Humedad	%	20.8		22.6		24.7		26.7	
14	Densidad del Suelo Seco	gr/cm ³	1.525		1.578		1.593		1.540	

DATOS DESARROLLO DE ENSAYO	
Altura de caída del pisón :	45.7 cm
Peso del Pisón	4.5 Kg
Volumen del Molde	937.4 cm ³
N° de Capas	5
Energía de Compactación Modificada	27.4 kg-cm/cm ³
Número de Golpes / Capa	25

GRADACION DE MUESTRA		
Serie Americana	Ret. Parc. (%)	Pasa (%)
3"	0.0	100.0
2"	0.0	100.0
3/4"	0.0	100.0
3/8"	0.0	100.0
N°4	0.0	100.0
<N°4	100.0	0.0

RESULTADO	
MÉTODO	A
MDS	1.595 gr/cm ³
OCH	24.2 %



DATO:

- M.D.S. =Maxima Densidad Seca; O.C.H. = Optimo Contenido de Humedad.

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- Ensayo efectuado al suelo natural + Cal (1%) + Ceniza de cáscara de arroz (3%)

Fecha de emisión : Lima, 21 de Diciembre del 2020

Tec.: J.N.C
 Rev.: J.M.C

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : Luis E. Cáceres Crispín
 DIRECCIÓN : Av. Gerardo Unger 6342
 PROYECTO : Análisis del comportamiento mecánico de suelos blandos con ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente

EXPEDIENTE : 0251-2020/LAB_MAPID
 FECHA DE RECEPCIÓN : jueves, 29 de Octubre de 2020
 UBICACIÓN : Lima

REFERENCIA DE LA MUESTRA

IDENTIFICACIÓN : Calicata C-01
 DESCRIPCIÓN : Muestra M-04
 PRESENTACIÓN : 04 Bolsa de polietileno
 CANTIDAD : 240 kg aprox.

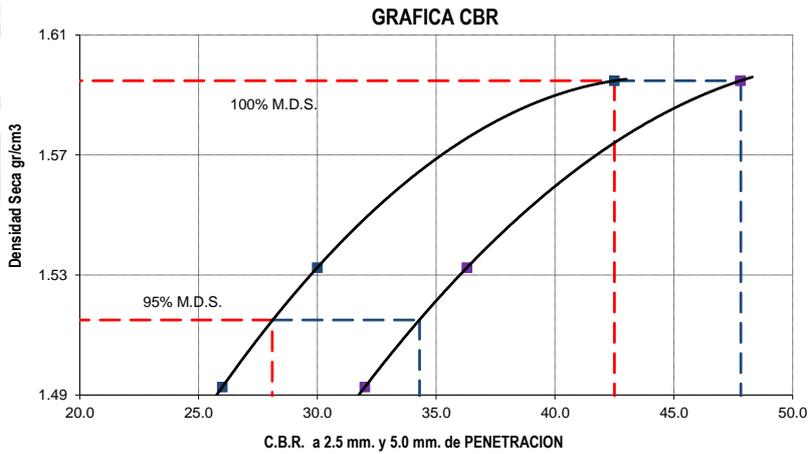
EQUIPO DE CBR

NOMBRE DE EQUIPO : PRENSA DIGITAL DE CBR
 MARCA / MODELO : SOILTEST (USA)
 FACTOR DE CELDA : X + 0
 AREA DEL PISTON : 3.0 Pulg² ó 19.35cm²

ASTM D 1883 MTC E 132	CBR DE SUELOS - LABORATORIO (RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA)
----------------------------------	---

CARACTERISTICAS FISICAS DE MUESTRA				EXPANSION						
Pasante Tamiz 2"	100.0%	Clasif. SUCS		Horas	Lec. Pulg	Expansion	Lec. Pulg	Expansion	Lec. Pulg	Expansion
Pasante Tamiz 3/4"	100.0%	Clasif. AASTHO		00:00:00	0.168	0.000	0.117	0.000	0.110	0.000
Pasante Tamiz 3/8"	100.0%	Metodo utilizado	A	24:00:00	0.179	0.232	0.133	0.348	0.127	0.381
Pasante Tamiz N°4	100.0%	Maxima densidad seca (gr/cm ³)	1.595	48:00:00	0.189	0.464	0.149	0.697	0.145	0.762
Limite Líquido (%)	NP	Optimo contenido humedad (%)	24.2	72:00:00	0.200	0.697	0.165	1.045	0.162	1.142
Indice Plastico (%)	NP	Expansion (%)	0.93	96:00:00	0.210	0.929	0.181	1.393	0.180	1.523

CBR	0.1" PENETRACION	0.2" PENETRACION
100%	42.5	47.8
95%	28.1	34.3



COMENTARIO:

- Capacidad de celda de prensa CBR: 10000 lb.

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
 - Ensayo efectuado al suelo natural + Cal (1%) + Ceniza de cáscara de arroz (3%)

Fecha de emisión : Lima, 21 de Diciembre del 2020

Tec: J.N.C
 Rev.: J.M.C

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : Luis E. Cáceres Crispín
 DIRECCIÓN : Av. Gerardo Unger 6342
 PROYECTO : Análisis del comportamiento mecánico de suelos blandos con ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente

EXPEDIENTE : 0251-2020/LAB_MAPID
 FECHA DE RECEPCIÓN : jueves, 29 de Octubre de 2020
 UBICACIÓN : Lima

REFERENCIA DE LA MUESTRA

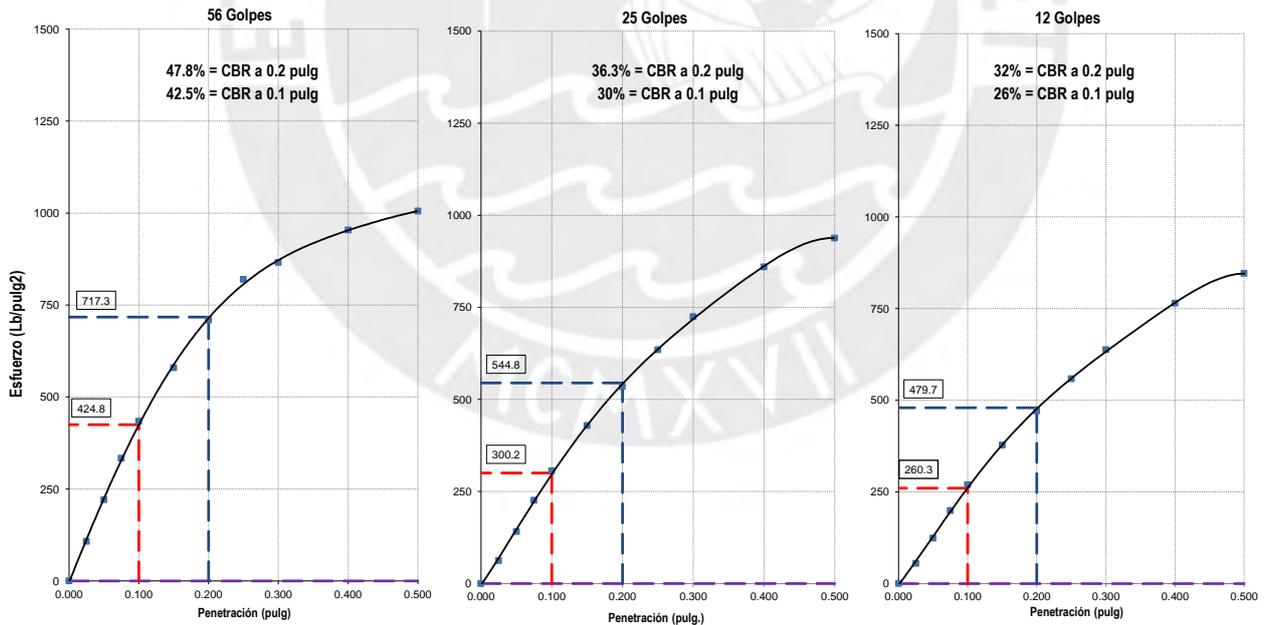
IDENTIFICACIÓN : Calicata C-01
 DESCRIPCIÓN : Muestra M-04
 PRESENTACIÓN : 04 Bolsa de polietileno
 CANTIDAD : 240 kg aprox.

EQUIPO DE CBR

NOMBRE DE EQUIPO : PRENSA DIGITAL DE CBR
 MARCA / MODELO : SOILTEST (USA)
 FACTOR DE CELDA : X + 0
 AREA DEL PISTON : 3.0 Pulg2 ó 19.35cm2

ASTM D 1883 MTC E 132	CBR DE SUELOS - LABORATORIO (RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA)
----------------------------------	---

DESCRIPCION	COMPACTACION DE ESPECIMENES						PENETRACION DE ESPECIMENES						
	M-5		M-21		M-48		Molde N°	M-5		M-21		M-48	
Condicion de la Muestra:	Seca	Saturada	Seca	Saturada	Seca	Saturada	Penetra. (pulg)	Lec. Dial Lb	Carga Lb/pulg2	Lec. Dial Lb	Carga Lb/pulg2	Lec. Dial Lb	Carga Lb/pulg2
N° Golpes por Capa	56 (5 Capas)		25 (5 Capas)		12 (5 Capas)		0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Peso Molde + Suelo Humedo	gr	8885	9048	8209	8487	8626	0.025	321.9	107.3	187.4	62.5	164.9	55.0
Peso del Molde	gr	4676	4676	4174	4174	4648	0.050	661.4	220.5	423.3	141.1	372.5	124.2
Peso del Suelo Humedo	gr	4209	4372	4035	4313	3978	0.075	998.7	332.9	679.0	226.3	597.5	199.2
Volumen del Molde	cm ³	2123.1	2123.1	2123.1	2123.1	2151.1	0.100	1300.7	433.6	919.3	306.4	809.0	269.7
Densidad Humeda	gr/cm ³	1.982	2.059	1.901	2.031	1.849	0.150	1737.2	579.1	1287.5	429.2	1133.0	377.7
Densidad Seca	gr/cm ³	1.595	1.606	1.533	1.552	1.493	0.200	2127.4	709.1	1604.9	535.0	1412.4	470.8
Tarro N°		150	--	262	--	112	0.250	2458.1	819.4	1904.8	634.9	1676.2	558.7
Tarro + Suelo Humedo	gr	409.3	--	448.2	--	408.2	0.300	2597.0	865.7	2173.7	724.6	1912.9	637.6
Tarro + Suelo Seco	gr	344.7	--	377.0	--	345.8	0.400	2861.6	953.9	2579.4	859.8	2293.1	764.4
Peso del Tarro	gr	79	--	80.5	--	84.6	0.500	3015.9	1005.3	2815.3	938.4	2537.6	845.9
Contenido de Humedad	%	24.3	28.2	24.0	30.9	23.9							



COMENTARIO:

- Capacidad de celda de prensa CBR: 10000 lb.

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- Ensayo efectuado al suelo natural + Cal (1%) + Ceniza de cáscara de arroz (3%)

Fecha de emisión : Lima, 21 de Diciembre del 2020

Tec: J.N.C
 Rev: J.M.C

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : Luis E. Cáceres Crispin
 DIRECCIÓN : Av. Gerardo Unger 6342
 PROYECTO : Análisis del comportamiento mecánico de suelos blandos con ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente

EXPEDIENTE : 0251-2020/LAB_MAPID
 FECHA RECEPCIÓN : Lima, 29 de Octubre del 2020
 UBICACIÓN : Lima

REFERENCIAS DE LA MUESTRA

IDENTIFICACIÓN : Calicata C-01
 DESCRIPCIÓN : Muestra M-04

PRESENTACIÓN : 4 Bolsa de Polietileno
 CANTIDAD : 240 kg. aprox.

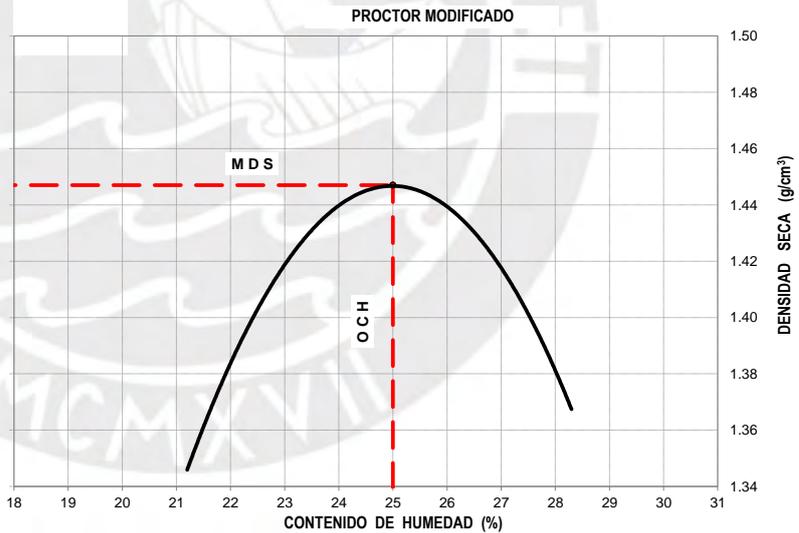
ASTM D 1557 MTC E 115	PROCTOR MODIFICADO
----------------------------------	---------------------------

ITEM	DESCRIPCION	UNIDAD	ENSAYO							
			E-1		E-2		E-3		E-4	
1	Peso Suelo Humedo + Molde	gr	3525		3625		3661		3626	
2	Peso del Molde	gr	1961		1961		1961		1961	
3	Peso Suelo Humedo	gr	1564		1664		1700		1665	
4	Volumen del Molde	cm ³	937.4		937.4		937.4		937.4	
5	Densidad Suelo Humedo	gr/cm ³	1.668		1.775		1.814		1.776	
6	Tarro N°	-	97	39	555	94	30	441	479	250
7	Peso Suelo Humedo + Tarro	gr	453.5	600.5	558.8	669.5	567.2	662.2	641.8	765.8
8	Peso Suelo Seco + Tarro	gr	382.0	506.4	477.9	562.9	468.7	540.8	531.9	628.8
9	Peso del Tarro	gr	54.2	68.9	139.4	108.9	88.9	62.2	136.0	133.7
10	Peso del Agua	gr	71.5	94.1	80.9	106.6	98.5	121.4	109.9	137.0
11	Peso Suelo Seco	gr	327.8	437.5	338.5	454.0	379.8	478.6	395.9	495.1
12	Contenido de Humedad	%	21.8	21.5	23.9	23.5	25.9	25.4	27.8	27.7
13	Promedio de Humedad	%	21.7		23.7		25.7		27.8	
14	Densidad del Suelo Seco	gr/cm ³	1.371		1.435		1.443		1.390	

DATOS DESARROLLO DE ENSAYO	
Altura de caída del pisón :	45.7 cm
Peso del Pisón	4.5 Kg
Volumen del Molde	937.4 cm ³
N° de Capas	5
Energía de Compactación Modificada	27.4 kg-cm/cm ³
Número de Golpes / Capa	25

GRADACION DE MUESTRA		
Serie Americana	Ret. Parc. (%)	Pasa (%)
3"	0.0	100.0
2"	0.0	100.0
3/4"	0.0	100.0
3/8"	0.0	100.0
N°4	0.0	100.0
<N°4	100.0	0.0

RESULTADO	
MÉTODO	A
MDS	1.447 gr/cm ³
OCH	25.0 %



DATO:

- M.D.S. =Máxima Densidad Seca; O.C.H. = Óptimo Contenido de Humedad.

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- Ensayo efectuado al suelo natural + Cal (3%) + Ceniza de cáscara de arroz (6%)

Fecha de emisión : Lima, 21 de Diciembre del 2020

Tec.: J.N.C
 Rev.: J.M.C

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : Luis E. Cáceres Crispín
 DIRECCIÓN : Av. Gerardo Unger 6342
 PROYECTO : Análisis del comportamiento mecánico de suelos blandos con ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente

EXPEDIENTE : 0251-2020/LAB_MAPID
 FECHA DE RECEPCIÓN : jueves, 29 de Octubre de 2020
 UBICACIÓN : Lima

REFERENCIA DE LA MUESTRA

IDENTIFICACIÓN : Calicata C-01
 DESCRIPCIÓN : Muestra M-04
 PRESENTACIÓN : 04 Bolsa de polietileno
 CANTIDAD : 240 kg aprox.

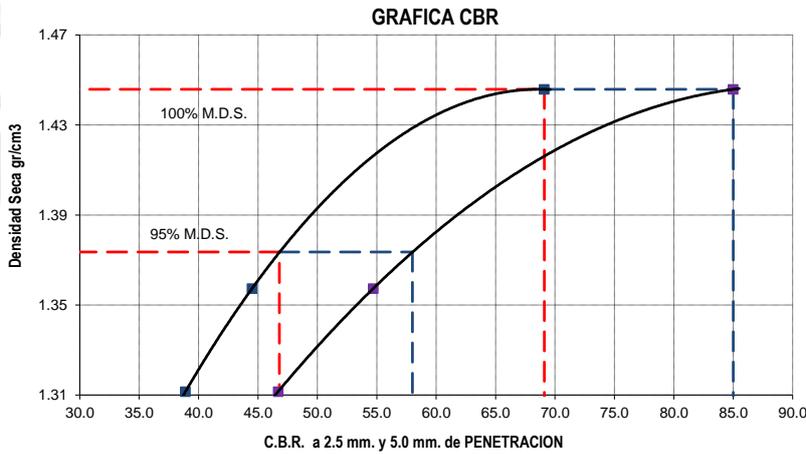
EQUIPO DE CBR

NOMBRE DE EQUIPO : PRENSA DIGITAL DE CBR
 MARCA / MODELO : SOILTEST (USA)
 FACTOR DE CELDA : X + 0
 AREA DEL PISTON : 3.0 Pulg² ó 19.35cm²

ASTM D 1883 MTC E 132	CBR DE SUELOS - LABORATORIO (RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA)
--------------------------	---

CARACTERISTICAS FISICAS DE MUESTRA				EXPANSION						
Pasante Tamiz 2"	100.0%	Clasif. SUCS		Horas	Lec. Pulg	Expansion	Lec. Pulg	Expansion	Lec. Pulg	Expansion
Pasante Tamiz 3/4"	100.0%	Clasif. AASTHO		00:00:00	0.154	0.000	0.036	0.000	0.185	0.000
Pasante Tamiz 3/8"	100.0%	Metodo utilizado	A	24:00:00	0.163	0.205	0.049	0.283	0.201	0.355
Pasante Tamiz N°4	100.0%	Maxima densidad seca (gr/cm ³)	1.446	48:00:00	0.173	0.410	0.062	0.566	0.217	0.710
Limite Líquido (%)	NP	Optimo contenido humedad (%)	25.0	72:00:00	0.182	0.616	0.075	0.850	0.234	1.065
Indice Plastico (%)	NP	Expansion (%)	0.82	96:00:00	0.191	0.821	0.088	1.133	0.250	1.420

CBR	0.1" PENETRACION	0.2" PENETRACION
100%	69.1	85
95%	46.8	58.0



COMENTARIO:

- Capacidad de celda de prensa CBR: 10000 lb.

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
 - Ensayo efectuado al suelo natural + Cal (3%) + Ceniza de cáscara de arroz (6%)

Fecha de emisión : Lima, 21 de Diciembre del 2020

Tec: J.N.C
 Rev: J.M.C

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.

INFORME DE ENSAYO

SOLICITANTE : Luis E. Cáceres Crispín
 DIRECCIÓN : Av. Gerardo Unger 6342
 PROYECTO : Análisis del comportamiento mecánico de suelos blandos con ceniza de cáscara de arroz activada alcalinamente

EXPEDIENTE : 0251-2020/LAB_MAPID
 FECHA DE RECEPCIÓN : jueves, 29 de Octubre de 2020
 UBICACIÓN : Lima

REFERENCIA DE LA MUESTRA

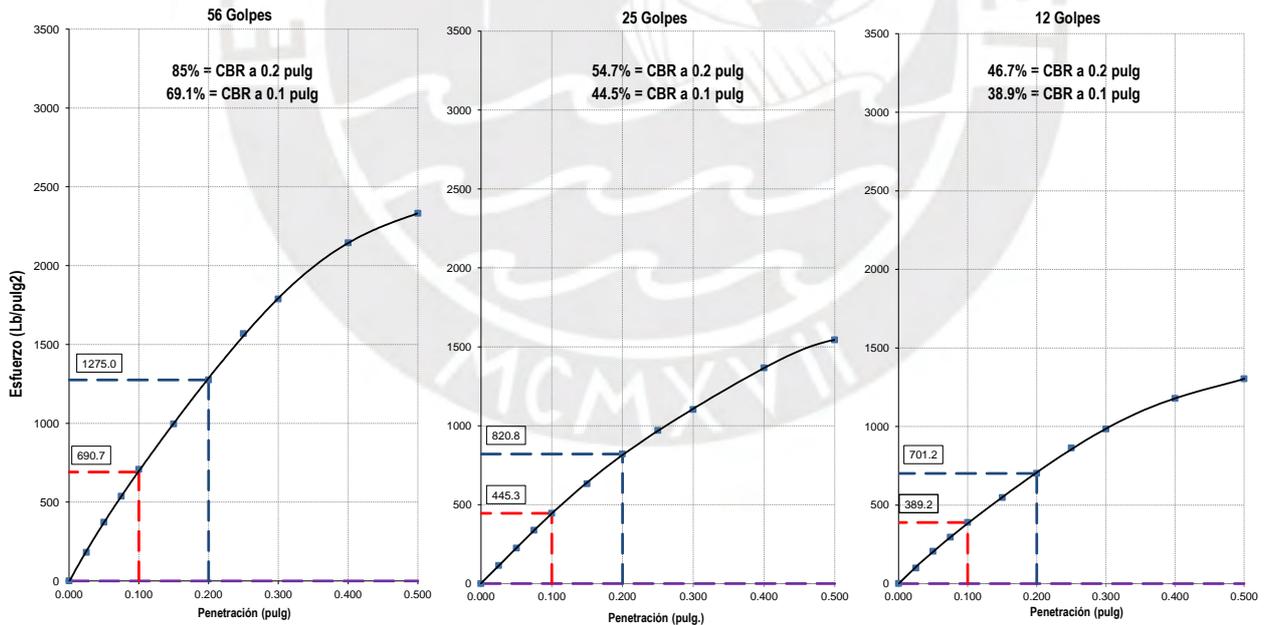
IDENTIFICACIÓN : Calicata C-01
 DESCRIPCIÓN : Muestra M-04
 PRESENTACIÓN : 04 Bolsa de polietileno
 CANTIDAD : 240 kg aprox.

EQUIPO DE CBR

NOMBRE DE EQUIPO : PRENSA DIGITAL DE CBR
 MARCA / MODELO : SOILTEST (USA)
 FACTOR DE CELDA : X + 0
 AREA DEL PISTON : 3.0 Pulg2 ó 19.35cm2

ASTM D 1883 MTC E 132	CBR DE SUELOS - LABORATORIO (RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA)
----------------------------------	---

DESCRIPCION	COMPACTACION DE ESPECIMENES						PENETRACION DE ESPECIMENES						
	M-21		M-13		M-33		Molde N°	M-21		M-13		M-33	
Condicion de la Muestra:	Seca	Saturada	Seca	Saturada	Seca	Saturada	Penetra. (pulg)	Lec. Dial Lb	Carga Lb/pulg2	Lec. Dial Lb	Carga Lb/pulg2	Lec. Dial Lb	Carga Lb/pulg2
N° Golpes por Capa	56 (5 Capas)		25 (5 Capas)		12 (5 Capas)								
Peso Molde + Suelo Humedo	gr	8014	8125	8372	8563	7729	0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Peso del Molde	gr	4174	4174	4801	4801	4244	0.025	540.1	180.0	343.9	114.6	297.1	99.0
Peso del Suelo Humedo	gr	3840	3951	3571	3762	3485	0.050	1115.5	371.8	674.6	224.9	613.5	204.5
Volumen del Molde	cm ³	2123.1	2123.1	2104.4	2104.4	2123.1	0.075	1611.6	537.2	1014.1	338.0	886.4	295.5
Densidad Humeda	gr/cm ³	1.809	1.861	1.697	1.788	1.641	0.100	2123.0	707.7	1336.0	445.3	1167.7	389.2
Densidad Seca	gr/cm ³	1.446	1.454	1.357	1.371	1.312	0.150	2985.0	995.0	1896.0	632.0	1641.8	547.3
Tarro N°		94	--	407	--	72	0.200	3825.0	1275.0	2462.5	820.8	2103.7	701.2
Tarro + Suelo Humedo	gr	385.7	--	422.6	--	505.8	0.250	4706.8	1568.9	2910.1	970.0	2588.8	862.9
Tarro + Suelo Seco	gr	325.3	--	355.8	--	419.8	0.300	5363.8	1787.9	3309.1	1103.0	2950.1	983.4
Peso del Tarro	gr	84.6	--	88.8	--	77.9	0.400	6430.8	2143.6	4100.6	1366.9	3537.0	1179.0
Contenido de Humedad	%	25.1	28.0	25.0	30.4	25.2	0.500	6995.2	2331.7	4631.9	1544.0	3908.0	1302.7



COMENTARIO:

- Capacidad de celda de prensa CBR: 10000 lb.

OBSERVACIONES:

- Muestra tomada e identificada por el solicitante.
- Ensayo efectuado al suelo natural + Cal (3%) + Ceniza de cáscara de arroz (6%)

Fecha de emisión : Lima, 21 de Diciembre del 2020

Tec: J.N.C
 Rev: J.M.C

El solicitante asume toda responsabilidad del uso de la información contenida en este documento.