

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON
CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO
SUBRASANTE MEJORADA**

TESIS

**Para Optar el Título Profesional de:
INGENIERO CIVIL**

CAROLINA ALEJANDRA PEREZ COLLANTES

Lima- Perú

2014

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

En primer lugar quiero dar infinitas Gracias a Dios por darme una vida llena de mucha felicidad por ser mi fuente inagotable de sabiduría, y la luz que alumbra mi camino.

A mi madre Eulalia Collantes, por ser quien me dio la vida y quien siempre se sintió muy orgullosa de mí, Gracias por apoyarme siempre y tener mucha fe en mí.

A mi Padre, Rigoberto Pérez, por ser siempre el pilar de la familia y estar allí siempre que lo he necesitado.

A mi hermana Rocío Pérez, quien es como mi segunda madre, gracias por guiarme en toda mi carrera y apoyarme siempre en todo.

A mis hermanos, Arturo, Rafael, Frank y mi sobrino Leonardo, quienes en todo momento han estado siempre pendientes de mí y me han dado ánimos para continuar adelante.

*Al amor de mi vida, Eliu Carbajal quien es el apoyo más grande que he tenido en la etapa final de mi tesis, quien siempre ha puesto sus esperanzas en mí y a quien debo este triunfo, Gracias amorcito por brindarme siempre tu apoyo,
Te amo...*

Y en especial, a mi hijito Rodrigo Carbajal Pérez, quien desde mi vientre estuvo siempre conmigo apoyándome durante la culminación de mi trabajo, por ti y para ti es todo lo que hago mi bebé, te amo y te quiero, con todo mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Sírvase estas primeras líneas para agradecer muy especialmente a mi asesor Wilfredo Gutiérrez Lazares, por haberme orientado en la selección de mi proyecto de tesis, y por su valiosa ayuda en el desarrollo del mismo, que como asesor supo indicarme el camino para su buena finalización. También deseo agradecer por estar siempre disponible, así como proporcionarme sus proyectos de investigación y amplia información bibliográfica que me han servido de base y guía en este proyecto.

Así mismo me es muy grato agradecer al Laboratorio N° 02 de Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería y a todo el personal técnico, por brindarme todas las facilidades para la realización de los ensayos de mi tesis.

También agradezco a la Facultad de Ingeniería Civil por permitirme culminar mis estudios y formarme académicamente como profesional y a cada uno de mis profesores por brindarme sus valiosos conocimientos en mi etapa universitaria.

INDICE

	Pág.
RESUMEN	4
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE GRÁFICOS	8
LISTA DE SÍMBOLOS	9
LISTA DE ABREVIATURAS	10
INTRODUCCIÓN	11
CAPITULO I ANTECEDENTES	13
1.1. OBJETIVO GENERAL	13
1.1.1. Objetivo específico	13
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	14
1.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	15
1.4. JUSTIFICACIÓN	15
1.5. ORGANIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	15
CAPITULO II MARCO TEÓRICO	17
2.1. TIPOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS	17
2.1.1. Estabilización Física y Mecánica	18
2.1.2. Estabilización Química	20
2.1.3. Estabilización Eléctrica	25
2.1.4. Estabilización Térmica	25
2.1.5. Otros	25
2.2. PAVIMENTO	26
2.2.1. Definición de Pavimento	26
2.2.2. Estructura del Pavimento	26
2.2.3. Definición de Sub-rasante	27

2.2.4. Propiedades de la Subrasante.....	27
2.2.5. Caracterización de la Subrasante.....	29
2.3. CENIZA VOLANTE.....	31
2.3.1. Definición.....	33
2.3.2. Característica de la Ceniza Volante.....	35
2.3.3. Propiedades de la Ceniza Volante.....	36
2.4. SUELO ARCILLOSO.....	38
CAPITULO III ENSAYOS DE LABORATORIO Y RESULTADOS.....	39
3.1. ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS AL SUELO ARCILLOSO Y A LA MEZCLA DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE.....	40
3.1.1. Ensayos estándar.....	40
3.1.2. Ensayos especiales.....	44
3.2. ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS AL SUELO Y CENIZA VOLANTE.....	45
3.3. ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS A LA CENIZA VOLANTE.....	46
3.3.1. Ensayos de Caracterización Química.....	46
3.3.2. Análisis de Materia Orgánica.....	47
3.4. MEZCLA DE SUELO ARCILLOSO Y CENIZA VOLANTE.....	47
3.5. RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO.....	48
3.5.1. Ensayos Estándar.....	48
3.5.2. Ensayo especiales.....	51
3.5.3. Ensayos de Caracterización Química.....	53
CAPITULO IV ANÁLISIS DE RESULTADO.....	58
4.1. ENSAYO ESTÁNDAR.....	58
4.1.1. Distribución granulométrica.....	58
4.1.2. Límites de Atterberg.....	58
4.1.3. Gravedad Específica de Sólidos.....	59

4.2. ENSAYOS ESPECIALES	60
4.2.1. Variación del Ensayo Próctor Modificado con el Contenido de Ceniza Volante	60
4.2.2. Ensayo CBR	61
4.3. DIMENSIONAMIENTO DE PAVIMENTO TÍPICO	62
CAPITULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	66
5.1 CONCLUSIONES	66
5.2 RECOMENDACIONES	67
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	68
ANEXOS	

RESUMEN

La presente tesis de investigación consistió en desarrollar un método alternativo para la estabilización de suelos arcillosos con ceniza volante de carbón y que puede ser utilizado en la construcción de la capa sub-rasante mejorada de pavimento.

La muestra de ceniza volante fue obtenida a partir de la quema de carbón proveniente de la planta termoeléctrica de Ilo-Perú, con la finalidad de evaluar su aplicabilidad en la sub-rasante con baja capacidad de soporte de los pavimentos en carreteras, mediante la mezcla de la ceniza volante con la arcilla de mediana plasticidad, característica de la selva central.

Se comprobó que la mezcla de la ceniza volante en proporción adecuada con un suelo arcilloso presenta una mayor resistencia en la mezcla final, a fin de que pueda ser considerada como capa de sub-rasante de un pavimento y cumpla con las especificaciones técnicas para tal fin.

Para esta investigación se realizaron diversos ensayos de laboratorio, entre los cuales podemos indicar los siguientes:

Para la arcilla: Se realizaron ensayos de caracterización física (Análisis granulométrico por tamizado y por hidrómetro, humedad, límites de Atterberg), ensayo Próctor Modificado, ensayo de capacidad de soporte C.B.R, límites de contracción, gravedad específica, materia orgánica y composición química.

Para la ceniza volante: Se realizaron ensayos de caracterización física (Análisis granulométrico por tamizado y por hidrómetro, humedad, límites de Atterberg), ensayo Próctor Modificado, límite de contracción, gravedad específica, materia orgánica y composición química. Así como ensayos de fluorescencia de rayos X de energía y dispersión, tanto en la ceniza como en la arcilla.

Estas pruebas se realizaron para el suelo arcilloso en su estado natural y en las mezclas de suelo arcilloso - ceniza volante en diferentes proporciones (20%, 40% y 100%).

La mezcla del suelo y las cenizas volantes presentó un comportamiento mecánico compatible con los requisitos de un pavimento de bajo volumen de tráfico.

Los resultados mostraron que la arcilla mejora su comportamiento y resistencia al ser adicionada una proporción de ceniza volante de 20%, para su empleo como capa de sub-rasante mejorada de pavimentos de alto volumen de tráfico o como un pavimento de bajo volumen de tráfico.

El empleo de esta ceniza volante minimiza los problemas de contaminación, al disminuir los vertederos y rellenos sanitarios para la ceniza volante, dando un fin aprovechable a la misma.

LISTA DE TABLAS

Tabla N°2.1 .- Número de calicatas para exploración de suelos	29
Tabla N°2.2 .- Carbones utilizados en la C.T. Ilo 21.....	31
Tabla N°3.1 .- Clasificación de suelos según tamaño de partículas	41
Tabla N°3.2 .- Clasificación de suelos según índice de plasticidad	43
Tabla N°3.3 .- Niveles de materia orgánica.....	47
Tabla N°3.4 .- Proporción de mezcla y símbolos referentes a cada material.....	48
Tabla N°3.5 .- Resultados de ensayos de análisis granulométrico por tamizado.	48
Tabla N°3.6 .- Resultados de ensayos de análisis granulométrico por sedimentación.....	49
Tabla N°3.7 .- Resultados de límites de consistencia e índice de plasticidad.....	50
Tabla N°3.8 .- Resultados de ensayos de clasificación SUCS	50
Tabla N°3.9 .- Resultados de ensayos de gravedad específica de sólidos.....	51
Tabla N°3.10.- Resultados de ensayos de compactación de materiales con suelo y ceniza volante.....	51
Tabla N°3.11.- Resultados de ensayos de compactación de materiales de estudio entre suelo arcilloso y ceniza volante.....	52
Tabla N°3.12.- Resultados de ensayos de compactación de materiales de este estudio entre suelo arcilloso y ceniza volante	52
Tabla N°3.13.- Elementos químicos presentes en la arcilla	53
Tabla N°3.14.- Elementos químicos presentes en la ceniza volante	53
Tabla N°3.15.- Elementos químicos presentes en ceniza volante determinados en la central termoeléctrica de Ilo 21	54
Tabla N°3.16.- Niveles de materia orgánica.....	57
Tabla N°4.1 .- Resultados de espesores de pavimento con diferentes contenidos de ceniza	65

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 2.1 .- Tipos de estabilización de suelos.....	17
Figura N° 2.2 .- Estructura del Pavimento	27
Figura N° 2.3 .- Carga dinámica.....	28
Figura N° 2.4 .- Vista panorámica de la planta térmica Ilo 21.....	32
Figura N° 2.5 .- Zona de obtención de ceniza volante.....	33
Figura N° 2.6 .- Ceniza volante	33
Figura N° 2.7 .- Proceso de obtención de carbón pulverizado.....	35
Figura N° 2.8 .- Partículas de la ceniza volante	36
Figura N° 2.9 .- Ubicación de la zona en estudio	38
Figura N° 2.10.- Vista del lugar de obtención de la arcilla en Villarrica.....	38
Figura N° 3.1 .- Ensayo de análisis granulométrico de suelo por tamizado	40
Figura N° 3.2 .- Ensayo de límite líquido con equipo de la copa de Casagrande	42
Figura N° 3.3 .- Ensayo de límite plástico	42
Figura N° 3.4 .- Bomba de vacíos utilizada en el ensayo de gravedad específica.....	44
Figura N° 3.5 .- Equipo usado en el ensayo de próctor modificado	44
Figura N° 3.6 .- Equipo de laboratorio usado para el ensayo de CBR.....	45
Figura N° 3.7 .- Vista de Equipo de Laboratorio para Difracción de Rayos X	46
Figura N° 3.8 .- Difractograma detallado de la ceniza volante.....	55
Figura N° 3.9 .- Difractograma de la ceniza volante	55
Figura N° 3.10.- Difractograma detallado de la arcilla	56
Figura N° 3.11.- Difractograma de la arcilla	56
Figura N° 4.1.- Curvas para determinar el espesor de la capa de revesti- mento granular (MTC 2008)	64

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico N°4.1.- Curvas granulométricas de suelo arcilloso, ceniza volante y mezclas con ceniza volante	58
Gráfico N°4.2.- Variación de límites de consistencia con el contenido de ceniza volante.....	59
Gráfico N°4.3.- Variación de índice de plasticidad con el contenido de ceniza volante.....	59
Gráfico N°4.4.- Variación de la gravedad específica con el contenido de ceniza volante.....	60
Gráfico N°4.5.- Variación de la MDS con el contenido de humedad en mezclas de arcilla y ceniza volante	60
Gráfico N°4.6.- Variación del óptimo contenido de humedad y el contenido de ceniza volante.....	61
Gráfico N°4.7.- Variación de la expansión en la mezcla y contenido de ceniza volante.....	61
Gráfico N°4.8.- Curva de CBR de la mezcla vs contenido de ceniza volante. ...	62
Gráfico N°4.9.- Gráfico de curvas espesor de la capa de revestimiento granular y el contenido de ceniza volante	64

LISTA DE SÍMBOLOS

Al = Aluminio
Ca = Calcio
Fe = Fierro
IP = Índice de plasticidad
LL = Limite Líquido
LP = Limite Plástico
kg = kilogramos
Kv = Kilo vatio
km = kilómetro
m = metro
cm = Centímetro
mm = milímetros
Na = Sodio
O = Oxígeno
S = Azufre
Si = Silicio
t = Tonelada

LISTA DE ABREVIATURAS

CV = Ceniza Volante
EIA = Estudio de Impacto Ambiental
FBC = Combustión Fondo de Fluido
M.O. = Materia orgánica
CBR = California Bearing Ratio
MDS = Máxima densidad seca
Mr = Modulo Resiliente
PCC = Producto Combustión Calor
Min. = Mínimo
Max = Máximo
MTC = Ministerio de Transportes y Comunicaciones
SUCS = Sistema unificado de clasificación de suelos
OCH = Optimo contenido de humedad
AASTHO = American Association of State Highway and Transportation Officials
ACAA = American Coal Ash Association
SPCC = Southern Perú Copper Corporation
PPA = Power Purchase Agreement
NAASRA = National Association of Australian State Road Authorities
EE = Ejes equivalentes
Nrep = Numero de repeticiones de EE para el carril de diseño
e = Espesor de la capa de afirmado en mm.

INTRODUCCIÓN

En el Perú, el uso de la técnica de la estabilización de suelos arcillosos es una técnica ya empleada con diferentes métodos de estabilización y han resultado que son efectivos para el mejoramiento de suelos de baja capacidad de soporte. La presente Tesis de investigación mostrará un método nuevo de poder estabilizar un suelo arcilloso mediante el uso de la adición de ceniza volante en una proporción adecuada y así poder investigar y tener más conocimiento sobre este tema.

En esta investigación se han realizado ensayos de laboratorio tanto a las muestras de arcilla, ceniza volante y a mezclas en proporciones adecuadas, para evaluar el comportamiento del mejoramiento de las propiedades de la mezcla de arcilla y ceniza volante a fin de determinar si podemos utilizar la arcilla mejorada como capa de sub-rasante en el pavimento.

Esta tesis está dividida en cinco capítulos, de acuerdo a las etapas realizadas en la investigación, a partir de esta introducción, en el primer capítulo se hace mención de los diferentes métodos de estabilización que existen actualmente, los diferentes países en los que ya se ha aplicado este mejoramiento de la arcilla con ceniza volante en las capas de pavimento y donde se obtuvo aumento de resistencia, hasta cumplir con las especificaciones técnicas para pavimentos.

En el capítulo dos, donde se realiza la revisión de la literatura de los principales temas presentados en el trabajo y necesario para la comprensión de los resultados, así como definición de los materiales involucrados.

En el capítulo tres, se detalla los ensayos de laboratorio realizados a las muestras con un resumen de los respectivos resultados obtenidos. Se realizaron ensayos de laboratorio a la arcilla natural y a la ceniza volante con la finalidad de conocer sus propiedades físicas, también se realizaron ensayos químicos para saber sus componentes y ensayos mineralógicos. También se efectuaron ensayos de laboratorio comparativos con las mezclas de suelos arcillosos con la ceniza volante en proporciones adecuadas.

Con la finalidad de obtener el porcentaje óptimo adecuado de ceniza volante para lograr conseguir los mejores resultados y el incremento de resistencia de suelos.

En el capítulo cuatro, se presenta el análisis de resultados de las mezclas de suelo arcilloso y la ceniza volante presentada y así poder ver la proporción óptima de la mezcla arcilla con la ceniza volante y así poder usarla como subrasante mejorada.

Los diseños de estructuras típicas de pavimento rural, tanto con un suelo natural arcilloso y con suelo estabilizado, se relacionaron mediante el método NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities).

Finalmente, en el capítulo cinco se presentan las conclusiones y recomendaciones; donde se detalla lo más resaltante de esta investigación y recomendaciones para futuras investigaciones. En los anexos se presentan los resultados de ensayos de laboratorio que sustenta la presente investigación así como las referencias bibliográficas.

CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

Desde hace un buen tiempo se vienen investigando nuevos materiales para ser usados como aditivos en el mejoramiento o estabilización de suelos arcillosos, de tal manera de mejorar la calidad de la cimentación de la estructura de la carretera y así puedan ser empleados en los diferentes procesos constructivos de carreteras. Estos nuevos materiales deben permitir incrementar la resistencia de los suelos de subrasante en la construcción, mejorar la calidad, permitir un ahorro económico y cumplir con las especificaciones técnicas.

En México y en otros países se ha venido utilizando ya desde los años 80's un producto obtenido de las plantas carbo-eléctricas (generadoras de electricidad vía carbón), llamado Cenizas Volantes. Estas cenizas no son un producto final, sino un residuo que se genera debido al proceso de producción de la electricidad por la combustión del carbón por parte de estas plantas termoeléctricas, la ceniza volante genera un problema ambiental porque son dispuestos en rellenos sanitarios.

La ceniza volante investigada es obtenida de la planta termoeléctrica Ilo 21, ubicada en la provincia de Ilo donde se utiliza el carbón como fuente de calor.

La presente tesis pretende alcanzar la dosificación óptima de suelo-ceniza mediante ensayos de laboratorio y de esta manera encontrar un nuevo aditivo que mejore la estructura del pavimento y que no genere mucho gasto.

1.1. OBJETIVO GENERAL

Estudiar el comportamiento de la ceniza volante obtenida de la combustión del carbón en una central termo eléctrica, para ser usada como material estabilizante de los suelos arcillosos y su empleo como capa de subrasante de un pavimento.

1.1.1. Objetivo específico

- Estudiar el efecto de la combinación de la ceniza volante en determinada proporción con suelo arcilloso.

- Estudiar las proporciones adecuadas de ceniza volante para encontrar el valor óptimo que cumpla con los requerimientos de las especificaciones técnicas para ser capa de subrasante de carreteras.
- Realizar ensayos en suelo arcilloso y en mezcla con ceniza volante a fin de verificar su comportamiento.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los suelos que mayormente originan problemas en la estructura de los pavimentos son los suelos arcillosos, los cuales no llegan a cumplir los valores estándares para subrasante y menos para sub base en la construcción de carreteras debido a su baja capacidad de soporte.

En la selva peruana es difícil encontrar canteras con material granular para ser empleadas en la construcción de las diversas capas del pavimento y/o reemplazo de materiales en subrasantes de baja capacidad de soporte. Frente a esta situación se emplean en la actualidad diversas alternativas para el mejoramiento de las características mecánicas del suelo arcilloso, estabilizando el suelo con productos adicionados como la cal, o algún otro aditivo que mejoren la resistencia del suelo.

En el Perú tenemos la planta termoeléctrica ubicada en la ciudad de Ilo, que utiliza el carbón como fuente de energía de calor produciendo cenizas en el término de su proceso industrial. Estas cenizas son un problema ambiental por su almacenamiento, por lo que son llevados a rellenos sanitarios especiales demandando espacio y costos.

En otros países se están empleando ceniza volante de carbón, como material para el mejoramiento de los suelos en la estructura del pavimento y también como aditivo del concreto, existiendo referencia de su buen desempeño en investigaciones realizadas en diversos países, principalmente en Estados Unidos, Europa y Brasil, concluyéndose que la ceniza volante estabiliza el suelo, mejorando sus propiedades mecánicas para su utilización en pavimentación.

1.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

En la presente investigación se han evaluado las características mecánicas de los suelos estabilizados con cenizas volantes de carbón en proporciones adecuados para su posterior uso como subrasante mejorada en pavimentos.

1.4. JUSTIFICACIÓN

La zona de selva de Perú, se caracteriza porque no existen canteras de material granular adecuados que puedan ser utilizados en las diversas capas de la estructura del pavimento, debiéndose encontrar alternativas como la estabilización, para el caso de mejoramientos de suelos arcillosos existentes como terreno natural en la zona de selva de nuestro país que permita mejorar la capacidad de soporte de los suelos. Una de las alternativas corresponde al empleo de materiales como la ceniza volante.

En diversos países, se ha empleado cenizas de carbón para estabilizar suelos de baja capacidad de soporte en la construcción de la estructura del pavimento. Existiendo referencia de su buen desempeño en investigaciones realizadas, en Estados Unidos, Europa y Brasil, concluyendo que la ceniza volante estabiliza el suelo arcilloso mejorando sus propiedades mecánicas para su utilización en pavimentación.

1.5. ORGANIZACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Para abordar la presente investigación se elaboró un plan de trabajo que se detalla a continuación:

La presente tesis se inició con la obtención de las muestras de arcilla a investigar, las cuales se obtuvieron de la ciudad de Villarica, provincia de Oxapampa y departamento de Pasco, ubicada aproximadamente en el Km. 132 de la carretera Villarica – Puerto Bermúdez; recolectándose 800kg de material arcilloso. En la ciudad de Ilo se recolectó la muestra de ceniza volante de la Central Termoeléctrica de Ilo 21; recolectándose 500 kg de ceniza volante. Las muestras fueron ensayadas en el Laboratorio N°2 Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional de Ingeniería.

La investigación se ha desarrollado en cinco capítulos. El Capítulo I, Antecedentes realiza un análisis y formulación del problema indicando los objetivos. El Capítulo II, Marco Teórico, presenta información sobre los métodos de estabilización de los suelos, la definición y propiedades de las cenizas volantes, y sus aplicaciones en la ingeniería. El Capítulo III, Ensayos de Laboratorio, describe los materiales empleados, los trabajos y ensayos de laboratorio realizados a las muestras obtenidas del campo y a las mezclas, los equipos y normas de ensayos, presenta también los resultados de los ensayos de suelos con un porcentaje de ceniza volante realizados en el laboratorio de la Universidad Nacional de Ingeniería. El Capítulo IV, Análisis de Resultados, presenta los análisis de resultados de ensayos físicos, químicos y geotécnicos de las mezclas de cenizas volantes y suelos. Los resultados de ensayos de laboratorio se analizan y discuten en comparación con otras investigaciones realizadas. Finalmente se presenta en Capítulo V, las principales Conclusiones y Recomendaciones obtenidas durante esta investigación.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1. TIPOS DE ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

La estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos y la incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. Tales estabilizaciones, por lo general se realizan en los suelos de subrasante inadecuado o pobre, en este caso son conocidas como estabilización de suelo-cemento, suelo-cal, suelo-asfalto y otros productos diversos. En cambio cuando se estabiliza una subbase granular o base granular, para obtener un material de mejor calidad se denomina como subbase o base granular tratada (con cemento, cal, asfalto, etc).

Para un mejor análisis, éstos se dividen en cinco grupos; Estabilización de Suelos: físicas y mecánicas, estabilización química, estabilización eléctrica, estabilización térmica y otros.

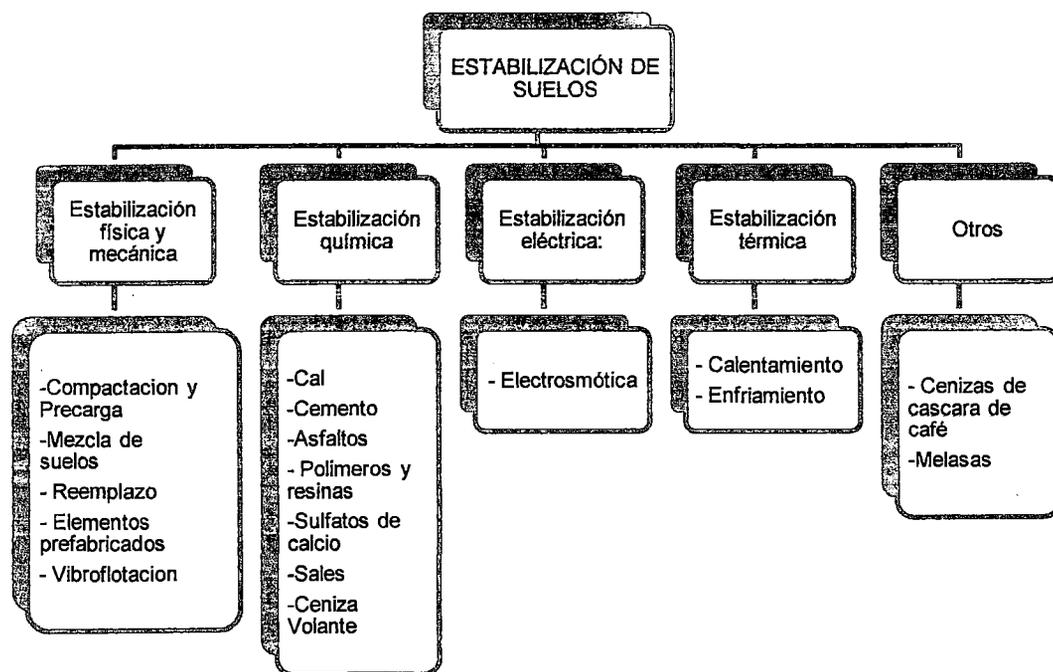


Figura N° 2.1.- Tipos de estabilización de suelos

2.1.1. Estabilización Física y Mecánica

Este método se utiliza para mejorar el suelo de baja capacidad de soporte produciendo cambios físicos en el mismo, sin que se produzcan reacciones químicas de importancia. Hay varios métodos como son:

a. Estabilización por compactación

Consiste en comprimir los granos entre sí aumentando así su fricción interna (compacidad), lo que incrementa su capacidad de soporte.

Aunque mejora la calidad de los suelos, ella por sí sola no proporciona la resistencia y durabilidad que necesitan las capas del suelo, ya que éstas se ven afectadas por cambios de humedad y por el desgaste del tránsito. Esta técnica se divide en 3 modalidades:

- Compactación.
- Precarga.
- Drenaje.

b. Estabilización empleando la mezcla de suelos

Es de amplio uso pero por si sola no logra reducir los efectos deseados, necesitándose siempre por lo menos la compactación como complemento. Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las grava o arenas tienen una alta fricción interna lo que hace que soporte grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que sea estable como para ser la superficie de rodamiento de una carretera ya que al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos se pueden separar e incluso salirse del camino. Las arcillas, por el contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad. La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.

c. Estabilización por reemplazo

Cuando se prevea la construcción de la subrasante mejorada con material adicionado, pueden presentarse dos situaciones, que la capa se construya directamente sobre el suelo natural existente o que éste deba ser excavado previamente y reemplazado por el material de adición.

En el primer caso, el suelo existente se deberá escarificar, conformar y compactar a la densidad especificada para cuerpos de terraplén, en una profundidad de quince centímetros (15 cm). Una vez que el suelo de soporte esté preparado, autorizará la colocación de los materiales, en espesores que garanticen la obtención del nivel de subrasante y densidad exigidos, empleando el equipo de compactación adecuado. Dichos materiales se humedecerán o airearán, según sea necesario, para alcanzar la humedad más apropiada de compactación, procediendo luego a su densificación.

En el segundo caso, el mejoramiento con material totalmente adicionado implica la remoción total del suelo natural existente; de acuerdo al espesor de reemplazo. Una vez alcanzado el nivel de excavación indicado, conformado y compactado el suelo, se procederá a la colocación y compactación en capas, hasta alcanzar las cotas exigidas.

d. Estabilización empleando elementos prefabricados

Consiste en la incorporación de elementos prefabricados como geosintéticos y/o tierra armada, los cuales actúan incrementando la cohesión y el ángulo de fricción del material, aumentando su capacidad portante. Este método es muy rápido pero costoso.

e. Vibroflotación

Aplicable en arenas o suelos con alta permeabilidad y consiste en la inserción de un dispositivo vibratorio, capaz de aplicar agua simultáneamente con el vibrado, de tal manera que al encontrarse dicho dispositivo dentro del suelo inyectando agua y vibrando se produce la licuación de la arena logrando con ello su compactación.

2.1.2. Estabilización Química

La estabilización química de suelos es una tecnología que se basa en la aplicación de un producto químico, denominado estabilizador químico, el cual se debe mezclar homogéneamente con el suelo a tratar y curar de acuerdo a especificaciones técnicas propias del producto.

El estabilizador químico tiene como objetivo transferir al suelo tratado, en un espesor definido, ciertas propiedades tendientes a mejorar sus propiedades de comportamiento ya sea en la etapa de construcción y/o de servicio, también de un gran número de factores, entre éstos se incluyen la situación geográfica y las condiciones climáticas, tales como la temperatura, humedad, dirección y velocidad del viento, etc. Además, dependen de otros factores externos como los producidos por el tránsito de los vehículos (velocidad, configuración de ejes, neumáticos, sistemas de suspensión, y otros). Se recomienda que estas propiedades sean medidas en el terreno, antes y después de aplicar el estabilizador químico.

a. Cal

El suelo-cal se obtiene por mezcla íntima de suelo, cal y agua. La cal que se utiliza es óxido cálcico (cal anhidra o cal viva), obtenido por calcinación de materiales calizos, o hidróxido cálcico (cal hidratada o cal apagada). Estas cales se llaman también aéreas por la propiedad que tienen de endurecerse en el aire, una vez mezcladas con agua, por acción del anhídrido carbónico.

La experiencia demuestra que los productos de la hidratación del cemento pueden ser reproducidos combinando dos o más componentes primarios de este producto como: CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 en las proporciones adecuadas y en presencia de agua.

Como la mayoría de los suelos contienen sílice y aluminio silicatos, la incorporación de cal anhidra (CaO) o de cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y agua en cantidad apropiada se puede obtener la composición deseada.

Utilizada generalmente para disminuir la plasticidad y consecuentemente también los cambios volumétricos de un material arcilloso, la forma de más uso

es cal hidratada, óxidos o hidróxidos. Es técnicamente muy sencilla y bastante económica.

Especificaciones Técnicas Generales para construcción de Carreteras del MTC (vigente), la Especificación AASHTO M-216 ó ASTM C-977.

b. Cemento

La estabilización suelo-cemento se obtiene por la mezcla íntima de un suelo suficientemente disgregado con cemento, agua y otras eventuales adiciones, seguida de una compactación y curado adecuado. De esta forma, el material suelto se convierte en otro endurecido, mucho más resistente. A diferencia del concreto, sin embargo, los granos de los suelos no están envueltos en pasta de cemento endurecido, sino que están puntualmente unidos entre sí. Por ello, el suelo-cemento tiene una resistencia inferior y un módulo de elasticidad más bajo que el concreto. El contenido óptimo de agua se determina por el ensayo próctor modificado como en la compactación de suelos.

Utilizado generalmente para suelos arenosos o gravas finas, la mayor ventaja es el incremento de la resistencia, también se puede usar para suelos arcillosos pero implica mayor porcentaje de este.

Las propiedades del suelo-cemento dependen de:

- Tipo y cantidad de suelo, cemento y agua.
- Ejecución.
- Edad de la mezcla compactada y tipo de curado.

La resistencia del suelo-cemento aumenta con el contenido de cemento y la edad de la mezcla. Al añadir cemento a un suelo y antes de iniciarse el fraguado, su Índice Plástico disminuye, su Límite Líquido varía ligeramente y su densidad máxima y humedad-óptima aumenta o disminuyen ligeramente, según el tipo de suelo.

c. Asfaltos

La mezcla de un suelo con un producto asfáltico puede tener como finalidad:

- Un aumento de su estabilidad por las características aglomerantes del ligante que envuelve las partículas del suelo.
- Una impermeabilización del suelo, haciéndolo menos sensible a los cambios de humedad y por tanto más estable en condiciones adversas.

El material asfáltico usualmente empleado son las emulsiones asfálticas y los asfaltos fluidificados de viscosidad media. La mezcla se hace con frecuencia in situ, y la elección del ligante asfáltico dependerá de la granulometría del suelo, de su contenido de humedad y de las condiciones climáticas. La granulometría puede ser abierta, cerrada con finos o cerrada sin finos, pero una mayor superficie específica exigirá un ligante de curado y rotura más lentos, para permitir una mezcla más adecuada.

d. Polímeros y Resinas

Son cadenas muy largas de moléculas formadas por unión e componentes orgánicos, a los que se denomina monómeros. Los polímeros naturales tienen la forma de resinas. La incorporación de polímeros a los suelos se hace de dos maneras; o se añaden los monómeros junto con un sistema catalizador que produce la polimerización posterior o el polímero se añade ya formado, sólido, en solución o en emulsión. Únicamente pueden usarse en suelos ácidos (Los suelos ácidos se encuentran fundamentalmente en regiones de pluviosidad elevada; en las regiones áridas, los suelos son normalmente alcalinos), otra desventaja importante del producto es la degradación bacteriana, que limita su vida. Los polímeros pueden ser catiónicos, aniónicos y no aniónicos. Los catiónicos poseen cargas positivas que crean nexos eléctricos muy fuertes con las negatividades de las partículas de arcilla; por este mecanismo pueden aumentar la resistencia del suelo.

Los polímeros aniónicos tienen la misma carga eléctrica que los minerales de arcilla, por lo que su incorporación más bien tiende a disminuir la resistencia de los suelos tratados; correspondientemente favorecen la compactación.

Los polímeros no iónicos generan nexos de hidrógeno importantes entre las partículas de arcilla, asociando sus grupos OH con el oxígeno de aquellas.

e. Sales

El principal uso de la sal es como control del polvo en bases y superficies de rodadura para tránsito ligero. También se utiliza en zonas muy secas para evitar la rápida evaporación del agua de compactación.

La sal es un estabilizante natural, compuesto aproximadamente por 98% de NaCl y un 2% de arcillas y limos, cuya propiedad, al ser higroscópico, es absorber la humedad del aire y de los materiales que le rodean, reduciendo el punto de evaporación y mejorando la cohesión del suelo. Su poder coagulante conlleva a un menor esfuerzo mecánico para lograr la densificación deseada, debido al intercambio iónico entre el Sodio y los minerales componentes de la matriz fina de los materiales, produciéndose una acción cementante.

Los suelos que se usen para la construcción de Suelo-Sal no deben tener más de tres por ciento (3%) de su peso de materia orgánica.

El índice de plasticidad del suelo debe ser mayor a 8%, la fracción de suelos que pasa la malla N°200 el requerimiento mínimo es de 12%. No obstante, para mayores índices de plasticidad del suelo, se permite aceptar para la fracción de suelos que pasa la malla #200, menores valores de Índice Plástico hasta un límite no menor a 9%.

La Sal (cloruro de sodio) se produce mediante 3 métodos, el más antiguo consiste en el empleo del calor solar para producir la evaporación del agua salada, con lo que se obtienen los residuos de sal. Otro método consiste en la extracción directa de las minas de sal y tercer método consiste en la evaporación del agua de mar mediante el empleo de hornos.

El cloruro de sodio se presenta en forma de cristales, fácilmente solubles en agua, los cuales son higroscópicos y se encuentran constituyendo cristales grandes o polvo fino y con diferentes grados de pureza.

f. Ceniza volante.

Las cenizas volantes son procedentes de la combustión en las centrales termoeléctricas. La composición de cada una de las clases de ceniza y el porcentaje de carbón encontrado en éstas, depende del proceso que se realice en cada una de las plantas de la termoeléctrica. Las cenizas son granos finos compuestos básicamente por silicatos, aluminios, cal libre y algunos óxidos que permiten una reacción puzolánica con el suelo arcilloso que al igual que otras sustancias reduce el índice de expansión.

Muchos investigadores han estudiado el mecanismo que contribuye al proceso de estabilización de suelos tratados con cenizas volantes. Según Acosta et al. (2003) existen tres mecanismos principales contribuyendo a la estabilización. El primero es que la resistencia del suelo aumenta como resultado de la cementación producida a partir de la hidratación de aluminato tricálcico presentes en las cenizas volantes. Otro mecanismo es que la cal libre (CaO) en las cenizas volantes reacciona con los minerales de arcilla, causando compresión de la capa de absorción y la reducción en la plasticidad. Finalmente, la cal libre que no hace reaccionar con los minerales de arcilla se encuentra disponible para el proceso de cementación adicional a través de la reacción puzolánica con los compuestos de sílice y alúmina.

Cokca (2001) explica que la estabilización de los suelos tratados con cenizas volantes es el resultado de intercambio de catión entre las partículas de arcilla y aluminio (Al^{3+}), calcio (Ca^{2+}) y hierro (Fe^{3+}) en las cenizas volantes. Se describe el proceso de estabilización indicando que las cenizas volantes pueden proporcionar una adecuada matriz de cationes divalentes y trivalentes que bajo condiciones ionizadas origina la floculación de dispersión de las partículas de arcilla.

Cuando las cenizas volantes se mezclan con el suelo arcilloso, las características de compactación (densidad y óptimo contenido de humedad) de los suelos cambian. El proceso de hidratación se produce durante el contacto entre el suelo, la ceniza y el agua hace que la unión y cementación generen altos valores de densidad.

2.1.3. Estabilización Eléctrica

Se refiere principalmente a la utilización de ciertos procesos fisicoquímicos.

a. Electrosmótica

Denominada también como electrósmosis, consiste en aplicar al suelo, combinadamente, una corriente eléctrica que origina una serie de fenómenos de naturaleza fisicoquímicos y la acción de dispositivos de bombeo. Técnica utilizada en la estabilización de suelos blandos.

2.1.4. Estabilización Térmica

a. Por calentamiento

En la práctica y para este caso resulta suficiente llegar a la temperatura en que la rehidratación de la arcilla se torne imposible (200 a 400 °C). La influencia de un punto de calentamiento no se extiende mucho más allá de un par de metros en torno a él. Este método es útil para poder reducir el potencial de expansión del material arcilloso.

b. Por enfriamiento

Esta técnica es mucho más complicada que la anterior ya que el enfriamiento produce la disminución de la resistencia de los suelos finos al aumentar la repulsión entre las partículas y causa el movimiento del agua intersticial por efecto del gradiente térmico. Por estas razones, todos los métodos de estabilización por enfriamiento llegan a la congelación. En suelos arenosos el agua se congela con temperaturas del orden de los 0°C, pero los arcillosos pueden requerirse temperaturas bastantes menores.

2.1.5. Otros

Existen otros métodos de estabilización de suelos diferentes a los ya citados, sin embargo, su utilización es mucho menos frecuente y reciente con la incorporación de productos naturales como la Cenizas de cascara de café y Melasas.

2.2. PAVIMENTO

2.2.1. Definición de Pavimento

El Pavimento es una estructura de varias capas construida sobre la subrasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por cargas estáticas y móviles en un periodo de tiempo de circulación de los vehículos, con el objeto de soportar y distribuir al suelo las cargas producidas por el tránsito. Para mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito.

2.2.2. Estructura del Pavimento

Por lo general está conformada por las siguientes capas: base, subbase y capa de rodadura.

a. Capa de Rodadura

Es la parte superior de un pavimento, que puede ser de tipo bituminoso (flexible) o de concreto de cemento Portland (rígido) o de adoquines, cuya función es sostener directamente el tránsito.

b. Base

Es la capa inferior a la capa de rodadura, que tiene como principal función sostener, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito. Esta capa será de material granular drenante ($\text{CBR} \geq 80\%$) o será tratada con asfalto, cal o cemento.

c. Subbase

Es una capa de material especificado y con un espesor de diseño, el cual soporta a la base y a la capa de rodadura. Además se utiliza como capa de drenaje y controlador de la capilaridad del agua. Dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del pavimento, esta capa puede obviarse. Esta capa puede ser de material granular ($\text{CBR} \geq 40\%$) o tratada con asfalto, cal o cemento. Ver Figura N° 2.1.

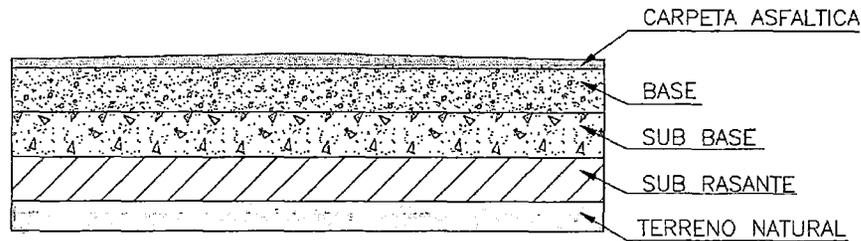


Figura N° 2.2.- Estructura del Pavimento

2.2.3. Definición de Sub-rasante

La Subrasante es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado.

La subrasante es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, que soportará la estructura del pavimento, y está conformada por suelos seleccionados de características aceptables y compactados por capas para constituir un cuerpo estable en óptimo estado, de tal manera que no se vea afectada por la carga de diseño que proviene del tránsito.

2.2.4. Propiedades de la Subrasante.

a. Propiedades físicas

Se obtienen mediante los ensayos de límite líquido, límite plástico, límite de contracción, y la clasificación de suelos como también obtener la relación de humedad-densidad la cual se obtiene mediante el ensayo de próctor modificado.

b. Propiedades ingenieriles

Estos miden la respuesta de la subrasante para soportar cargas, como es el ensayo de CBR, ensayo de compresión triaxial y Modulo resiliente.

El ensayo de CBR, mide la resistencia del suelo a la penetración. Así comparamos la carga vs. Penetración con la resistencia obtenida de una grava estandarizada bien graduada (CBR= 100%).

Las muestras son sumergidas 96 horas para simular la condición extrema de saturación.

El ensayo de Compresión triaxial, evalúa la resistencia al corte del suelo, ensayamos varias muestras bajo diferentes presiones de confinamiento. Se obtienen curvas de tensión-deformación.

La envolvente de rotura de Mohr, permite determinar cohesión y ángulo de fricción interna.

El ensayo con el equipo Penetrómetro Dinámico de cono, Tiene el objeto de medir in-situ tensiones de las capas del pavimento y suelos de la subrasante. Existe una correlación con el CBR, que permite una estimación rápida del mismo cono 60°.

$$CBR = \frac{405.3}{PR^{1.259}}$$

El ensayo del módulo resiliente, determina la rigidez dinámica bajo cargas repetidas (varios miles de ciclos), la deformación permanente se registra para análisis pero la probeta no falla. Es la forma más moderna y real para caracterizar las cargas de rueda en movimiento. En la Figura N° 2.3, se aprecia la respuesta ante la carga dinámica.

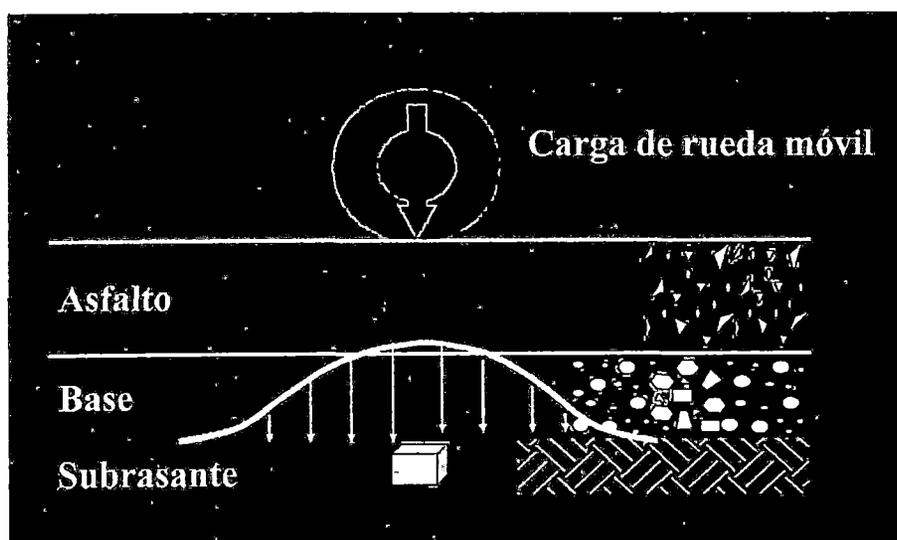


Figura N° 2.3.- Carga dinámica

2.2.5. Caracterización de la Subrasante

Con el objeto de determinar las características físico-mecánicas de los materiales de la subrasante se llevarán a cabo investigaciones mediante la ejecución de pozos exploratorios ó calicatas de 1.5 m de profundidad mínima; el número mínimo de calicatas por kilómetro, estará de acuerdo a la Tabla N° 2.1.

Tabla N° 2.1.- Número de calicatas para exploración de suelos

Tipo de Carretera	Profundidad (m)	Número Mínimo de Carriles	Observación
Autopistas: carreteras de IMDA mayor de 6000 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> • Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido. • Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido. • Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido 	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras Duales o Multicarril: carreteras de IMDA entre 6000 y 4001 veh/día, de calzadas separadas, cada una con dos o más carriles	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> • Calzada 2 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido. • Calzada 3 carriles por sentido: 4 calicatas x km x sentido. • Calzada 4 carriles por sentido: 6 calicatas x km x sentido. 	
Carreteras de Primera Clase: carreteras con un IMDA entre 4000-2001 veh/día, de una calzada de dos carriles.	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> • 4 calicatas x km 	Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada
Carreteras de Segunda Clase: carreteras con un IMDA entre 2000-401 veh/día, de una calzada de dos carriles	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> • 3 calicatas x km 	
Carreteras de Tercera Clase: Carreteras con un IMDA entre 400-201 veh/día, de una calzada de dos carriles	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> • 2 calicatas x km 	

Tipo de Carretera	Profundidad (m)	Número Mínimo de Carriles	Observación
Carreteras de Bajo Volumen de Tránsito: carreteras con un IMDA \leq 200 veh/día, de una calzada	1.50m respecto al nivel de subrasante del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> • 1 calicata x km 	

Fuente: Manual de Carreteras "Suelo, Geología, Geotecnia y Pavimentos"

Las calicatas se ubicarán longitudinalmente y en forma alternada, dentro de la faja que cubre el ancho de la calzada, a distancias aproximadamente iguales.

De los estratos encontrados en cada una de las calicatas se obtendrán muestras representativas, las que deben ser descritas e identificadas mediante una tarjeta con la ubicación de la calicata (con coordenadas UTM - WGS84), número de muestra y profundidad y luego colocadas en bolsas de polietileno para su traslado al laboratorio.

Así mismo se extraerán muestras representativas de la subrasante para realizar ensayos de Módulos de resiliencia (M_r) o ensayos de CBR para correlacionarlos con ecuaciones de M_r , la cantidad de ensayos dependerá del tipo de carretera.

Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño de la estructura del pavimento que se colocará encima. En la etapa constructiva, los últimos 0.30m de suelo debajo del nivel superior de la subrasante, deberán ser compactados al 95% de la máxima densidad seca obtenida del ensayo proctor modificado (MTC EM 115).

Para el diseño del pavimento de bajo volumen de tránsito se empleará el "Manual Para El Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito – MTC (2008)". Teniendo en cuenta la capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño del afirmado, que se colocará encima.

Se identifican en el manual del MTC cinco categorías de subrasante:

- S0: SUBRASANTE MUY POBRE CBR < 3%
- S1: SUBRASANTE POBRE CBR = 3% - 5%
- S2: SUBRASANTE REGULAR CBR = 6 - 10%
- S3: SUBRASANTE BUENA CBR = 11 - 19%
- S4: SUBRASANTE MUY BUENA CBR > 20%

Los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante, en una profundidad no menor de 0.60 m, deberán ser suelos adecuados y estables con CBR \geq 6%. En caso el suelo, debajo del nivel superior de la subrasante, tenga un CBR < 6% (subrasante pobre o subrasante inadecuada), corresponde estabilizar los suelos, para lo cual el Ingeniero Responsable analizará según la naturaleza del suelo alternativas de solución, como la estabilización mecánica, el reemplazo del suelo de cimentación, estabilización química de suelos, estabilización con geosintéticos, elevación de la rasante, cambiar el trazo vial, eligiéndose la más conveniente técnica y económica.

2.3. CENIZA VOLANTE

Es obtenida de la Central Térmica Ilo 21, está ubicada en la Región Moquegua, ciudad de Ilo, a 1240.5 km al sur de Lima. Se empezó a construir en 1998, siendo dotada de todos los adelantos técnicos que hacen que su sistema sea uno de los más modernos del país. Es la única planta en Perú que opera con carbón.

La Central Térmica Ilo 21 genera un total de 141.83 MW de potencia efectiva. Las operaciones se inician con la llegada de buques de hasta 85,000 toneladas, que atacan en la plataforma del muelle propio de más de 1 km. Los carbones más utilizados en la Central Termoeléctrica se encuentran en la Tabla N° 2.2.

Tabla N° 2.2.- Carbones utilizados en la C.T. Ilo 21

Compañía	Adaro*	Carbones del Guasare**	Glencore**	Carbocol**
Mina	Tutupán	Paso Diablo	Singleton	El Cerrejón
Carbón	Envirocal	P. D. Premium	Singleton	D

Compañía	Adaro*	Carbones del Guasare**	Glencore**	Carbocol**
Puerto de Carga	Banjarmasin	Bulkwayuu	Newcastle	P. Bolívar
País de Origen	Indonesia	Venezuela	Australia	Colombia
US\$/t	44.38	47.13	43.08	48
US\$/GJ	1.96	1.6	1.5	1.78
Embarque	1	2	3	4

Nota:

*El carbón ADARO es el carbón de diseño y según las condiciones contractuales utilizado para el cálculo del consumo específico de calor y cálculo del rendimiento de la unidad.

** Carbones utilizados en la operación de la central, que si bien el costo por unidad másica es mayor que el ADARO, el costo por unidad de energía es menor, que explica el uso de combustibles.

El complejo de la planta generadora de electricidad de la Central Térmica Ilo 21 cuenta con una serie de equipamientos complejos, se cuenta con las canchas de carbón con capacidad para 200,000 toneladas para facilitar las operaciones. Una característica de esta planta es que en su proceso de combustión utiliza el carbón, que luego se convierte en energía.

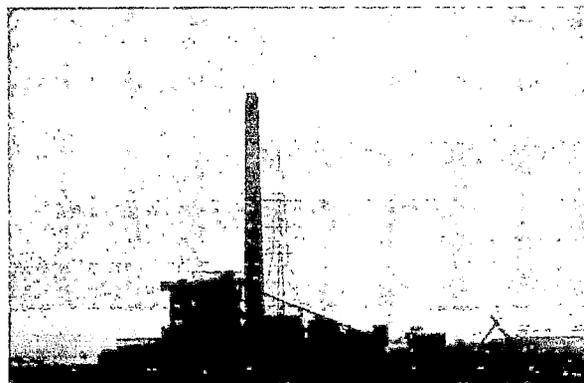


Figura N° 2.4.- Vista panorámica de planta térmica Ilo 21



Figura N° 2.5.- Zona de obtención de cina volante

2.3.1. Definición

La ceniza volante es un producto secundario del proceso de combustión del carbón pulverizado usualmente asociado con plantas generadoras de energía eléctrica. Es un polvo de grano fino, compuesto principalmente de silicio, aluminio y varios óxidos y álcalis; es de naturaleza puzolánica.

La ceniza volante (CV) es la porción más fina, que se separa de la corriente de gases en combustión en la central termoeléctrica entre el caldero u hogar y la chimenea mediante equipos convenientemente diseñados (ciclones, filtros, precipitaciones electrostáticas o una combinación de ellos) como se muestra en la Figura N° 2.6, si no existieran dichos elementos la ceniza se expandiría a la atmósfera desde la chimenea con lo que resultaría dispersada en amplias zonas geográficas.



Figura N° 2.6.- Ceniza volante

La otra porción de la materia incombustible del carbón se separa en el cenicero del hogar en forma de escorias. La proporción escoria: ceniza depende del tipo de Caldero u hogar y del carbón (tipo y forma de alimentación), en el caso de una central térmica moderna de carbón pulverizado.

También ha sido utilizada principalmente en la estabilización de suelos como un suplemento o reemplazo de la cal o cemento en suelos que muestran pobres propiedades puzolánicas.

En la presente tesis se ha seleccionado y estudiado la ceniza volante Peruana con la finalidad de:

- Estudiar la composición de la ceniza volante de la Central Termoeléctrica de Ilo para conocer sus características químicas mineralógicas y físicas.
- Determinar la idoneidad de las cenizas volantes basada en parámetros químicos, físicos y mineralógicos y su aplicación como aditivo mejorador de suelos arcillosos.

Para ello, en este ítem se describe primero las características de las centrales termoeléctricas que producen las cenizas volantes seleccionadas.

Seguidamente, se estudia la composición química; mineralógica y las características físicas. Desde el punto de vista ambiental, las impurezas más relevantes de las cenizas volantes son los metales pesados que contienen por ello, se han realizado pruebas de lixiviación de la ceniza volante seleccionado para poder predecir la movilidad de estos elementos.

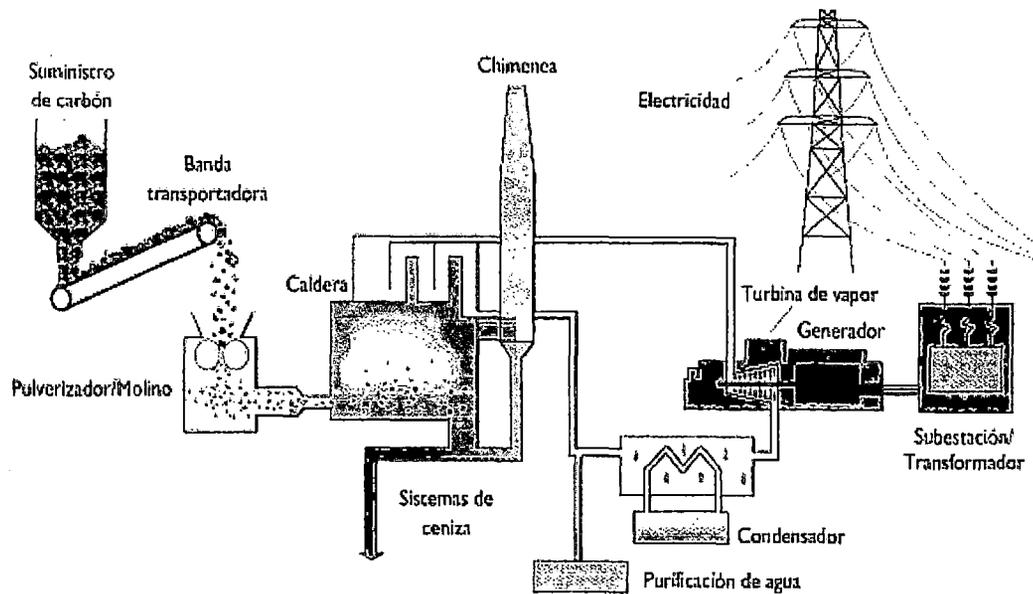


Figura N° 2.7.- Proceso de obtención de carbón pulverizado

2.3.2. Característica de la Ceniza Volante

a. Color

Presenta color gris ya que es resultado de la combustión del carbón bajo condiciones reducidas de oxígeno. El color de la ceniza puede tender al gris o al negro, dependiendo de la fuente, la tendencia clara usualmente indica altos contenidos de cal, y de gris a negro indica altos contenidos de carbón

b. Granulometría

La distribución del tamaño de las partículas es razonablemente constante, varía de una fuente a otra debido a los métodos de precipitación que pueden tener de 3 a 5 etapas y las variaciones son causadas por la secuencia de eliminación de la ceniza precipitada.

c. Fineza

En varios países en que se cuenta con especificaciones para la ceniza volante se puede tener un grado de fineza mediante prueba de material retenido en la malla de 45 micras para controlar el grado de fineza.

d. Forma de la partícula

La ceniza volante tiene forma esférica y es un polvo granulado de características únicas, Sin embargo en la fracción más gruesa de 300 a 45 micras la mayoría de partículas son porosas y negras

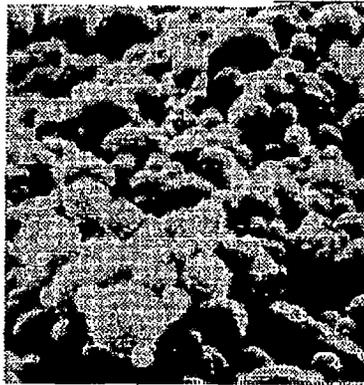


Figura N° 2.8.- Partículas de la ceniza volante

e. Densidad

La densidad de las cenizas volantes es una propiedad con un nivel de variación alto.

Composición química y mineralógica: La composición química de la ceniza volante contiene un mínimo de 70% de Oxido de Sílice (SiO_2), Oxido de Aluminio (Al_2O_3), Oxido de fierro (Fe_2O_3) y presenta un máximo de 5%.

2.3.3. Propiedades de la Ceniza Volante

De acuerdo con COKCA, E. (2003) las cenizas volantes presentan las siguientes propiedades:

- Capacidad reactiva, lo que las hace aptas para múltiples aplicaciones. Otra de sus propiedades es la puzolánica e hidráulica, aunque se necesita de un período más o menos largo de tiempo para que se manifieste su reactividad puzolánica.
- Las cenizas volantes aumentan la trabajabilidad del material en estado plástico, debido a un aumento en la dispersión de las partículas del sistema.

- Las cenizas volantes en los morteros disminuyen las expansiones asociadas a la reacción árido-álcalis, disminuyendo la pérdida por durabilidad.
- El contenido de agua libre (que no reacciona con el cemento) es mayor en presencia de cenizas volantes a primeras edades, y por lo tanto la porosidad del sistema también será mayor. Sin embargo, dado que las cenizas volantes aumentan la trabajabilidad, es posible reducir la relación agua / cemento, contrarrestando la mayor porosidad.
- Las resistencias mecánicas al utilizar cenizas volantes serán menores en las primeras edades, comparadas con las alcanzadas en cementos Portland. Las cenizas actúan como un diluyente inerte, durante el tiempo de incubación de la reacción puzolánica. A edades largas se produce un refinamiento de la estructura porosa debido a la evolución de la actividad puzolánica.
- Las cenizas volantes reducen el calor de hidratación en el cemento debido al menor contenido de alita (C3S) procedente del clínker Portland. Este compuesto es el responsable en su mayor parte del calor desprendido durante la hidratación del cemento Portland. La reacción puzolánica también es exotérmica, pero su desprendimiento es progresivo en el tiempo.
- Las cenizas volantes incorporadas al cemento mejoran su durabilidad en determinados ambientes sulfatados y de agua de mar. Esto se debe a una mayor impermeabilidad y a la reducción en el contenido de portlandita (SC3). Esto último, inhibe la formación de etringita expansiva. El aumento en la impermeabilidad se debe a que los productos formados durante la actividad puzolánica se depositan en el interior de los poros capilares interconectados, dificultando la penetración de los iones sulfato y cloruro.

Este subproducto industrial posee muchas ventajas para ser empleado en la construcción. Al tener un alto volumen de producción garantiza los volúmenes de suministro que se requieren en este sector; se constituye además, en un material con una reactividad tal que en determinadas condiciones puede comportarse de manera similar como lo hace un cemento Portland y al presentarse en estado pulverulento, hace innecesario cualquier tipo de transformación previa a su uso, constituyéndose además en una materia prima viable económicamente. Las cenizas volantes permiten que la industria del concreto utilice grandes cantidades de este material cementante suplementario con el fin de reducir el consumo de cemento Portland por unidad de volumen de hormigón.

2.4. SUELO ARCILLOSO

El suelo arcilloso natural se obtuvo en el talud del km. 132, lado derecho de la carretera Villarica - Puerto Bermúdez, correspondiente a zona de selva central, ubicada en la provincia de Oxapampa y departamento de Pasco, ver Figura N° 2.9 y Figura N° 2.10.

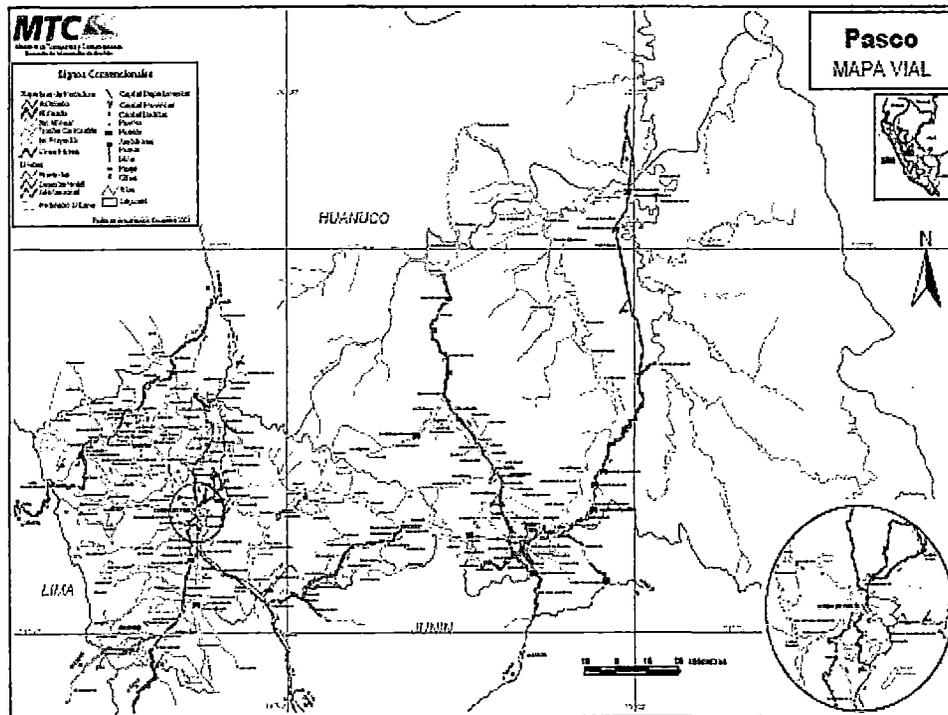


Figura N° 2.9.- Ubicación de la zona en estudio



Figura N° 2.10.- Vista del lugar de obtención de la arcilla en Villarrica

CAPÍTULO 3 ENSAYOS DE LABORATORIO Y RESULTADOS

Los ensayos de laboratorio fueron realizados tanto al suelo arcilloso así como también a la mezcla de suelo arcilloso con ceniza volante en proporciones adecuadas: con la finalidad de determinar propiedades y parámetros geotécnicos de las muestras indicadas, para lo cual fueron ejecutados los ensayos de caracterización física y ensayos especiales.

Cabe resaltar que los ensayos de laboratorio fueron realizados en el Laboratorio N°02 Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería. Estos ensayos se realizaron según lo especificado en el manual de ensayos de materiales para carreteras del Ministerio de Transporte y Comunicaciones.

Los registros y fotografías de los ensayos realizados se encuentran en los Anexos C y E respectivamente, en este capítulo se especificará un cuadro resumen de éstos.

Los ensayos realizados y normas usadas son las siguientes:

Ensayos estándar

- Análisis Granulométrico por Tamizado ASTM D-422, MTC E107
- Análisis Granulométrico por Método del Hidrómetro ASTM D-422
- Límite Líquido ASTM D-4318, MTC E110
- Límite Plástico ASTM D-4318, MTC E111
- Clasificación SUCS ASTM D-2487
- Gravedad Específica ASTM D854.

Ensayos Especiales

- Próctor Modificado ASTM D-1557, MTC – E115
- California Bearing Ratio ASTM D-1883, MTC – E132,

Para las cenizas

- Caracterización Mineralógica (Difracción de Rayos X - DRX)
- Análisis de Materia Orgánica

3.1. ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS AL SUELO ARCILLOSO Y A LA MEZCLA DE SUELO ARCILLOSO CON CENIZA VOLANTE.

Estos ensayos han sido realizados, para determinar las propiedades físicas y químicas de la arcilla y a la mezcla con ceniza volante.

Los ensayos efectuados fueron:

3.1.1. Ensayos estándar

a. Análisis Granulométrico de suelos por tamizado

Representa la distribución de los tamaños que posee el agregado mediante el tamizado según especificaciones técnicas (Ensayo MTC EM 107) ver Tabla N°

3.1. A partir de la cual se puede estimar, con mayor o menor aproximación, las demás propiedades que pudieran interesar.

El análisis granulométrico de un suelo tiene por finalidad determinar la proporción de sus diferentes elementos constituyentes, clasificados en función de su tamaño. Ver Figura N° 3.1.



Figura N° 3.1.- Ensayo de análisis granulométrico de suelo por tamizado

De acuerdo al tamaño de las partículas de suelo, se definen los siguientes términos:

Tabla N° 3.1.- Clasificación de suelos según tamaño de partículas

Tipo de Material		Tamaño de las Partículas
Grava		75 mm - 4.75mm
Arena		Arena gruesa: 4.75 mm - 2.000 mm
		Arena media: 2.00 mm - 0.425 mm
		Arena fina: 0.425 mm - 0.075 mm
Material Fino	Limo	0.075 mm - 0.005 mm
	Arcilla	Menor a 0.005 mm

Fuente: Manual de Carreteras "Suelo, Geología, Geotecnia y Pavimentos"

El análisis de tamaño de partículas se realizó de acuerdo con la norma ASTM D 422. El suelo en cuestión está compuesto de una fracción gruesa y fina, por lo que se llevó a cabo esta prueba usando el material retenido en la malla N°200.

b. Análisis Granulométrico por método del hidrómetro

El hidrómetro se usa para determinar el porcentaje de partículas de suelos dispersados, que permanecen en suspensión en un determinado tiempo. Para ensayos de rutina con fines de clasificación, el análisis con hidrómetro se aplica a partículas de suelos que pasan el tamiz de 2.00 mm (No.10). Cuando se quiere más precisión, el análisis con hidrómetro se debe realizar a la fracción de suelo que pase el tamiz de 75 µm (No.200).

El análisis de hidrómetro utiliza la relación entre la velocidad de caída de esferas en un fluido, el diámetro de la esfera, el peso específico tanto de la esfera como del fluido y la viscosidad del fluido.

c. Límite líquido, límite Plástico e Índice de Plasticidad

Los límites de Atterberg, son: el límite líquido (LL) realizado según norma ASTM D 4318 ó MTC E 110 y el límite plástico (LP) realizado según norma ASTM D 4318 ó MTC E 111. Ver Figura N° 3.2.



Figura N° 3.2.- Ensayo de límite líquido con equipo de la copa de Casagrande

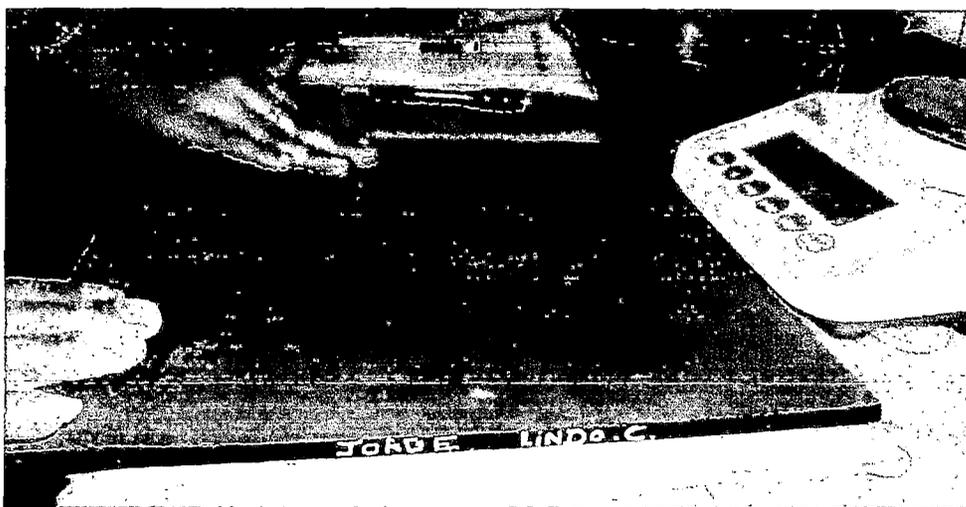


Figura N° 3.3.- Ensayo de límite plástico

El índice de plasticidad permite clasificar bastante un suelo. Un Índice Plástico (IP) alto corresponde a un suelo de alta plasticidad. Por el contrario, un IP bajo es característico de un suelo de baja a nula plasticidad. Sobre todo esto se puede dar en la clasificación siguiente de la Tabla N° 3.2.

Además del LL y del LP, una característica a obtener es el Índice de plasticidad IP (ensayo MTC EM 111) que se define como la diferencia entre LL y LP.

$$IP = LL - LP$$

El índice de plasticidad permite clasificar bastante bien un suelo. Un IP grande corresponde a un suelo muy arcilloso; por el contrario, un IP pequeño es característico de un suelo poco arcilloso. Sobre todo esto se puede dar la clasificación siguiente:

Tabla N° 3.2.- Clasificación de suelos según índice de plasticidad

Índice de Plasticidad	Características
IP>20	Suelos muy arcillosos
20>IP>10	Suelos arcillosos
10>IP>4	Suelos pocos arcillosos
IP=0	Suelos extensos de arcilla

Fuente: Manual de Carreteras "Suelo, Geología, Geotecnia y Pavimentos"

La Plasticidad es la propiedad de estabilidad que representa los suelos hasta cierto límite de humedad sin disgregarse, por tanto la plasticidad de un suelo depende, no de los elementos gruesos que contiene, sino únicamente de sus elementos finos. Se definen los límites correspondientes a los tres estados en los cuales puede presentarse un suelo: líquido, plástico o sólido

Se debe tener en cuenta que, en un suelo el contenido de arcilla, es el elemento más peligroso de una carretera, debido sobre todo a su gran sensibilidad al agua.

d. Gravedad específica

Relación de la masa de una unidad de volumen de un material a una temperatura determinada a la masa del mismo volumen de agua destilada libre de gas a la misma temperatura. La gravedad específica de un suelo se utiliza en el cálculo de las relaciones de fase de los suelos, en los cálculos de los ensayos de granulometría por sedimentación, compresibilidad y potencial de expansión.

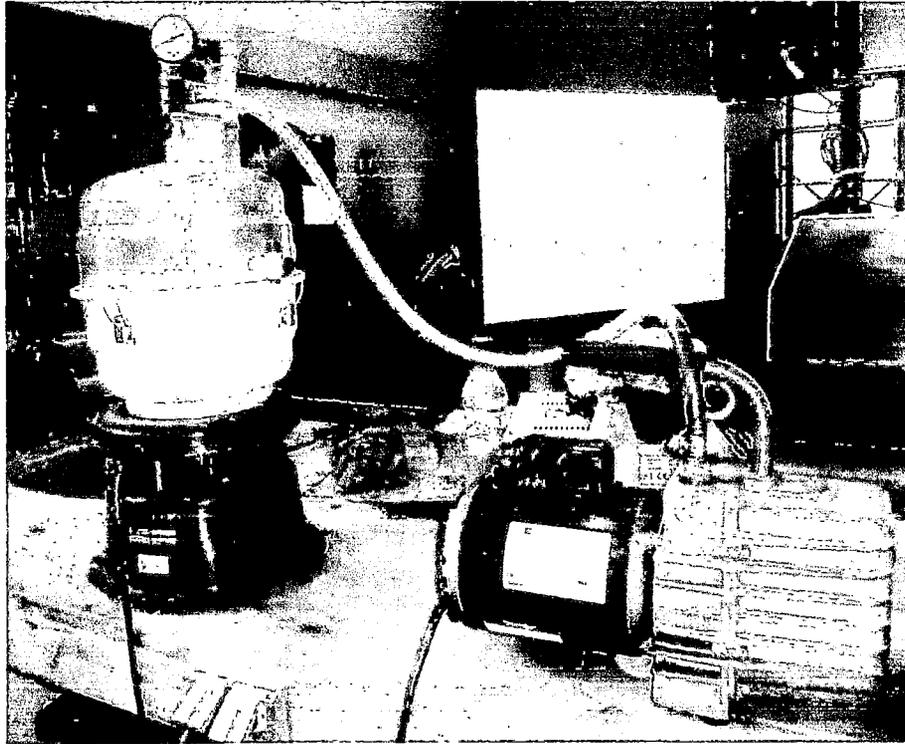


Figura N° 3.4.- Bomba de Vacíos utilizada en el Ensayo de Gravedad Específica

3.1.2. Ensayos especiales

a. Próctor Modificado:

Este ensayo abarca los procedimientos de compactación usados en Laboratorio, para determinar la relación entre el Contenido de Agua y el Peso Unitario Seco de los suelos (curva de compactación) compactados.

Se realizó el ensayo Próctor Modificado método A según norma ASTM D 1557.

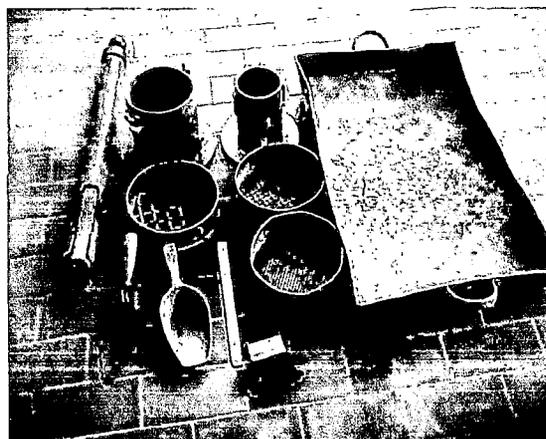


Figura N° 3.5.- Equipo usado en el ensayo de próctor modificado

b. Ensayos CBR

Este ensayo (MTC EM 132) se realizó, una vez que se haya clasificado los suelos por el sistema AASHTO, para caminos, se elaborará un perfil estratigráfico para cada sector homogéneo o tramo en estudio, a partir del cual se determinará los suelos que controlarán el diseño y se establecerá el programa de ensayos para establecer el CBR que es el valor soporte o resistencia del suelo, que estará referido al 95% de la MDS (Máxima Densidad Seca) y a una penetración de carga de 2.54 mm.

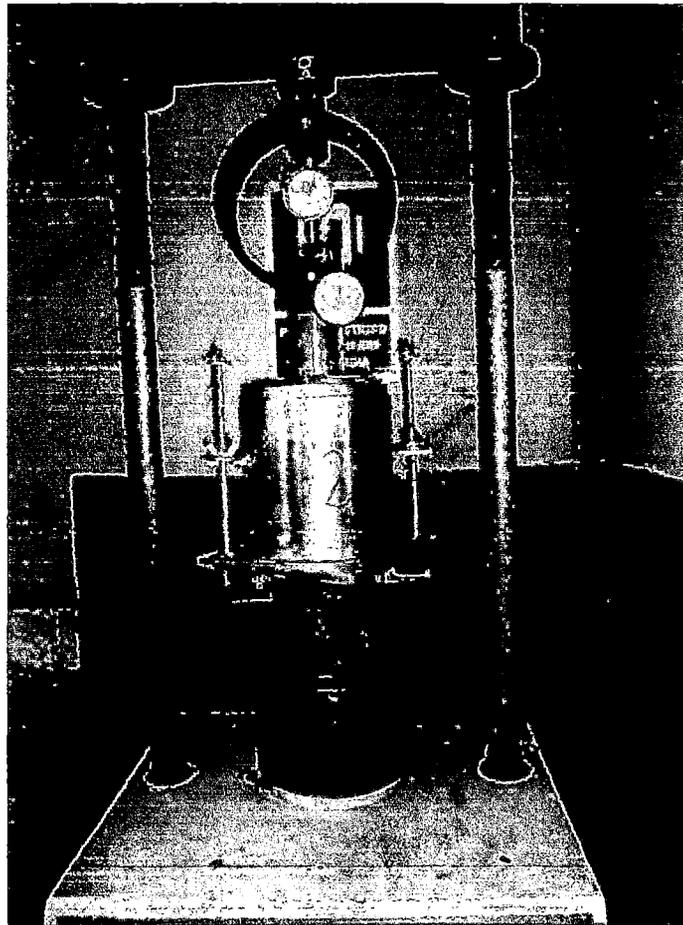


Figura N° 3.6.- Equipo de laboratorio usado para el ensayo de CBR

3.2. ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS AL SUELO Y CENIZA VOLANTE.

A la mezcla de suelo más ceniza volante se le realizó ensayos de tipo estándar y ensayos especiales, dichos ensayos se describen en el punto 3.1.

3.3. ENSAYOS DE LABORATORIO REALIZADOS A LA CENIZA VOLANTE.

Además de realizados los ensayos de caracterización de suelos, se ejecutaron también los análisis químicos de materia orgánica en el Laboratorio "LASA" Ingenieros y el Análisis Mineralógico de Difracción de Rayos "X" en el Laboratorio de INGEMMET.

3.3.1. Ensayos de Caracterización Química

Debido a que se trabaja con las cenizas volantes que son provenientes de residuos del carbón de una central termoeléctrica, es importante realizar las pruebas para la determinación de compuestos químicos, peligrosos o no. Así que para asegurar la viabilidad de utilizar este tipo de residuos en la mezcla con el suelo arcilloso y que no presente agresividad se ha realizado la caracterización mineralógica y el ensayo de materia orgánica del suelo y de la ceniza volante.

a. Caracterización Mineralógica (Difracción de Rayos X - DRX)

La composición química total de la muestra de cenizas y de la arcilla se obtuvo mediante la técnica de "Espectrometría de fluorescencia de rayos X dispersivo de energía".

Las muestras fueron examinadas por un espectrómetro de fluorescencia de rayos X modelo dispersivo de energía, de marca Shimadzu. Laboratorio de Rayos X (INGEMMET), SOFTWARE XRD 6000 VS. 4.1 que se ilustra en la Figura N° 3.7.



Figura N° 3.7.- Vista de Equipo de Laboratorio para Difracción de Rayos X

El espectrómetro de fluorescencia de rayos X es un instrumento que determina cualitativa y semi-cuantitativamente los elementos presentes en una muestra dada. Esto es posible mediante la aplicación de rayos X sobre la superficie de la muestra y posterior análisis de la fluorescencia de rayos X emitida. Es una técnica no destructiva para todos los tipos de muestras, incluyendo sólidos, líquidos o polvos, y por esta razón de interés para la caracterización de los materiales.

3.3.2. Análisis de Materia Orgánica

El ensayo se realizó por el método Walkley y Black. La materia orgánica es una mezcla heterogénea de sustancias de origen vegetal, animal y microbiana que, dentro del suelo, influyen sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas.

El método se basa en la oxidación por medio del Dicromato de Potasio que reacciona en un volumen con dos de Ácido Sulfúrico concentrado. El exceso de Dicromato de Potasio se determina valorando con solución de Sulfato Ferroso Amoniacal en presencia como indicador Difenilamina Sulfúrica.

Previamente a la determinación de materia orgánica debemos estar seguros que no existen sales de cloro ya que pueden ser la fuente de error, en caso que existan se deben eliminar las sales solubles antes de la determinación. En la Tabla N° 3.3 se muestra los niveles de materia orgánica.

Tabla N° 3.3.- Niveles de materia orgánica

Niveles de Contenido	Porcentaje de materia orgánica (%)
Bajo	0 – 2
Medio	2 – 4
Alto	Más de 4

3.4. MEZCLA DE SUELO ARCILLOSO Y CENIZA VOLANTE

El suelo arcilloso y las cenizas volantes se secaron en horno a 60°C y luego se almacenaron en bolsas plásticas. Las mezclas de suelo, ceniza volante y cemento se midieron en peso respectivamente de acuerdo a las proporciones

indicadas en Tabla N° 3.4 Proporción de mezcla y Símbolos Referentes a cada Material, donde se aprecia el material o mezcla ensayada, el porcentaje de suelo arcilloso, el % de Ceniza Volante y el símbolo correspondiente utilizado en la presente tesis por ejemplo: S= Suelo, CV= Ceniza Volante, S90/CV10 = Suelo 90% y Ceniza Volante =10% y así sucesivamente.

Tabla N° 3.4.- Proporción de mezcla y símbolos referentes a cada material.

Material/Mezcla	% de Suelo Arcilloso	% de Ceniza Volante	Símbolo
Suelo	100	0	S
Ceniza Volante	0	100	CV
Mezcla 1	90	10	S90/CV10
Mezcla 2	80	20	S80/CV20
Mezcla 3	70	30	S70/CV30
Mezcla 4	60	40	S60/CV40

3.5. RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

3.5.1. Ensayos Estándar

a. El análisis granulométrico por tamizado y por sedimentación de un suelo

Este ensayo tiene por finalidad determinar la proporción de sus diferentes elementos constituyentes, clasificados en función de su tamaño. Se obtuvo para cada proporción de mezcla. Ver Tabla N° 3.5 Resultados de Ensayos de Análisis Granulométrico por Tamizado y Tabla N° 3.6 Resultados de Ensayos de Análisis Granulométrico por Sedimentación.

Tabla N° 3.5.- Resultados de ensayos de análisis granulométrico por tamizado.

MUESTRA	Análisis Granulométrico por Tamizado		
	Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)
S	0	4.4	95.6
CV	0	3.1	96.9
S90/CV10	0	3.3	96.7

MUESTRA	Análisis Granulométrico por Tamizado		
	Gravas (%)	Arenas (%)	Finos (%)
S80/CV20	0	3.2	96.8
S70/CV30	0	4.6	95.4
S60/CV40	0	5.4	94.6

Tabla N° 3.6.- Resultados de ensayos de análisis granulométrico por sedimentación

MUESTRA	Análisis Granulométrico por sedimentación			
	Gravas (%)	Arenas (%)	Limos (%)	Arcillas y Coloides (%)
S	0	4.4	49.8	45.9
CV	0	3.1	93.9	3.1
S90/CV10	0	3.3	63.5	33.2
S80/CV20	0	3.2	56.8	40
S70/CV30	0	4.6	79.7	15.8
S60/CV40	0	5.4	79.7	14.9

b. Límites de Atterberg

Los ensayos para determinar el Límite Líquido (LL) y el Límite Plástico (LP), fueron realizados conforme a Norma ASTM D4318. En los resultados encontrados se puede observar que la ceniza volante no presenta plasticidad y que la arcilla es de alta plasticidad. A medida que se adiciona la ceniza volante en el suelo arcilloso la mezcla baja la plasticidad de la arcilla. En la Tabla N°3.7 Resultados de Límites de Consistencia e Índice de Plasticidad, se observan los resultados de Límite Líquido, Límite Plástico e Índice Plástico de la arcilla, ceniza volante y combinaciones en proporciones indicadas.

Tabla N° 3.7.- Resultados de límites de consistencia e índice de plasticidad

Material/Mezcla	Límites de Consistencia		
	Límite Líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice Plástico (%)
S	58	28	30
CV	-	NP	NP
S90/CV10	48	26	22
S80/CV20	46	25	21
S70/CV30	39	18	21
S60/CV40	34	19	15

c. Clasificación SUCS ASTM D-2487

Para la clasificación SUCS del material estudiado se realizaron según norma ASTM D-2487.

En la Tabla N° 3.8 Resultados de Ensayos de Clasificación SUCS; se observan los resultados de la clasificación de las muestras ensayadas, siendo desde un suelo de arcilla de alta plasticidad y la ceniza volante clasificada como limo arenoso y las demás combinaciones en las proporciones indicadas son clasificadas como arcilla.

Tabla N° 3.8.- Resultados de ensayos de clasificación SUCS

Material/Mezcla	Clasificación SUCS
S	CH
CV	ML
S90/CV10	CL
S80/CV20	CL
S70/CV30	CL
S60/CV40	CL

d. Gravedad Específica de Sólidos

Los ensayos de gravedad específica se realizaron según norma ASTM D698. En la Tabla N° 3.9 Resultados de Ensayos de Gravedad Especifica de Solidos; se presentan los resultados de ensayos, donde se observan que a medida que se adiciona la ceniza volante, aumenta el valor de la gravedad específica de sólidos.

Tabla N° 3.9.- Resultados de ensayos de gravedad específica de sólidos

Material/Mezcla	Gravedad Específica de Sólidos (Gs)
S	2.600
CV	2.415
S80/CV20	2.574
S70/CV30	2.584
S60/CV40	2.516

3.5.2. Ensayo especiales

a. Ensayo Próctor del suelo arcilloso y la mezcla suelo-ceniza

Los resultados de los Ensayos de Compactación de Materiales con Suelo y Ceniza Volante son presentados en la tabla N° 3.10. De los resultados se aprecia que la máxima densidad seca es mayor del suelo arcilloso y disminuye con la adición de la ceniza volante. También se observan las variaciones del Optimo Contenido de Humedad; siendo el máximo valor de la arcilla y la mezcla de arcilla y ceniza volante presenta humedad variable que disminuye a medida que se incrementa el contenido de ceniza volante en la mezcla.

Tabla N° 3.10.- Resultados de ensayos de compactación de materiales con suelo y ceniza volante

Material/Mezcla	Próctor Modificado	
	Óptimo Contenido de Humedad % (OCH)	Máxima Densidad Seca g/cm ³ (MDS)
S	24.3	1.648
S90/CV10	22	1.652
S80/CV20	22.5	1.655
S70/CV30	21.4	1.648
S60/CV40	18.6	1.65

b. Ensayo CBR

Los valores de expansión del ensayo de CBR obtenidos de las muestras ensayadas son presentados en las Tabla N° 3.11 Resultados de ensayos de Compactación de Materiales de Estudio entre Suelo Arcillosos y Ceniza Volante. El material de ceniza volante en diversas proporciones al ser combinado con la arcilla, produce una disminución considerable de la expansión del material desde 4.8%, correspondiente a un suelo arcilloso (CH), y baja a una expansión de 1.1% para una clasificación de suelo arcilloso (CL) en un 60% y mezclado con ceniza volante de 40%.

Tabla N° 3.11.- Resultados de ensayos de compactación de materiales de estudio entre suelo arcilloso y ceniza volante

Material/Mezcla	Expansión a los 4 días (%)
S	4.8
S90/CV10	2.6
S80/CV20	1.0
S70/CV30	2.1
S60/CV40	1.1

Tabla N° 3.12.- Resultados de ensayos de compactación de materiales de este estudio entre suelo arcilloso y ceniza volante

Símbolo	CBR al 100% de la MDS (%)
S	8.3
S90/CV10	13.1
S80/CV20	17.3
S70/CV30	12.7
S60/CV40	20.8

En la Tabla N°3.12 Resultados de Ensayos de Compactación de Materiales de este Estudio entre Suelo Arcilloso y Ceniza Volante; se presenta los resultados de ensayos de CBR al 100% de la MDS y al 95% de la MDS, obteniéndose valores desde 8.3% incrementándose hasta el valor de 20.8% de CBR al 100% de la MDS.

3.5.3. Ensayos de Caracterización Química

a. Composición Mineralógica de Materiales Investigados

Los resultados de la composición química de las muestras de suelo están presentados en las Tabla N° 3.13, Tabla N° 3.14 y la Tabla N° 3.15, ensayos que fueron realizados en el Laboratorio de INGEMMET. En la Figura N° 3.8, Figura N° 3.9, Figura N° 3.10 y Figura N° 3.11 se muestran las salidas gráficas del ensayo a las muestras de arcilla y ceniza estudiadas.

Los componentes principales del suelo arcilloso son SiO_2 , Al_2O_3 , y Fe_2O_3 , los cuales participan activamente en el proceso de estabilización (REZENDE, 1999).

Tabla N° 3.13.- Elementos químicos presentes en la arcilla

N°	Mineral	Fórmula	%
1	Cuarzo	SiO_2	89.37
2	Lepidolita	$\text{K}(\text{Li}, \text{Al})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{F}, \text{OH})_2$	4.78
3	Anatasa	TiO_2	2.15

N°	Mineral	Fórmula	%
4	Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	1.79
5	Hematita	Fe_2O_3	1.19
6	Gibbsita	$Al(OH)_3$	0.72

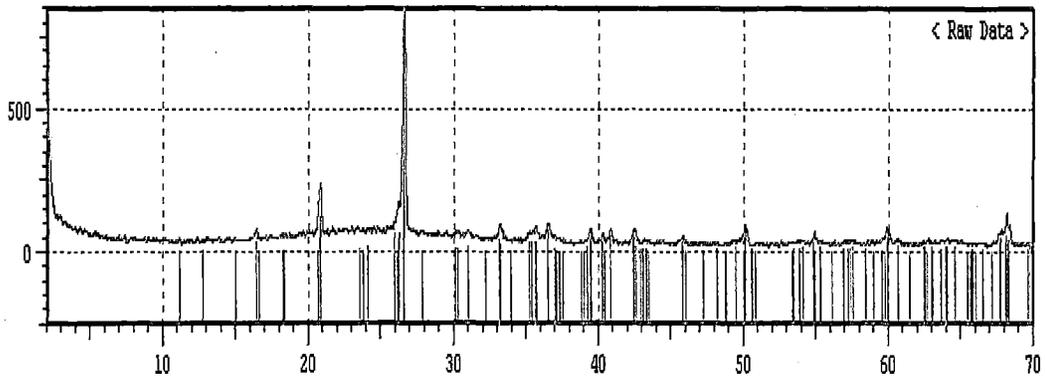
Tabla N° 3.14.- Elementos químicos presentes en la ceniza volante

N°	Mineral	Fórmula	%
1	Cuarzo	SiO_2	73.67
2	Amorfo	-	11.67
3	Mullita	$Al_6Si_2O_{13}$	6.5
4	Hematita	Fe_2O_3	3.5
5	Maghemita	Fe_2O_3	2.83
6	Magnetita	Fe_3O_4	1.83

Tabla N° 3.15.- Elementos químicos presentes en ceniza volante determinados en central termoeléctrica de Ilo 21

N°	Fórmula	%
1	SiO_2	57.1
2	Al_2O_3	28.7
3	Fe_2O_3	4.4
4	CaO	2
5	K_2O	2.6
6	MgO	0.72
7	TiO_2	1.3
8	ZrO_2	0.13
9	S	0.4
10	PbO	<200ppm
11	Cl-	0.09
12	SO_3	1

[GroupName] ORD EXT-2011 [DataName] OT 017-11 CENIZA VOLANTE [Date/Time] 11-08-11 10:04:06



No Card	Chemical Formula	Chemical Name	Mineral Name
1:46-1045	SiO ₂	Silicon Oxide	Quartz
2:15-0776	Al ₆ Si ₂ O ₁₃	Aluminum Silicate	Mullite
3:19-0629	Fe+2Fe ₂ +3O ₄	Iron Oxide	Magnetite
4:25-1402	Fe ₂ O ₃	Iron Oxide	Maghemite-\ITQ\R
5:33-0664	Fe ₂ O ₃	Iron Oxide	Hematite

Figura N° 3.8.- Difractograma detallado de la ceniza volante

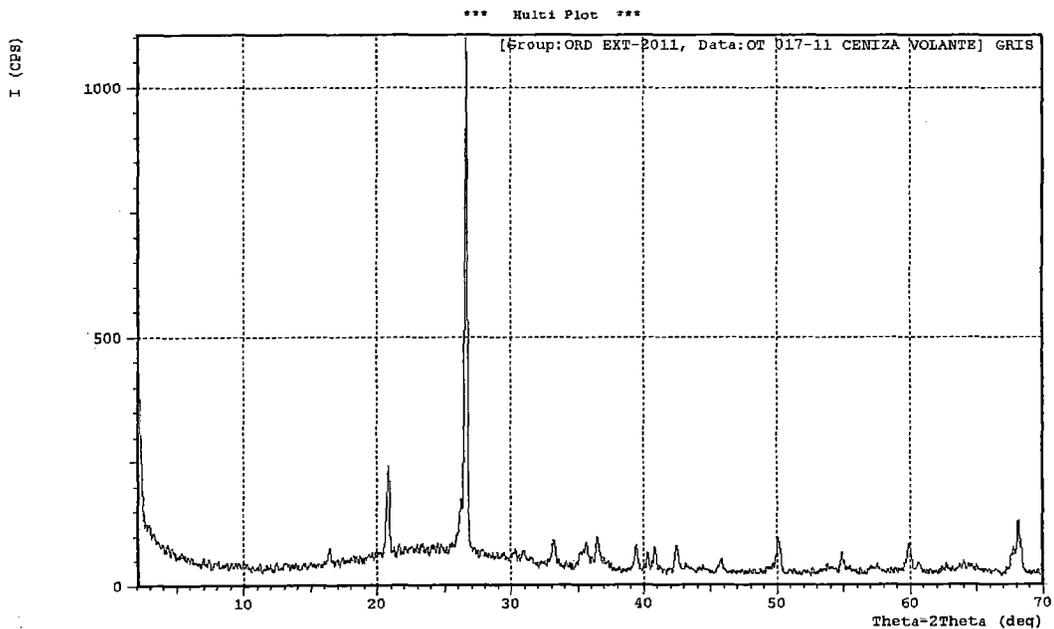
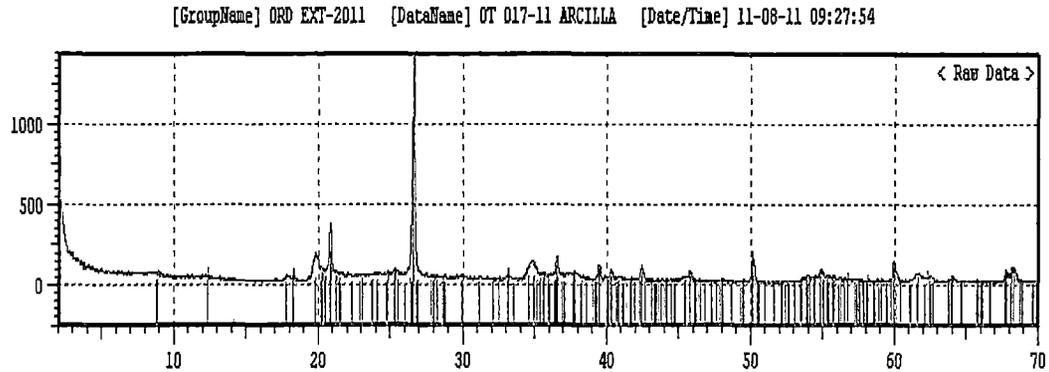


Figura N° 3.9.- Difractograma de la ceniza volante



No	Card	Chemical Formula	Chemical Name	Mineral Name
1	46-1045	SiO ₂	Silicon Oxide	Quartz
2	14-0164	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	Aluminum Silicate Hydroxid	Kaolinite-1\ITA\
3	33-0664	Fe ₂ O ₃	Iron Oxide	Hematite
4	21-1272	TiO ₂	Titanium Oxide	Anatase
5	24-0594	K(Li,Al) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀	Lithium Potassium Aluminum	Lepidolite-2\ITM
6	33-0018	Al(OH) ₃	Aluminum Hydroxide	Gibbsite

Figura N° 3.10.- Difractograma detallado de la arcilla

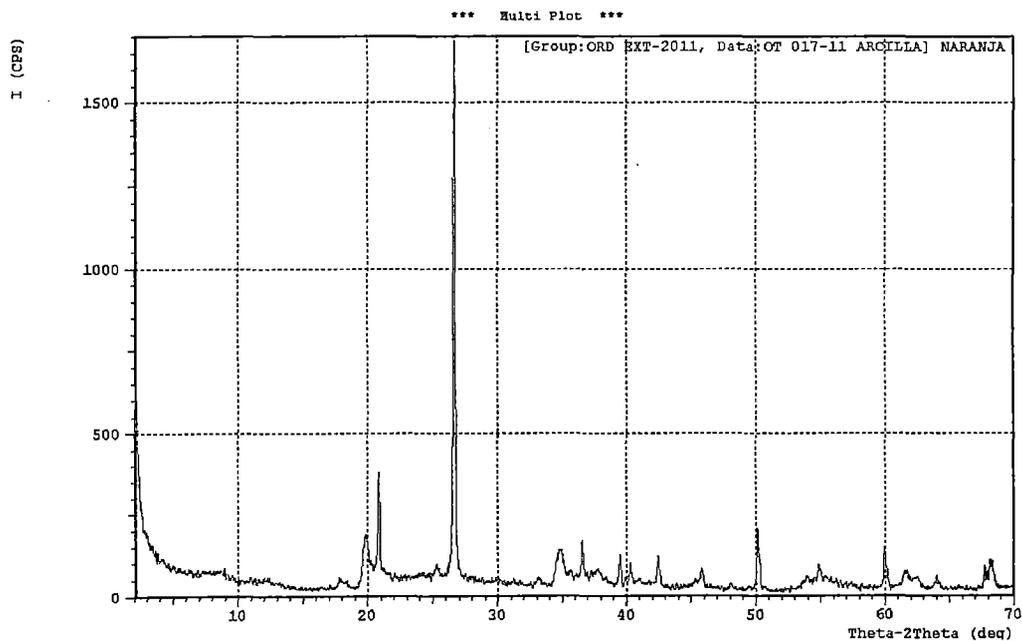


Figura N° 3.11.- Difractograma de la arcilla

b. Contenido de Materia Orgánica

Los resultados de ensayos de materia orgánica se presentan en la Tabla N° 3.16 Niveles de Materia Orgánica, donde se observa que la presencia de materia orgánica en la arcilla es baja y mientras que en la ceniza volante el contenido de materia orgánica es media.

Tabla N° 3.16.- Niveles de materia orgánica

Material	% de Materia Orgánica	Niveles de Materia Orgánica	Porcentaje (%)
Arcilla	0.24	Bajo	0 - 2
Ceniza Volante	3.7	Medio	2 - 4

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADO

4.1. ENSAYO ESTÁNDAR

4.1.1. Distribución granulométrica

En el Grafico N° 4.1 se presentan las curvas granulométricas correspondientes al suelo arcilloso, ceniza volante y combinaciones de las mismas en proporciones adecuadas e indicadas en el gráfico; los ensayos fueron realizados de acuerdo a la norma de ensayo ASTM D422.

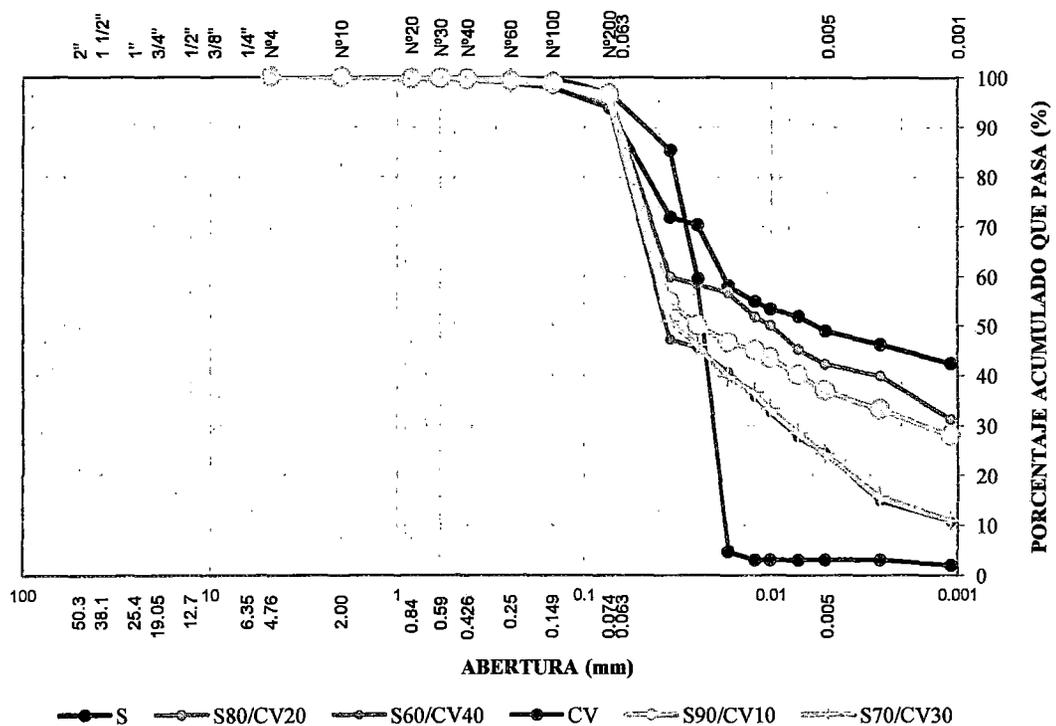


Grafico N° 4.1.- Curvas granulométricas de suelo arcilloso, ceniza volante y mezclas con ceniza volante

4.1.2. Límites de Atterberg

En el Grafico N° 4.2 y Grafico N° 4.3 se observa la variación de los resultados de los límites de consistencia del suelo arcilloso, ceniza volante y combinaciones entre ellas. En las gráficas siguientes se puede observar que a medida que se incrementa el contenido de ceniza volante disminuye la humedad de los valores de límites de consistencia e índice plástico.

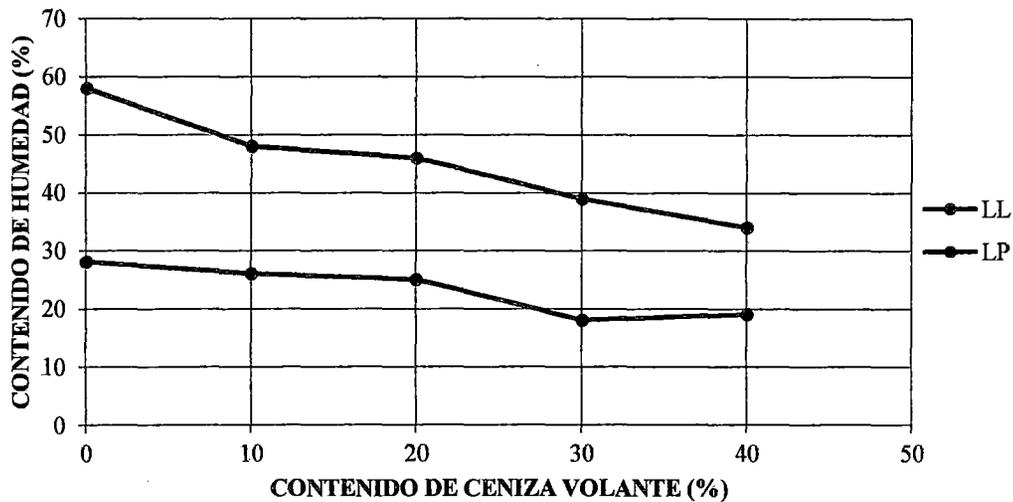


Grafico N° 4.2.- Variación de límites de consistencia con el contenido de ceniza volante

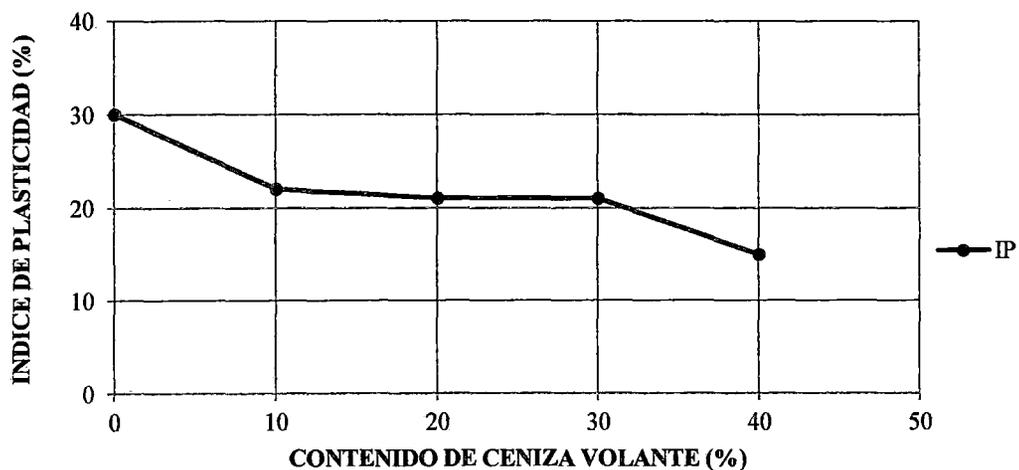


Grafico N° 4.3.- Variación de índice de plasticidad con el contenido de ceniza volante

4.1.3. Gravedad Específica de Sólidos

En el Grafico N° 4.4 se observan los resultados de ensayos, donde se observa una ligera variación en que a medida que se adiciona la ceniza volante, disminuye el valor de la gravedad específica de sólidos.

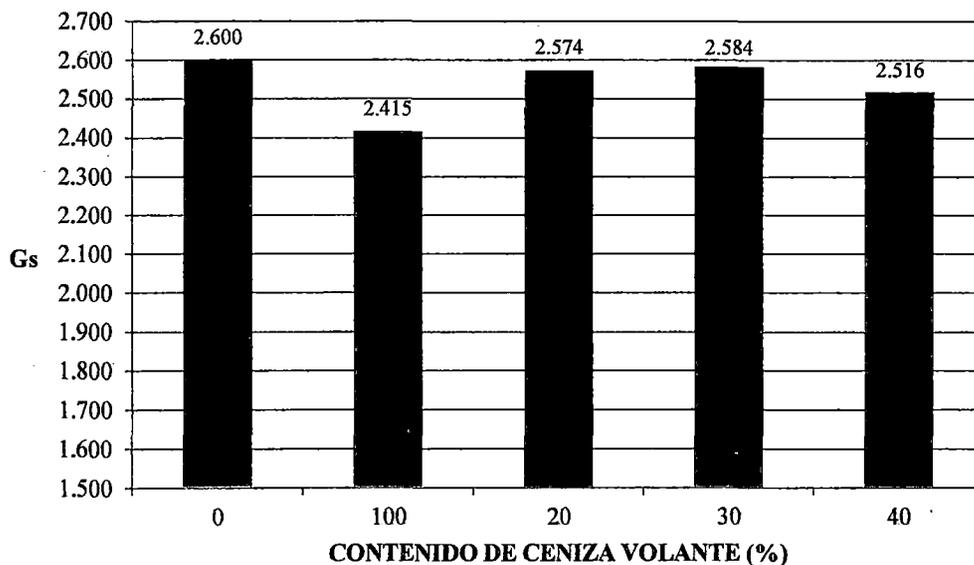


Gráfico N° 4.4.- Variación de la gravedad específica con el contenido de ceniza volante

4.2. ENSAYOS ESPECIALES

4.2.1. Variación del Ensayo Próctor Modificado con el Contenido de Ceniza Volante

De los resultados se aprecia en el Gráfico N° 4.5 que la máxima densidad seca varía ligeramente y disminuye con la adición de la ceniza volante.

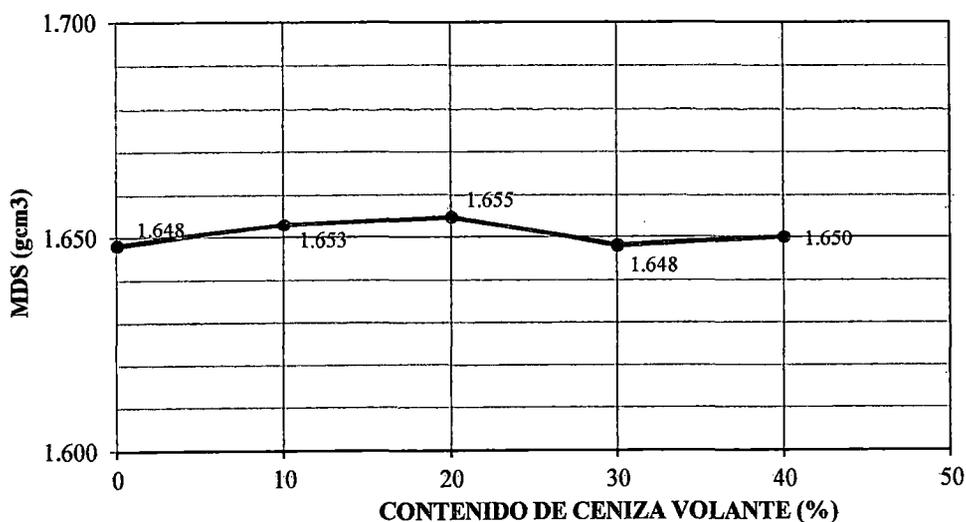


Gráfico N° 4.5.- Variación de la MDS con el contenido de humedad en mezclas de arcilla y ceniza volante

En el Grafico N° 4.6 se puede ver como el óptimo contenido de humedad disminuye a medida que se incrementa el contenido de ceniza volante en la arcilla.

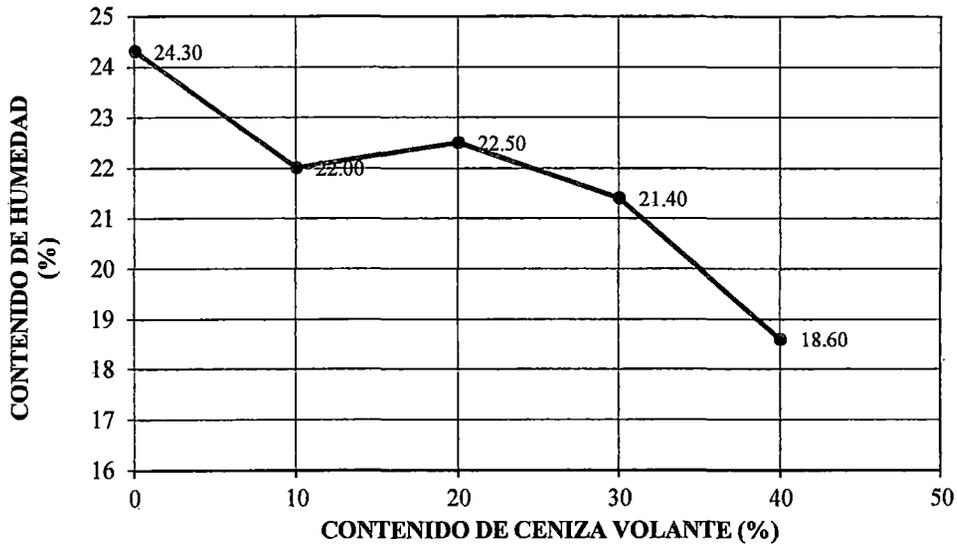


Grafico N° 4.6.- Variación del óptimo contenido de humedad y el contenido de ceniza volante

4.2.2. Ensayo CBR

En la Figura 5.19 se muestran los porcentajes de expansión de los ensayos CBR. Se observa que el valor de la expansión disminuye a medida que se incrementa el contenido de ceniza volante.

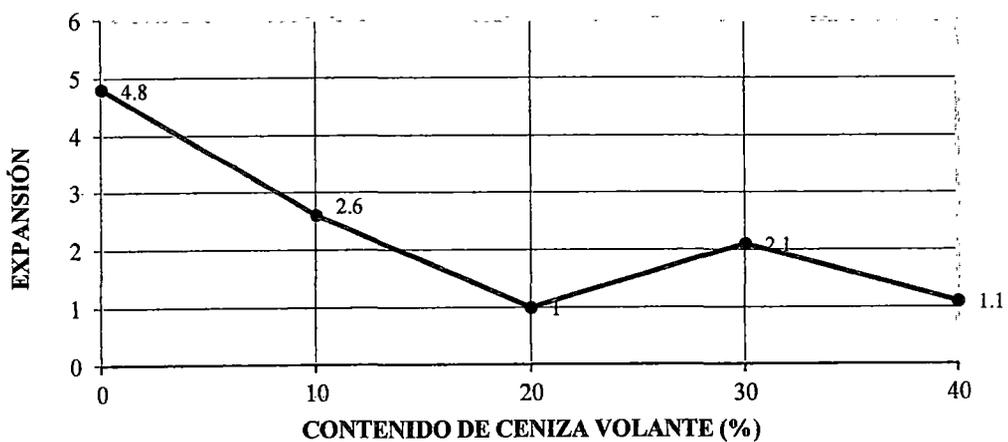


Grafico N° 4.7.- Variación de la expansión en la mezcla y contenido de ceniza volante

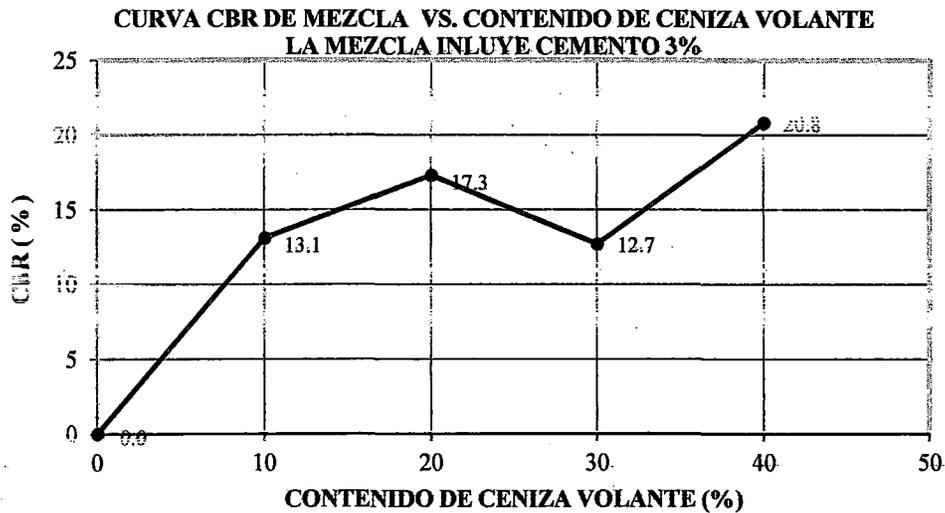


Grafico N° 4.8.- Curva de CBR de la mezcla vs contenido de ceniza volante.

En el Grafico N° 4.8 se observa el incremento del valor de CBR al 100% de la MDS desde un valor de 131 hasta un valor de 20.8%.

4.3. DIMENSIONAMIENTO DE PAVIMENTO TÍPICO

El método de diseño de pavimentos NAASRA: Consiste en el dimensionamiento de los espesores de la capa de afirmado, que se adoptó como representativa la siguiente ecuación del método NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities (hoy AUSTROADS) que relaciona el valor de soporte del suelo (CBR) y la carga actuante sobre el afirmado, expresada en número de repeticiones de EE (ejes equivalentes). En la Figura 4.1 se aprecia las curvas para subrasante de acuerdo a los CBRs obtenidos de ensayos en la misma y de acuerdo al tráfico ligero, se puede obtener el espesor de la capa de afirmado.

$$e = [219 - 211x \log_{10} \text{CBR} + 58x(\log_{10} \text{CBR})^2]x \log_{10} \left(\frac{N_{rep}}{120} \right)$$

Dónde:

e = espesor de la capa de afirmado en mm.

CBR= valor de CBR de la subrasante.

Nrep= número de repeticiones de EE para el carril de diseño.

Para el diseño de la estructura del pavimento se ha considerado un tráfico ligero para vías rurales de 119,1821.66 EE, considerando solo una capa de afirmado en la superficie. Asimismo se ha utilizado el método NAASRA, ver Figura N° 4.1 Curvas para Determinar el Espesor de Capa de Revestimiento Granular, asimismo se ha considerado un período de diseño de 5 años. En el Grafico N° 4.9 se presenta como disminuye los espesores de la capa de revestimiento granular en relación al contenido de ceniza volante. En la Tabla N°4.1, se muestran los resultados de espesores de revestimiento de las capas granulares donde se observan que a medida que se incrementa el contenido de ceniza volante el espesor de la capa de afirmado disminuye. Solo en el caso de la mezcla de Arcilla 70% y Ceniza Volante 30% se obtiene un valor menor de CBR, que en el ensayo más próximo por lo que en esta tesis se considera que la combinación de Arcilla 80% y Ceniza Volante 20% es la más adecuada y óptima.

Obteniéndose los siguientes resultados en el método NAASRA:

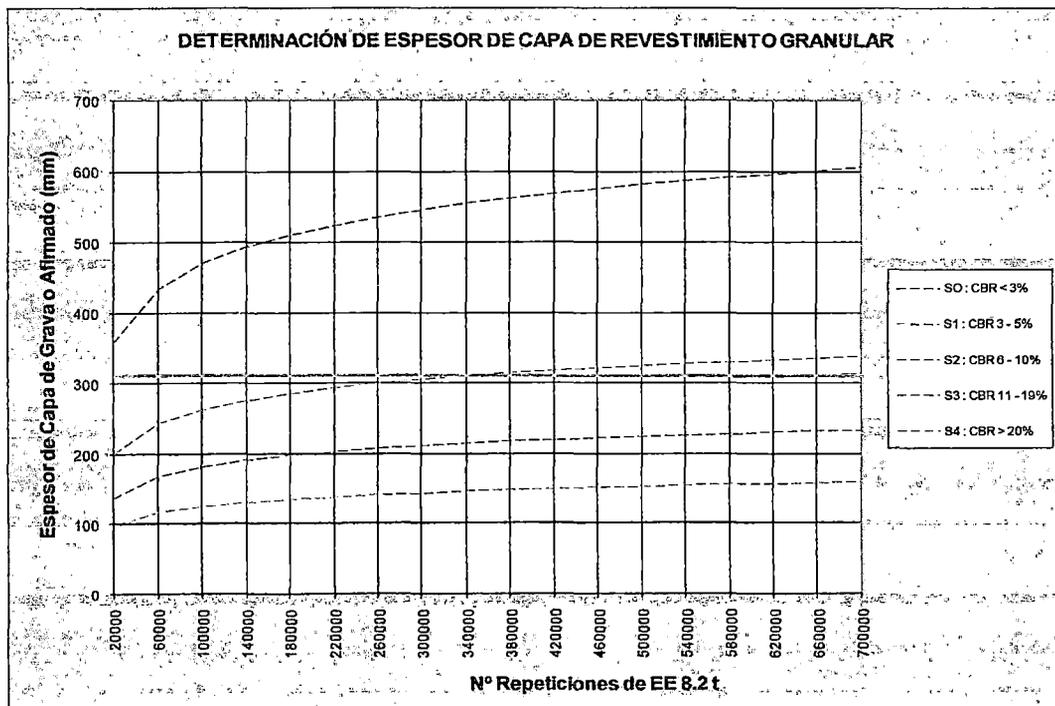


Figura N° 4.1.- Curvas para Determinar el Espesor de la Capa de Revestimiento Granular (MTC 2008)

Tabla N° 4.1.- Resultados de espesores de pavimento con diferentes contenidos de ceniza

Material/Mezcla	N (años)	CBR (100%) subrasante	N 18 (Equivalentes)	Espesor de la Capa de Rodadura (mm)
Suelo S	5	8.3	1191821.66	296
S90/CV10	5	13.1	1191821.66	222
S80/CV20	5	17.3	1191821.66	187
S70/CV30	5	12.7	1191821.66	227
S60/CV40	5	20.8	1191821.66	166

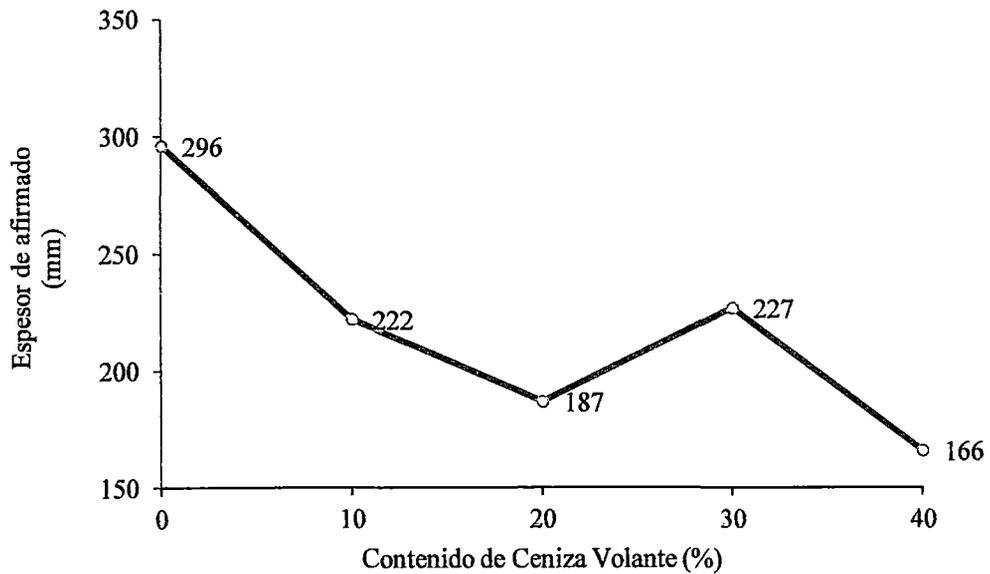


Gráfico N° 4.9.- Gráfico de curvas espesor de la capa de revestimiento granular y el contenido de ceniza volante

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

En la presente tesis luego de la aplicación de la ceniza volante en la arcilla, se puede concluir que es factible su empleo como estabilizador de la arcilla y su uso en el mejoramiento de la subrasante de carreteras.

La ceniza volante mejoró las propiedades de resistencia y de cohesión en las arcilla, las mejoras se sustentaron en los ensayos de laboratorio, que presentaron los siguientes resultados:

- La ceniza volante empleada es una ceniza tipo F, ya que la suma de porcentaje de sus principales constituyentes (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3) es mayor a 70%.
- Las cenizas volantes funcionan como aditivo inhibidor de las propiedades expansivas del material, pero este requiere ser adicionado en porcentajes no excesivos, al menos en el caso de una arcilla expansiva, en promedio mayor a 20%.
- El ensayo de Difracción de Rayos X, muestra que el suelo arcilloso y la ceniza volante están constituidos principalmente por Cuarzo (SiO_2).
- En el ensayo CBR la mezcla aumento su resistencia en un 9% con la proporción de 20% de ceniza volante y 80% de arcilla.
- La mezcla de arcilla con ceniza volante, de acuerdo a los resultados del ensayo próctor modificado, presenta mayor grado de compactación que aquella sin ceniza volante.
- El valor del CBR al 100% de la MDS, aumento considerablemente de 8.3% a 17.3% adicionándole la ceniza volante en la proporción de 20 %.

- A pesar que el suelo investigado no cumple con las especificaciones técnicas para ser usado como subrasante de carreteras, se logró que con la adición de ceniza volante en la proporción adecuada finalmente se tenga considerables mejoras en sus propiedades de resistencia.
- En este caso los equipos para la construcción de la carretera, son los mismos que los utilizados en cualquier obra de vías de transporte para el suelo arcilloso, lo cual es ventajoso para el trabajo.
- La adición de ceniza volante en la muestra de arcilla disminuye los efectos de expansión, gravedad específica, plasticidad y humedad de la arcilla.
- Por lo tanto se concluye que la aplicación de la ceniza volante, es una alternativa técnica y económicamente viable en su uso como subrasante mejorada para vías de bajo volumen de tránsito.

5.2 RECOMENDACIONES

- Esta alternativa de estabilización de subrasante se recomienda para carreteras de bajo volumen de tráfico.
- Se recomienda incrementar la investigación con la ceniza volante adicionando cemento y/o cal para su mejora como sub base y base.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

ACOSTA H.A., EDIL, T.B., BENSON, C.H. **"Soil stabilization and drying using fly ash"**. Geo Engineering Report No. 03-03 Department of Civil and Environmental Engineering, University of Wisconsin-Madison, 2003.

AMERICAN COAL ASH ASSOCIATION (ACAA) **Fly Ash Facts for Highway Engineers**. Edição 4.2003.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, CD 5239-98. **Standard Practice for Characterizing Fly Ash Use in Soil Stabilization**. Estados Unidos. 1998.

BOWLES, JOSEPH E. **"Manual de Laboratorio de Suelos en Ingeniería Civil"** Editorial McGraw-Hill de Latinoamérica S.A., Santafé de Bogotá. 1982,

CALDERON, G. **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos**. Dissertação de M.Sc. Departamento de Engenharia Civil. Pontificia Universidade Católica de Rio de Janeiro. 2010.

COKCA, E. **"Use of Class C fly ashes for the stabilization of an expansive soil."** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 127(7), 568-573. 2001

ERASMI, L. **Análise do Comportamento Mecânico e Ambiental de Misturas Solo- Cinzas de Carvão Mineral para Camadas de Base de Pavimentos**. Dissertação de M.Sc. Departamento de Engenharia Civil. Pontificia Universidade Católica de Rio de Janeiro. 2010.

FARIAS, Edney Rodrigues de. **A utilização de misturas solo/cinza pesada na pavimentação - análise de aspectos de comportamento mecânico e ambiental**. Dissertação de MSc., UFSC, Santa Catarina, SC, Brasil. 2005.

GARAGORRI, E **"Estabilización de suelos para carreteras en la selva"**, Tesis de Grado Profesional. Fac. Ingeniería Civil. UNI. Lima. Perú, 1994.

GARCIA, C, **Reutilización de cenizas de centrales térmicas**. Ambient 2002-2003 (2003). Edición 23. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, pág. 43-46.

LAMBE, T. W. & WITHMAN, R. **Mecánica de Suelos**. John Wiley & Sons, Inc. Editorial Limusa. México. 582 p. 1976.

MEDINA, J., **Apostila de Estabilização do Solos**. COPPE-URFJ (1987)

MTC, **Diseño de Carreteras No Pavimentadas de Bajo Volumen de Tránsito, Perú 2008**

MTC, **Manual de Carreteras Suelo, Geología, Geotecnia y Pavimentos 2013**

PEREZ COLLANTES, ROCIO DEL CARMEN, **Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de carbón para su uso como subrasante mejorado y/o sub base de pavimentos**. Tesis de Maestría, Fac. Ingeniería Civil. UNI. Lima. Peru, 2012.

PINTO, S., GUIDA, H. **Estudos de Estabilização de Solos**. Publicação técnica Nº 23.73 COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. Brasil. 1973.

PUENTES CAMPOS, Rolando A.. **"Estabilización de suelos para carreteras"**, Tesis de Titulación Profesional, Fac. Ingeniería Civil. UNI. Lima. Perú, 1994.

QUIROZ, R., **"Evaluación Energética y Económica de La Central Térmica a Carbón Ilo 21"**, Tesis para obtener El título de Ingeniería Mecánica / UNI-PERÚ. 2005.

ROHDE, G.M.; ZWONOK, O.; CHIES, F.; SILVA, N.I.W., **Cinzas de Carvão fóssil no Brasil –Aspectos Técnicos e ambientais**. Vol 1 Porto Alegre: CIENTEC, (2006)

SUMARIO DE ANEXOS

ANEXO A: NORMA TÉCNICA DE CENIZA VOLANTE

ANEXO B: REGISTROS DE ENSAYOS DE LABORATÓRIO

ANEXO C: REGISTROS DE ENSAYOS QUIMICOS

ANEXO D: PANEL FOTOGRÁFICO

ANEXO A
NORMA TÉCNICA DE CENIZA VOLANTE ASTM C618



Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete¹

This standard is issued under the fixed designation C 618; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope *

1.1 This specification covers coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete where cementitious or pozzolanic action, or both, is desired, or where other properties normally attributed to finely divided mineral admixtures may be desired, or where both objectives are to be achieved.

NOTE 1—Finely divided materials may tend to reduce the entrained air content of concrete. Hence, if a mineral admixture is added to any concrete for which entrainment of air is specified, provision should be made to ensure that the specified air content is maintained by air content tests and by use of additional air-entraining admixture or use of an air-entraining admixture in combination with air-entraining hydraulic cement.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.3 The text of this standard references notes and footnotes, which provide explanatory information. These notes and footnotes (excluding those in tables and figures) shall not be considered as requirements of the standard.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

C 125 Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates²

C 311 Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland-Cement Concrete²

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 The terms used in this specification are defined in Terminology C 125.

3.1.2 *fly ash*—the finely divided residue that results from the combustion of ground or powdered coal and that is transported by flue gasses.

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.24 on Ground Slag and Pozzolanic Admixtures.

Current edition approved Aug. 10, 2001. Published September 2001. Originally published as C618–68 T to replace C350 and C402. Last previous edition C618–00.

² *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.02.

NOTE 2—This definition of fly ash does not include, among other things, the residue resulting from: (1) the burning of municipal garbage or any other refuse with coal; (2) the injection of lime directly into the boiler for sulfur removal; or (3) the burning of industrial or municipal garbage in incinerators commonly known as “incinerator ash.”

4. Classification

4.1 *Class N*—Raw or calcined natural pozzolans that comply with the applicable requirements for the class as given herein, such as some diatomaceous earths; opaline cherts and shales; tuffs and volcanic ashes or pumicites, calcined or uncalcined; and various materials requiring calcination to induce satisfactory properties, such as some clays and shales.

4.2 *Class F*—Fly ash normally produced from burning anthracite or bituminous coal that meets the applicable requirements for this class as given herein. This class fly ash has pozzolanic properties.

4.3 *Class C*—Fly ash normally produced from lignite or subbituminous coal that meets the applicable requirements for this class as given herein. This class of fly ash, in addition to having pozzolanic properties, also has some cementitious properties.

NOTE 3—Some Class C fly ashes may contain lime contents higher than 10 %.

5. Ordering Information

5.1 The purchaser shall specify any supplementary optional physical requirements.

5.2 The purchaser shall indicate which procedure, A or B, shall be used when specifying requirements for effectiveness in contribution to sulfate resistance under Table 3.

6. Chemical Composition

6.1 Fly ash and natural pozzolans shall conform to the requirements as to chemical composition prescribed in Table 1.

7. Physical Properties

7.1 Fly ash and natural pozzolans shall conform to the physical requirements prescribed in Table 2. Supplementary optional physical requirements are shown in Table 3.

8. Methods of Sampling and Testing

8.1 Sample and test the mineral admixture in accordance

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

with the requirements of Test Methods C 311.

8.2 Use cement of the type proposed for use in the work and, if available, from the mill proposed as the source of the cement, in all tests requiring the use of hydraulic cement.

9. Storage and Inspection

9.1 The mineral admixture shall be stored in such a manner as to permit easy access for proper inspection and identification of each shipment.

9.2 Inspection of the material shall be made as agreed upon by the purchaser and the seller as part of the purchase contract.

10. Rejection

10.1 The purchaser has the right to reject material that fails to conform to the requirements of this specification. Rejection shall be reported to the producer or supplier promptly and in writing.

10.2 The purchaser has the right to reject packages varying more than 5 % from the stated weight. The purchaser also has the right to reject the entire shipment if the average weight of

the packages in any shipment, as shown by weighing 50 packages taken at random, is less than that specified.

10.3 The purchaser has the right to require that mineral admixture in storage prior to shipment for a period longer than 6 months after testing be retested. The purchaser has the right to reject such material if it fails to meet the fineness requirements.

11. Packaging and Package Marking

11.1 When the mineral admixture is delivered in packages, the class, name, and brand of the producer, and the weight of the material contained therein, shall be plainly marked on each package. Similar information shall be provided in the shipping invoices accompanying the shipment of packaged or bulk mineral admixture.

12. Keywords

12.1 fly ash; mineral admixtures; natural pozzolan; pozzolans

SUMMARY OF CHANGES

This section identifies the location of changes to this specification that have been incorporated since the last issue.

(1) Revised sections 5 and 6.

Chemical Requirements” was deleted.

(2) The Table previously titled “Supplementary Optional

TABLE 1 Chemical Requirements

	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
Silicon dioxide (SiO ₂) plus aluminum oxide (Al ₂ O ₃) plus iron oxide (Fe ₂ O ₃), min, %	70.0	70.0	50.0
Sulfur trioxide (SO ₃), max, %	4.0	5.0	5.0
Moisture content, max, %	3.0	3.0	3.0
Loss on ignition, max, %	10.0	6.0 ^A	6.0

^AThe use of Class F pozzolan containing up to 12.0 % loss on ignition may be approved by the user if either acceptable performance records or laboratory test results are made available.

TABLE 2 Physical Requirements

	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
Fineness:			
Amount retained when wet-sieved on 45 μm (No. 325) sieve, max, % ^A	34	34	34
Strength activity index:^B			
With portland cement, at 7 days, min, percent of control	75 ^C	75 ^C	75 ^C
With portland cement, at 28 days, min, percent of control	75 ^C	75 ^C	75 ^C
Water requirement, max, percent of control	115	105	105
Soundness:^D			
Autoclave expansion or contraction, max, %	0.8	0.8	0.8
Uniformity requirements:			
The density and fineness of individual samples shall not vary from the average established by the ten preceding tests, or by all preceding tests if the number is less than ten, by more than:			
Density, max variation from average, %	5	5	5
Percent retained on 45- μm (No. 325), max variation, percentage points from average	5	5	5

^ACare should be taken to avoid the retaining of agglomerations of extremely fine material.

^BThe *strength* activity index with portland cement is not to be considered a measure of the compressive strength of concrete containing the mineral admixture. The mass of mineral admixture specified for the test to determine the *strength* activity index with portland cement is not considered to be the proportion recommended for the concrete to be used in the work. The optimum amount of mineral admixture for any specific project is determined by the required properties of the concrete and other constituents of the concrete and is to be established by testing. *Strength* activity index with portland cement is a measure of reactivity with a given cement and may vary as to the source of both the mineral admixture and the cement.

^CMeeting the 7 day or 28 day *strength* activity index will indicate specification compliance.

^DIf the mineral admixture will constitute more than 20 % by weight of the cementitious material in the project mix design, the test specimens for autoclave expansion shall contain that anticipated percentage. Excessive autoclave expansion is highly significant in cases where water to mineral admixture and cement ratios are low, for example, in block or shotcrete mixes.

TABLE 3 Supplementary Optional Physical Requirements

NOTE 1—These optional requirements apply only when specifically requested.

	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
Multiple factor, calculated as the product of loss on ignition and fineness, amount retained when wet-sieved on 45- μm (No. 325) sieve, max, % ^A	...	255	...
Increase of drying shrinkage of mortar bars at 28 days, max, difference, in %, over control ^B	0.03	0.03	0.03
Uniformity Requirements:			
In addition, when air-entraining concrete is specified, the quantity of air-entraining agent required to produce an air content of 18.0 vol % of mortar shall not vary from the average established by the ten preceding tests or by all preceding tests if less than ten, by more than, %	20	20	20
Effectiveness in Controlling Alkali-Silica Reaction:^C			
Expansion of test mixture as percentage of low-alkali cement control, at 14 days, max, %	100	100	100
Effectiveness in Contributing to Sulfate Resistance:^D			
Procedure A:			
Expansion of test mixture:			
For moderate sulfate exposure after 6 months exposure, max, %	0.10	0.10	0.10
For high sulfate exposure after 6 months exposure, max, %	0.05	0.05	0.05
Procedure B:			
Expansion of test mixture as a percentage of sulfate resistance cement control after at least 6 months exposure, max,%	100	100	100

^AApplicable only for Class F mineral admixtures since the loss on ignition limitations predominate for Class C.

^BDetermination of compliance or noncompliance with the requirement relating to increase in drying shrinkage will be made only at the request of the purchaser.

^CMineral admixtures meeting this requirement are considered as effective in controlling alkali aggregate reactions as the use of the low-alkali control cement used in the evaluation. However, the mineral admixture shall be considered effective only when the mineral admixture is used at percentages by mass of the total cementitious material equal to or exceeding that used in the tests and when the alkali content of the cement to be used with the mineral admixture does not exceed that used in the tests by more than 0.05 %. See Appendix XI, Test Methods C 311.

^DFly ash or natural pozzolan shall be considered effective only when the fly ash or natural pozzolan is used at percentages, by mass, of the total cementitious material within 2 % of those that are successful in the test mixtures or between two percentages that are successful, and when the C_3A content of the project cement is less than, or equal to, that which was used in the test mixtures. See Appendix X2 of Test Method C 311.

 **C 618**

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).

ANEXO B
REGISTROS DE ENSAYOS DE LABORATÓRIO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITANTE : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis " Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Perú
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : ARCILLA 100%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

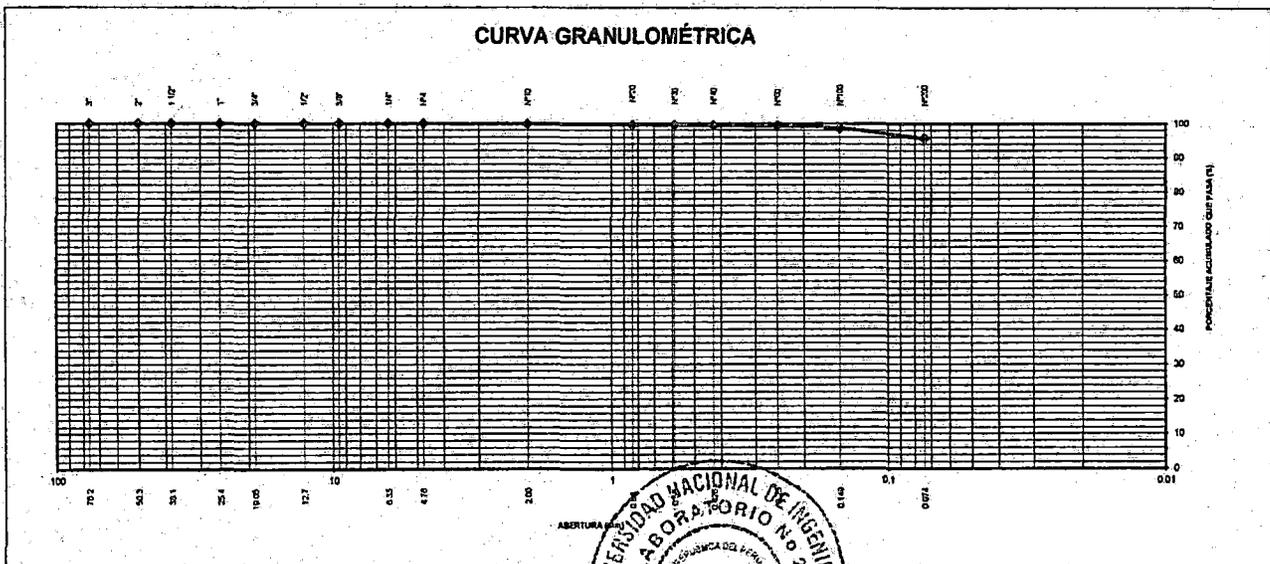
Tamiz	Abertura (mm)	(%) Parcial Retenido	(%) Acumulado	
			Retenido	Pasa
3"	76.200	-	-	100.0
2"	50.300	-	-	100.0
1 1/2"	38.100	-	-	100.0
1"	25.400	-	-	100.0
3/4"	19.050	-	-	100.0
1/2"	12.700	-	-	100.0
3/8"	9.525	-	-	100.0
1/4"	6.350	-	-	100.0
N°4	4.760	-	-	100.0
N°10	2.000	0.2	0.2	99.9
N°20	0.840	0.2	0.3	99.7
N°30	0.590	0.1	0.4	99.6
N°40	0.426	0.1	0.5	99.5
N°60	0.250	0.3	0.8	99.2
N°100	0.149	0.7	1.4	98.6
N°200	0.074	3.0	4.4	95.6
- N°200		95.6		

% grava	:	---
% arena	:	4.4
% finos	:	95.6

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318		
Límite Líquido (%)	:	58.00
Límite Plástico (%)	:	28.00
Índice Plástico (%)	:	30.00

Clasificación SUCS ASTM D2487 : CH

CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota: Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución: Téc. Jorge Lindo



Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
 Jefa del Laboratorio N° 2
 Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - EIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Ubicacion : -
Muestra : ARCILLA 100 %

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM - D422

Malla	(%) Acumulado que pasa
2"	
1 1/2"	
1"	
3/4"	
1/2"	
3/8"	
1/4"	
N° 4	100.0
N° 10	99.9
N° 20	99.7
N°30	99.6
N°40	99.5
N°50	99.2
N°100	98.6
N°200	95.6

Muestra Remitida e identificada por el solicitante



Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Ubicacion : -
Muestra : ARCILLA 100%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACION ASTM - D422

Diámetro Corregido (mm)	(%) Material que pasa
0.03841	64.55
0.02747	62.95
0.01776	58.15
0.01270	56.54
0.01048	54.94
0.00745	53.34
0.00532	51.74
0.00270	45.89
0.00113	41.09

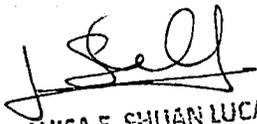
RESULTADOS :
Gravas (%) : 0.0
Arenas (%) : 4.4
Limos (%) : 49.8
Arcillas y Coloides (%) : 45.9

Muestra Remitida e identificada por el solicitante

Realizado por : tec. J. Lindo

Revisado por :




Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

ANALISIS GRANULOMETRICO POR SEDIMENTACION INFORME S12-422

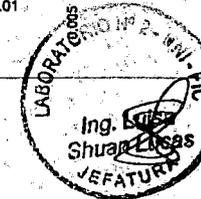
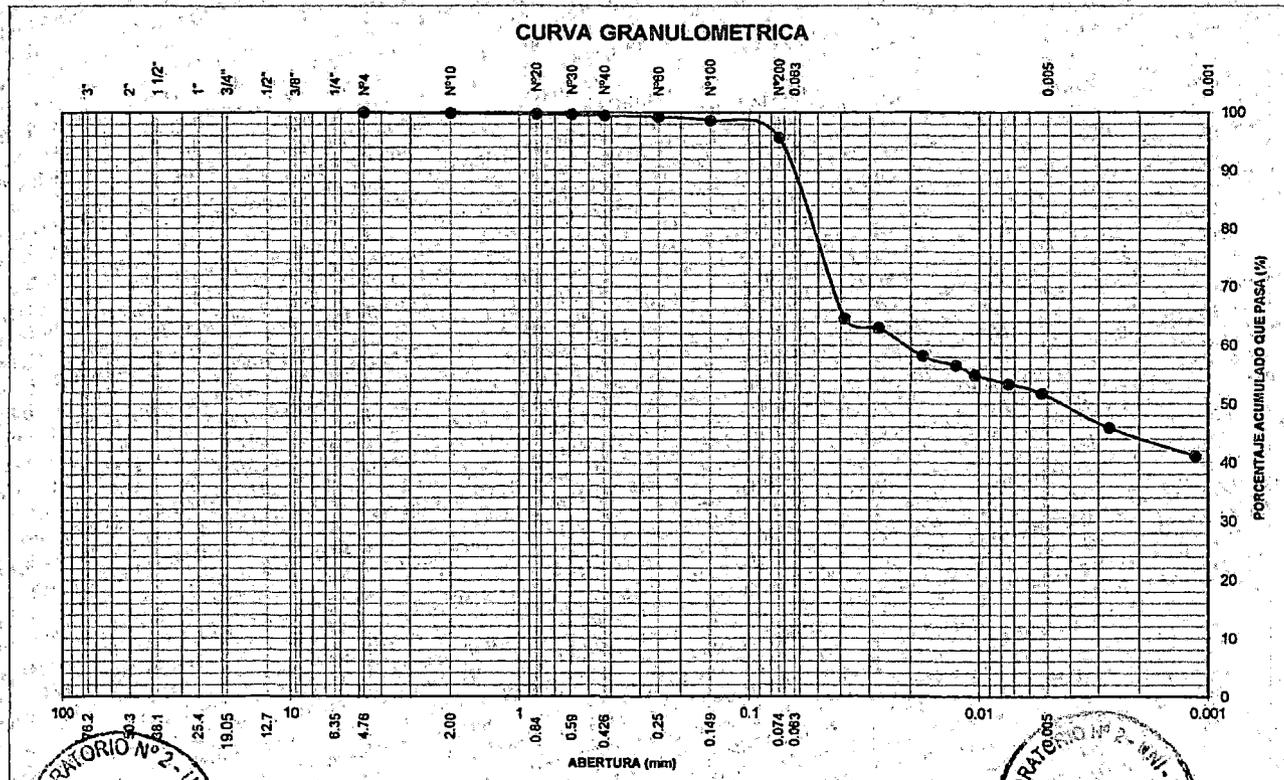
ASTM D-422

Solicitado : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
 Proyecto : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".

Ubicación :
 Muestra : ARCILLA 100%

Ubicación : Lima
 Fecha : 15 de Mayo del 2012

Tamiz	Abertura (mm.)	% que pasa
3"	76.200	
2"	50.300	
1 1/2"	38.100	
1"	25.400	
3/4"	19.050	
1/2"	12.700	
3/8"	9.525	
1/4"	6.350	
N°4	4.760	100.0
N°10	2.000	99.9
N°20	0.840	99.7
N°30	0.590	99.6
N°40	0.426	99.5
N°60	0.250	99.2
N°100	0.149	98.6
N°200	0.074	95.6
	0.038	64.6
	0.027	63.0
	0.018	58.1
	0.013	56.5
	0.010	54.9
	0.007	53.3
	0.005	51.7
	0.003	45.9
	0.001	41.1





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITANTE : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis " Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón
UBICACIÓN : para su uso como subrasante mejorada".
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS ASTM D-854

Muestra : Arcilla 100%

Peso Especifico Relativo de Sólidos : 2.60

Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución : Tec. J. Lindo




Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PÉREZ COLLANTES
 PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
 UBICACIÓN : LIMA, PERÚ
 FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) ASTM D1883 A

Muestra: ARCILLA 100%

a).- Ensayo Preliminar de Compactación

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557 (A)-91

Máxima Densidad Seca (gr/cm³) : 1.651
 Optimo Contenido de Humedad (%) : 24.3

b).- Compactación de moldes

MOLDE N°	I	II	III
N° de capas	5	5	5
Numero de golpes/capa	56	25	10
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.651	1.514	1.376
Contenido de Humedad	24.3	24.3	24.3

c).- Cuadro C.B.R. Para 0.1 pulg de Penetración

MOLDE N°	Penetración (pulg)	Presión Aplicada (Lb/pulg ²)	Presión Patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)
I	0.1	83	1000	8.3
II	0.1	48	1000	4.8
III	0.1	19	1000	1.9

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. : 8.3 %
 C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. : 6.2 %

d).- Expansión(%) : 4.8

Nota: La muestra fue remitida e identificada por el solicitante.

Ejecutado por: Jorge Lindo



Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
 Jefa del Laboratorio N°2
 Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

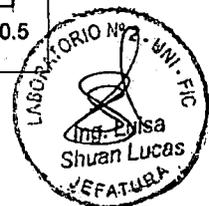
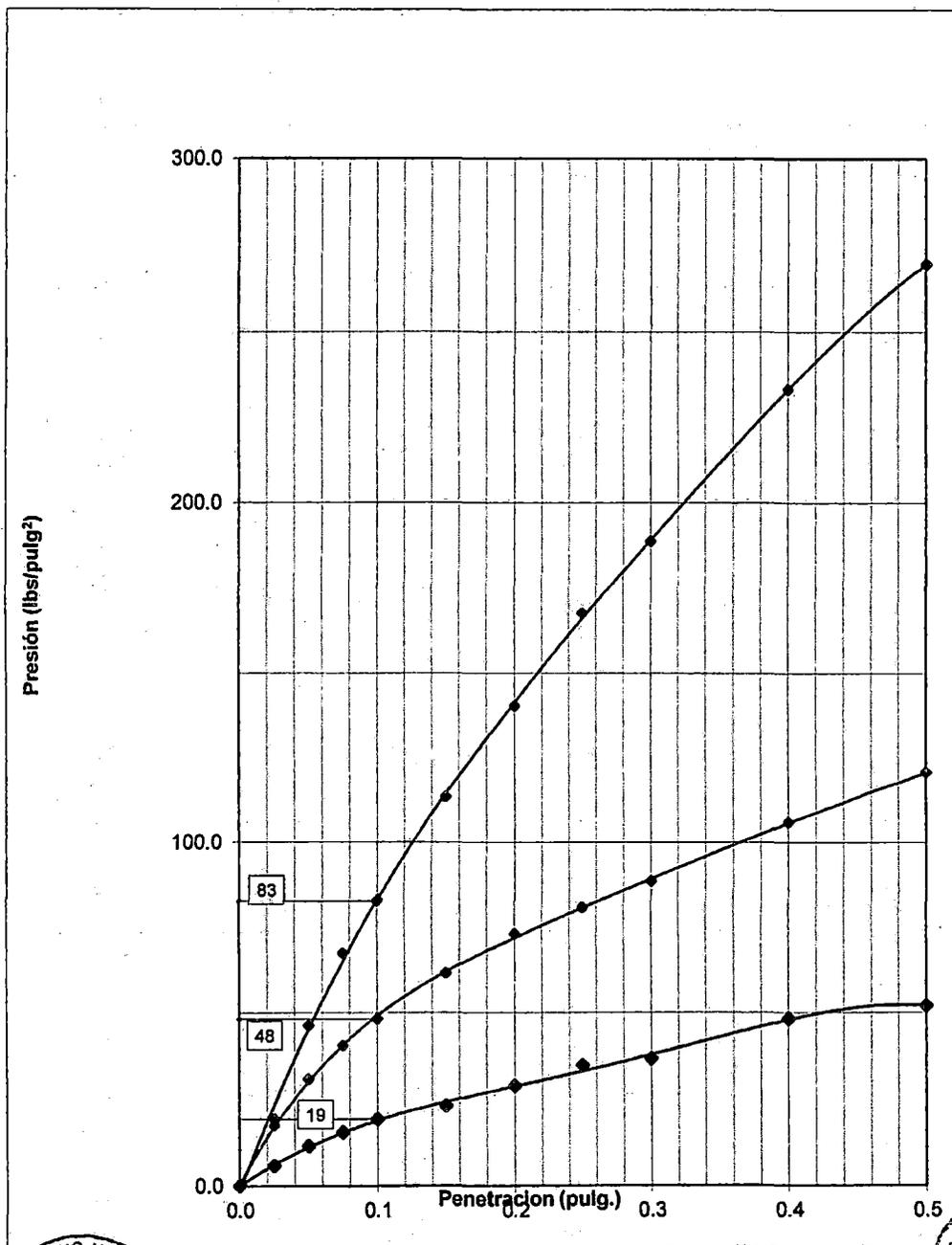
Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PÉREZ COLLANTES
PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : LIMA, PERÚ
FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) ASTM D 1883 (A)

Muestra: **ARCILLA 100%**





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

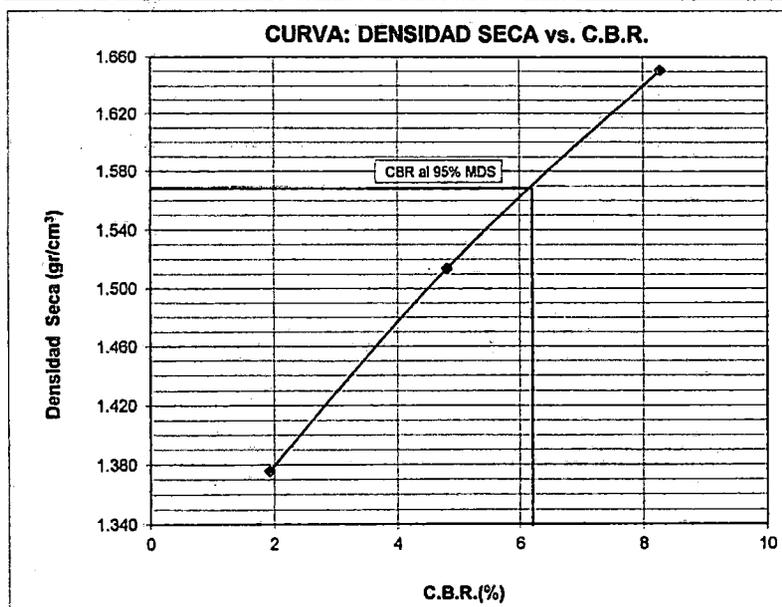
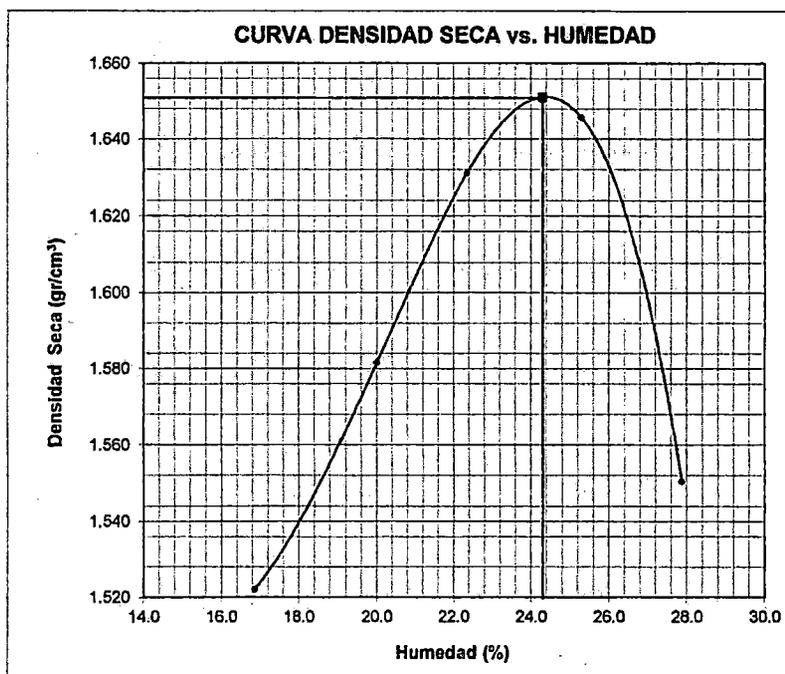
INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PÉREZ COLLANTES
 PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
 UBICACIÓN : LIMA, PERÚ
 FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) - ASTM D1883 (A)

Muestra: ARCILLA 100%

Máxima Densidad Seca (gr/cm^3) : 1.651
 Óptimo Contenido de Humedad (%) : 24.3
 CBR al 100% de la MDS (%) : 8.3
 CBR al 95% de la MDS (%) : 6.2





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITANTE : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis " Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Perú
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : CENIZA 100%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

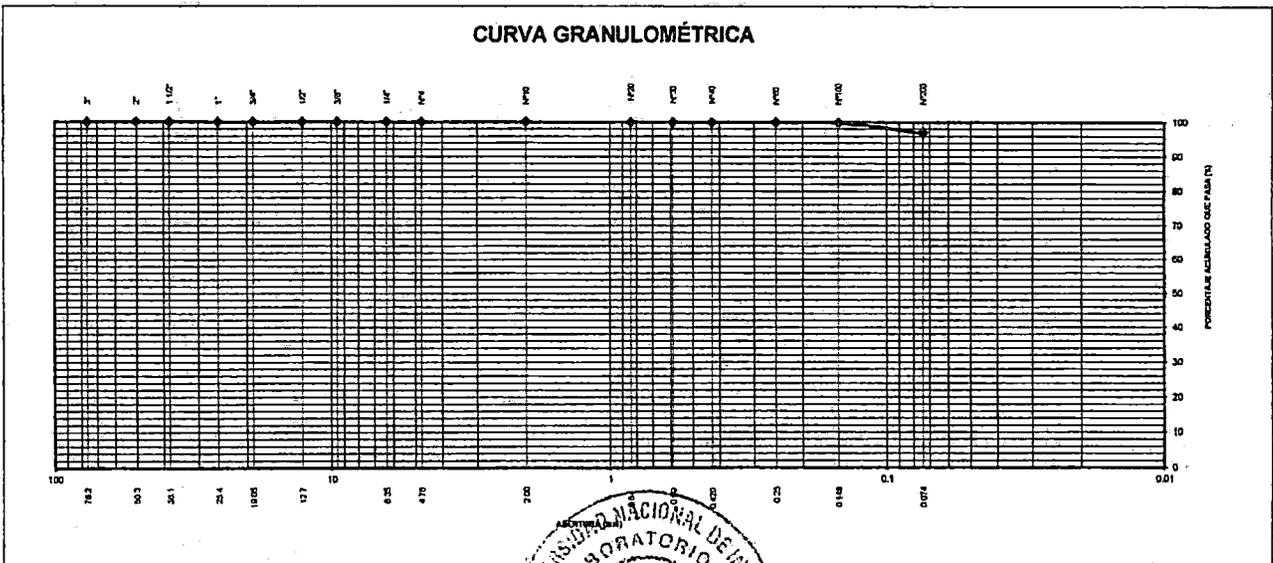
Tamiz	Abertura (mm)	(%) Parcial Retenido	(%) Acumulado	
			Retenido	Pasa
3"	76.200	-	-	100.0
2"	50.300	-	-	100.0
1 1/2"	38.100	-	-	100.0
1"	25.400	-	-	100.0
3/4"	19.050	-	-	100.0
1/2"	12.700	-	-	100.0
3/8"	9.525	-	-	100.0
1/4"	6.350	-	-	100.0
N°4	4.760	-	-	100.0
N°10	2.000	-	-	100.0
N°20	0.840	-	-	100.0
N°30	0.590	0.0	0.0	100.0
N°40	0.426	0.0	0.1	99.9
N°60	0.250	0.0	0.1	99.9
N°100	0.149	0.1	0.2	99.8
N°200	0.074	2.9	3.1	96.9
- N°200		96.9		

% grava	:	---
% arena	:	3.1
% finos	:	96.9

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318		
Límite Líquido (%)	:	-
Límite Plástico (%)	:	NP
Índice Plástico (%)	:	NP

Clasificación SUCS ASTM D2487 : ML

CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución N° 2 - UNI Téc. Jorge Lindo



[Signature]
 Ing. GUISA E. SHUAN LUCAS
 Jefa del Laboratorio N°2
 Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : Bach. Carolina Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis "Estabilización de Suelos arcillosos con cenizas de Carbón"
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Cantera : —
Muestra : CENIZA VOLANTE 100%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM - D422

Malla	(%) Acumulado que pasa
2"	
1 1/2"	
1"	
3/4"	
1/2"	
3/8"	
1/4"	
N° 4	
N° 10	
N° 20	
N° 30	100.0
N° 40	99.9
N° 50	99.9
N° 100	99.8
N° 200	96.9

Muestra Remitida e identificada por el solicitante

Ejecución : Tec. J. Lindo C.

Revisión : Ing. D. Basurto R.



Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N° 2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : Bach. Carolina Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis "Estabilización de Suelos arcillosos con cenizas de Carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : LIMA, PERÚ
FECHA : 15 de Mayo del 2012

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : CENIZA VOLANTE 100%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACION ASTM - D422

Diámetro Corregido (mm)	(%) Material que pasa
0.03666	85.36
0.03015	59.64
0.02367	4.78
0.01685	3.07
0.01376	3.07
0.00973	3.07
0.00688	3.07
0.00344	3.07
0.00143	2.02

RESULTADOS :

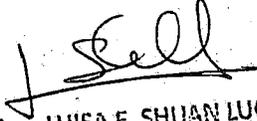
Gravas (%)	:	0.0
Arenas (%)	:	3.1
Limos (%)	:	93.9
Arcillas y Coloides (%)	:	3.1

Muestra Remitida e identificada por el solicitante

Ejecución : Tec. J. Lindo C.

Revisión : Ing. D. Basurto R.




Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

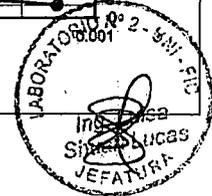
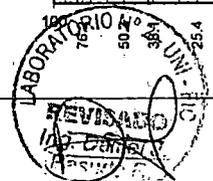
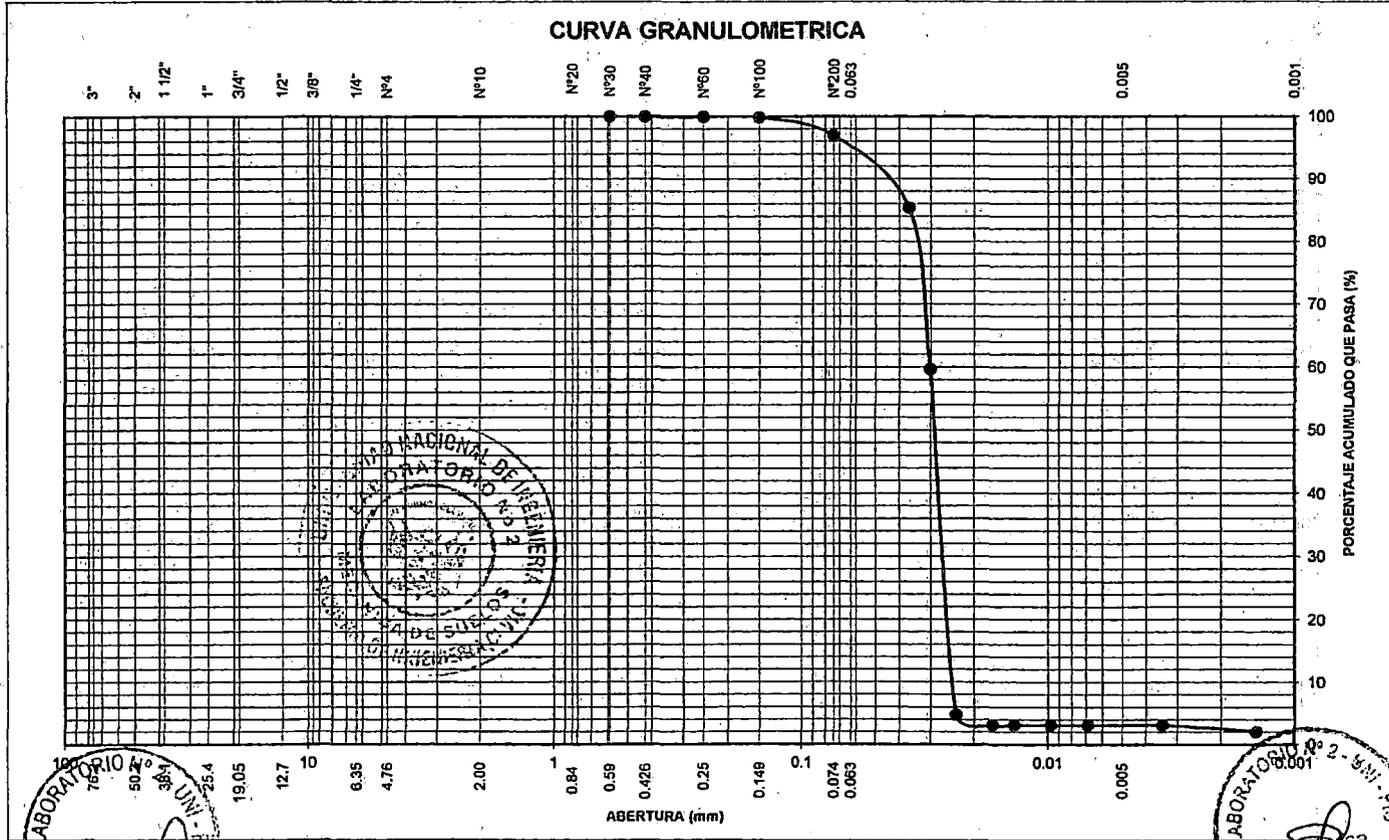
ANALISIS GRANULOMETRICO POR SEDIMENTACION INFORME S12-422

ASTM D-422

Solicitado : Bach. Carolina Pérez Collantes
 Proyecto : Tesis "Estabilización de Suelos arcillosos con cenizas de Carbón para su uso como subrasante mejorada".
 Ubicación : Lima
 Fecha : 15 de Mayo del 2012

Muestra CENIZA VOLANTE 100%

Tamiz	Abertura (mm.)	% que pasa
3"	76.200	
2"	50.300	
1 1/2"	38.100	
1"	25.400	
3/4"	19.050	
1/2"	12.700	
3/8"	9.525	
1/4"	6.350	
N°4	4.760	
N°10	2.000	
N°20	0.840	
N°30	0.590	100.0
N°40	0.426	99.9
N°60	0.250	99.9
N°100	0.149	99.8
N°200	0.074	96.9
	0.037	85.4
	0.030	59.6
	0.024	4.8
	0.017	3.1
	0.014	3.1
	0.010	3.1
	0.007	3.1
	0.003	3.1
	0.001	2.0





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITANTE : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis " Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

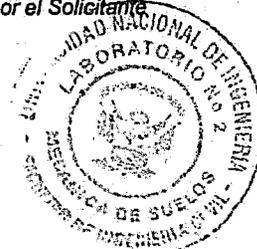
PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS ASTM D-854

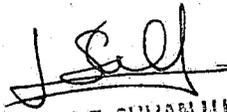
Muestra : CENIZA 100%

Peso Específico Relativo de Sólidos : 2.415

Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución Tec. J. Lindo




Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12 -422

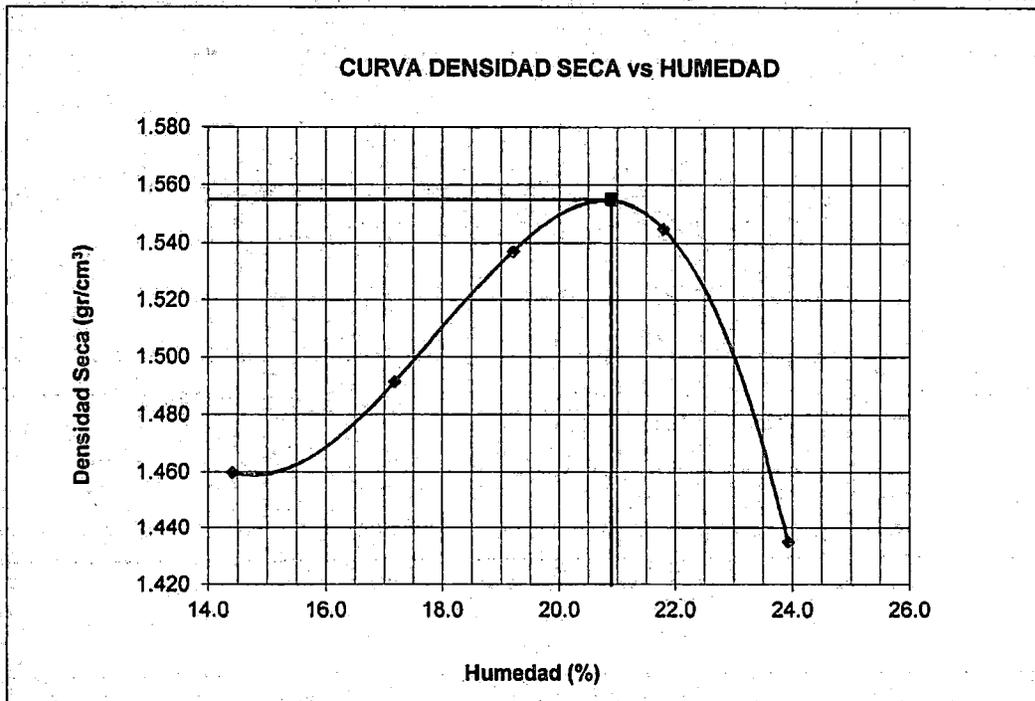
SOLICITANTE : Ing. Rocío Pérez Collantes
OBRA : Tesis "Estabilización de Suelos Arcillosos con Cenizas de Carbón
UBICACIÓN : Lima, Perú
FECHA : 09 de Marzo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ENSAYO PROCTOR MODIFICADO ASTM D1557

Muestra : Ceniza Volante

Método de Ensayo : A
Material : <N° 4
Máxima Densidad Seca (gr/cm³) : 1.555
Óptimo Contenido de Humedad (%) : 20.9



Nota: La muestra fue remitida e identificada por el Solicitante



Handwritten signature and typed name: Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS, Jefa del Laboratorio N°2, Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI- FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú. Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITANTE : Bach. Carolina Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis " Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Perú
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : ARCILLA 90% + CENIZA 10%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

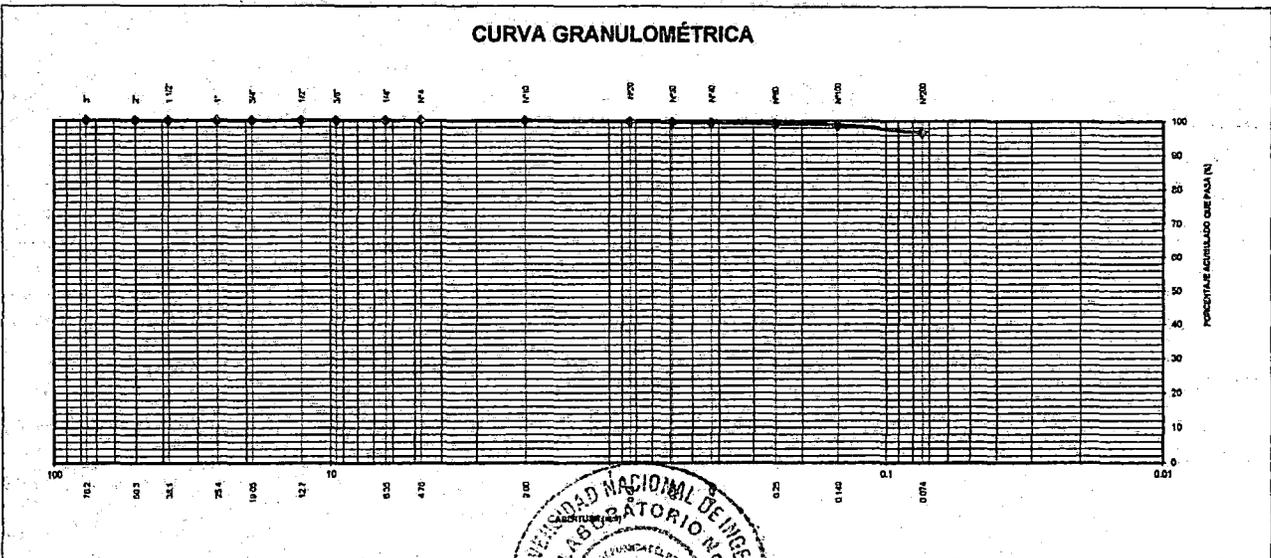
Tamiz	Abertura (mm)	(%) Parcial Retenido	(%) Acumulado	
			Retenido	Pasa
3"	76.200	-	-	100.0
2"	50.300	-	-	100.0
1 1/2"	38.100	-	-	100.0
1"	25.400	-	-	100.0
3/4"	19.050	-	-	100.0
1/2"	12.700	-	-	100.0
3/8"	9.525	-	-	100.0
1/4"	6.350	-	-	100.0
N°4	4.760	-	-	100.0
N°10	2.000	0.1	0.1	99.9
N°20	0.840	0.2	0.3	99.7
N°30	0.590	0.1	0.4	99.6
N°40	0.426	0.1	0.5	99.5
N°60	0.250	0.3	0.8	99.2
N°100	0.149	0.4	1.2	98.8
N°200	0.074	2.1	3.3	96.7
- N°200		96.7		

% grava	---
% arena	3.3
% finos	96.7

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318	
Límite Líquido (%)	48.00
Límite Plástico (%)	26.00
Índice Plástico (%)	22.00

Clasificación SUCS ASTM D2487 : CL

CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecutado en el Laboratorio N° 2 Mec. Jorge Lindo



[Signature]
Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
 Jefa del Laboratorio N°2
 Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Ubicacion : -
Muestra : ARCILLA 90% + CENIZA 10%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM - D422

Malla	(%) Acumulado que pasa
2"	
1 1/2"	
1"	
3/4"	
1/2"	
3/8"	
1/4"	
N° 4	100.0
N° 10	99.9
N° 20	99.7
N° 30	99.6
N° 40	99.5
N° 50	99.2
N° 100	98.8
N° 200	96.7

Muestra Remitida e identificada por el solicitante



Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de
UBICACIÓN : carbón para su uso como subrasante mejorada".
FECHA : 15 de Mayo del 2012

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Ubicacion : -
Muestra : ARCILLA 90% + CENIZA 10%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACION ASTM - D422

Diámetro Corregido (mm)	(%) Material que pasa
0.04177	54.87
0.03029	49.99
0.01944	46.73
0.01381	45.10
0.01139	43.48
0.00820	40.22
0.00588	36.96
0.00300	33.22
0.00127	28.01

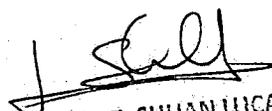
RESULTADOS :
Gravas (%) : 0.0
Arenas (%) : 3.3
Limos (%) : 63.5
Arcillas y Coloides (%) : 33.2

Muestra Remitida e identificada por el solicitante

Realizado por : tec. J. Lindo

Revisado por :




Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACIÓN INFORME S12-422

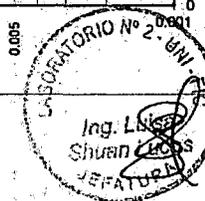
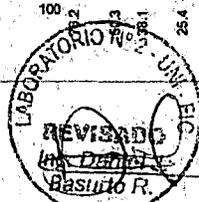
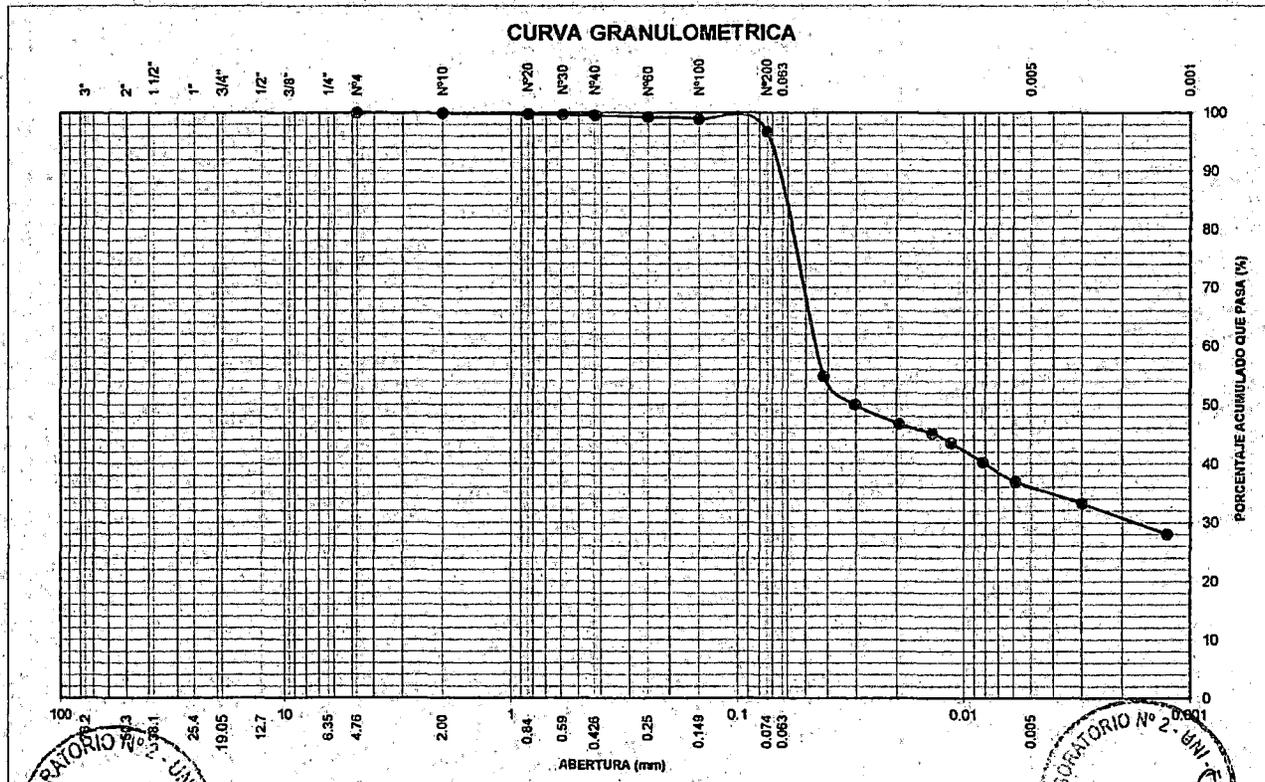
ASTM D-422

Solicitado : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
 Proyecto : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".

Ubicación : -
 Muestra : ARCILLA 90% + CENIZA 10%

Ubicación : Lima
 Fecha : 15 de Mayo del 2012

Tamiz	Abertura (mm.)	% que pasa
3"	76.200	
2"	50.300	
1 1/2"	38.100	
1"	25.400	
3/4"	19.050	
1/2"	12.700	
3/8"	9.525	
1/4"	6.350	
N°4	4.760	100.0
N°10	2.000	99.9
N°20	0.840	99.7
N°30	0.590	99.6
N°40	0.426	99.5
N°60	0.250	99.2
N°100	0.149	98.8
N°200	0.074	96.7
	0.042	54.9
	0.030	50.0
	0.019	46.7
	0.014	45.1
	0.011	43.5
	0.008	40.2
	0.006	37.0
	0.003	33.2
	0.001	28.0





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITANTE : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis " Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón
UBICACIÓN : para su uso como subrasante mejorada".
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS ASTM D-854

Muestra : ARCILLA 90% + GENIZA 10%

Peso Especifico Relativo de Sólidos : 1.546

Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución Tec. J. Lindo




ING. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : LIMA
FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) ASTM D1883 A

Muestra: ARCILLA 90% + CENIZA VOLANTE 10%

a).- Ensayo Preliminar de Compactación

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557 (A)-91

Máxima Densidad Seca (gr/cm³) : 1.652
Óptimo Contenido de Humedad (%) : 22.0

b).- Compactación de moldes

MOLDE N°	I	II	III
N° de capas	5	5	5
Numero de golpes/capa	56	25	10
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.652	1.558	1.481
Contenido de Humedad	22.0	22.1	22.0

c).- Cuadro C.B.R. Para 0.1 pulg de Penetración

MOLDE N°	Penetración (pulg)	Presión Aplicada (Lb/pulg ²)	Presión Patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)
I	0.1	131	1000	13.1
II	0.1	81	1000	8.1
III	0.1	58	1000	5.8

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. : 13.1 %

C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. : 8.6 %

d).- Expansión(%) : 2.6

Nota: La muestra fue remitida e identificada por el solicitante.

Ejecutado por: Jorge Lindo



Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

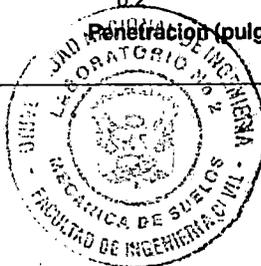
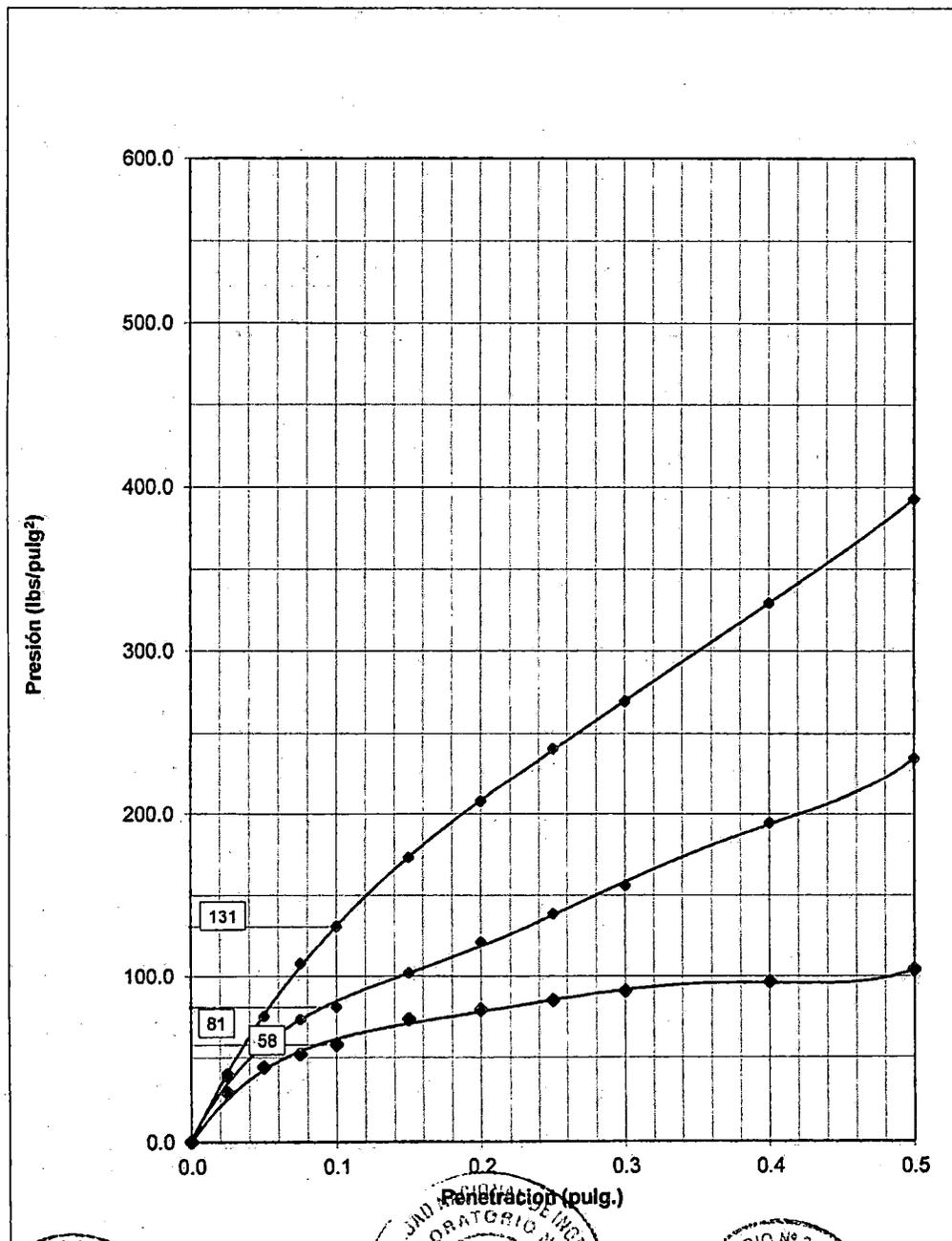
Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : LIMA
FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) ASTM D 1883 (A)

Muestra: **ARCILLA 90% + CENIZA VOLANTE 10%**





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

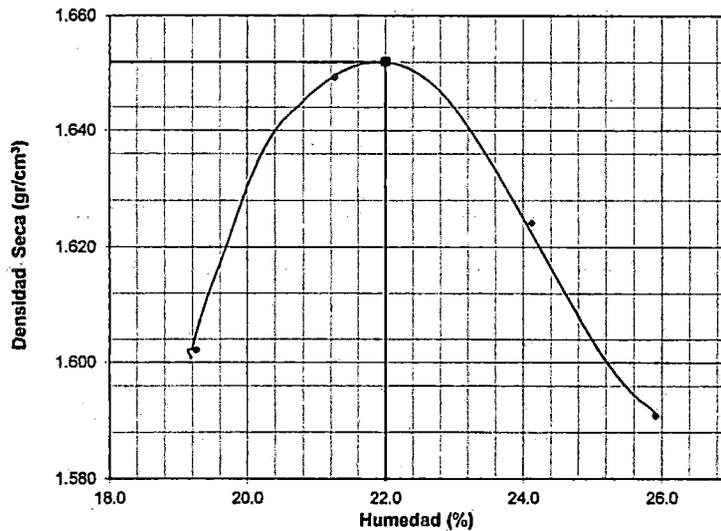
SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
 PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
 UBICACIÓN : LIMA
 FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) - ASTM D1883 (A)

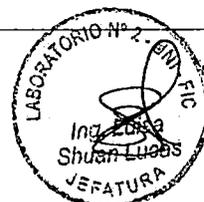
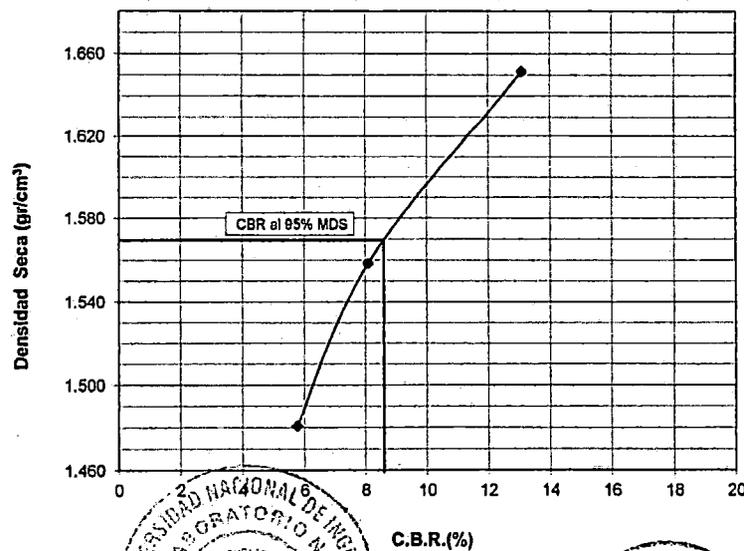
Muestra: **ARCILLA 90% + CENIZA VOLANTE 10%**

Máxima Densidad Seca (gr/cm³) : 1.652
 Óptimo Contenido de Humedad (%) : 22.0
 CBR al 100% de la MDS (%) : 13.1
 CBR al 95% de la MDS (%) : 8.6

CURVA DENSIDAD SECA vs. HUMEDAD



CURVA: DENSIDAD SECA vs. C.B.R.





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITANTE : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis " Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Perú
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : ARCILLA 80% + CENIZA 20%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

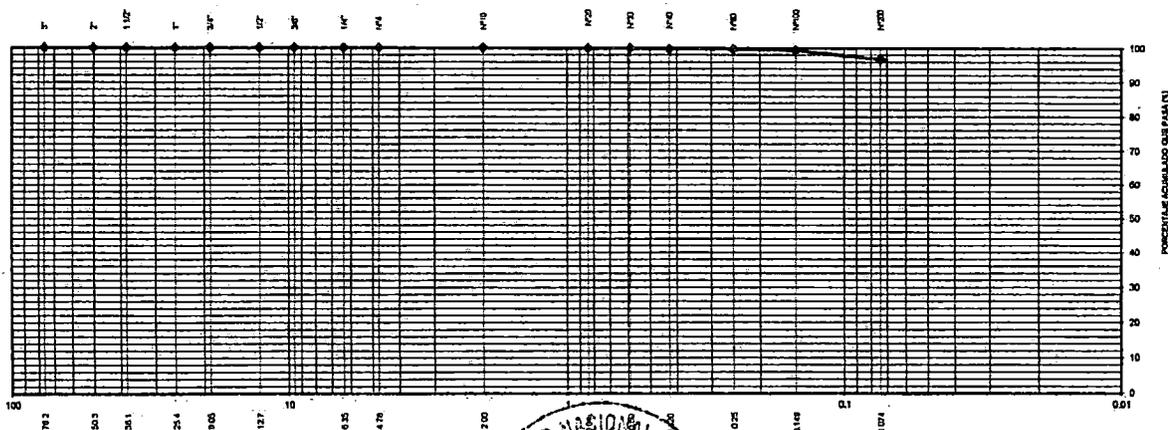
Tamiz	Abertura (mm)	(%) Parcial Retenido	(%) Acumulado	
			Retenido	Pasa
3"	76.200	-	-	100.0
2"	50.300	-	-	100.0
1 1/2"	38.100	-	-	100.0
1"	25.400	-	-	100.0
3/4"	19.050	-	-	100.0
1/2"	12.700	-	-	100.0
3/8"	9.525	-	-	100.0
1/4"	6.350	-	-	100.0
N°4	4.760	-	-	100.0
N°10	2.000	-	-	100.0
N°20	0.840	0.1	0.1	99.9
N°30	0.590	-	0.1	99.9
N°40	0.426	0.1	0.2	99.8
N°60	0.250	0.1	0.3	99.7
N°100	0.149	0.4	0.8	99.2
N°200	0.074	2.5	3.2	96.8
- N°200		96.8		

% grava	: ---
% arena	: 3.2
% finos	: 96.8

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318	
Límite Líquido (%)	: 46.00
Límite Plástico (%)	: 25.00
Índice Plástico (%)	: 21.00

Clasificación SUCS ASTM D2487 : CL

CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota: Muestra recibida e identificada por el Solicitante
 Ejecución: Téc. Jorge Lindo



Ing. LUISA ESTUAR LUCAS
 Jefa del Laboratorio N°2
 Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Ubicacion : -
Muestra : ARCILLA 80%+ CENIZA 20%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM - D422

Malla	(%) Acumulado que pasa
2"	
1 1/2"	
1"	
3/4"	
1/2"	
3/8"	
1/4"	
N° 4	100.0
N° 10	100.0
N° 20	99.9
N°30	99.9
N°40	99.8
N°50	99.7
N°100	99.2
N°200	96.8

Muestra recibida e identificada por el solicitante



Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Ubicación : -
Muestra : ARCILLA 80%+ CENIZA 20%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACION ASTM - D422

Diámetro Corregido (mm)	(%) Material que pasa
0.03932	60.02
0.02811	58.39
0.01796	56.76
0.01303	51.86
0.01069	50.23
0.00774	45.40
0.00556	42.30
0.00277	39.97
0.00121	31.29

RESULTADOS :

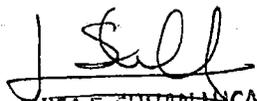
Gravas (%)	:	0.0
Arenas (%)	:	3.2
Limos (%)	:	56.8
Arcillas y Coloides (%)	:	40.0

Muestra Remitida e identificada por el solicitante

Realizado por : tec. J. Lindo

Revisado por :




Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú. Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

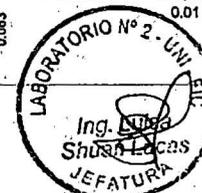
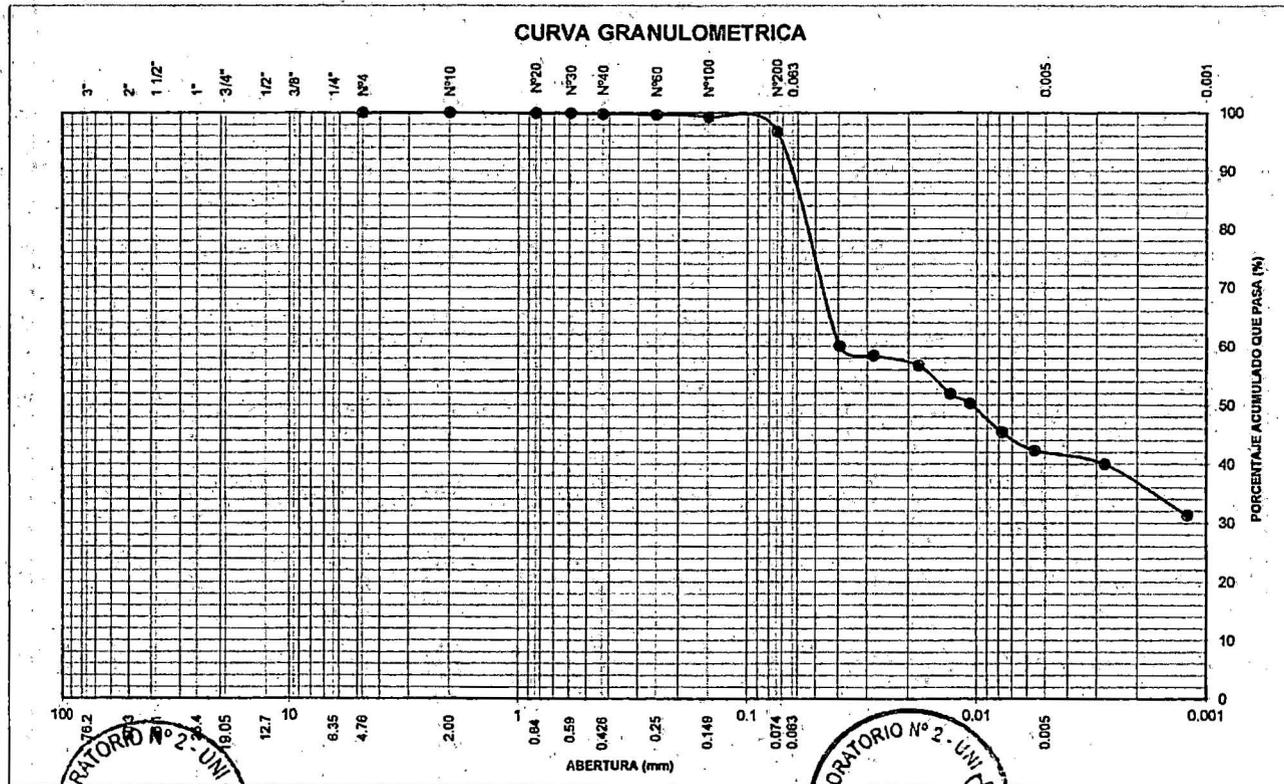
ANALISIS GRANULOMETRICO POR SEDIMENTACION INFORME S12-422 ASTM D-422

Solicitado : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
 Proyecto : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".

Ubicación :
 Muestra : ARCILLA 80%+ CENIZA 20%

Ubicación : Lima
 Fecha : 15 de Mayo del 2012

Tamiz	Abertura (mm.)	% que pasa
3"	76.200	
2"	50.300	
1 1/2"	38.100	
1"	25.400	
3/4"	19.050	
1/2"	12.700	
3/8"	9.525	
1/4"	6.350	
N°4	4.760	100.0
N°10	2.000	100.0
N°20	0.840	99.9
N°30	0.590	99.9
N°40	0.426	99.8
N°60	0.250	99.7
N°100	0.149	99.2
N°200	0.074	96.8
	0.039	60.0
	0.028	58.4
	0.018	56.8
	0.013	51.9
	0.011	50.2
	0.008	45.4
	0.006	42.3
	0.003	40.0
	0.001	31.3





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITANTE : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis " Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS ASTM D-854

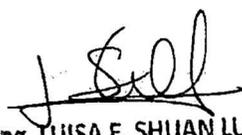
Muestra : ARCILLA 80% + CENIZA 20%

Peso Especifico Relativo de Sólidos : 2.574

Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución : Tec. J. Lindo




Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
 PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBON PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
 UBICACIÓN : LIMA
 FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) ASTM D1883 A

Muestra: ARCILLA 80% + CENIZA VOLANTE 20%

a).- Ensayo Preliminar de Compactación

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557 (A)-91

Máxima Densidad Seca (gr/cm³) : 1.655
 Optimo Contenido de Humedad (%) : 22.5

b).- Compactación de moldes

MOLDE N°	I	II	III
N° de capas	5	5	5
Numero de golpes/capa	56	25	10
Densidad Seca (gr/cm ³)	1.655	1.575	1.493
Contenido de Humedad	22.5	22.5	22.5

c).- Cuadro C.B.R. Para 0.1 pulg de Penetración

MOLDE N°	Penetración (pulg)	Presión Aplicada (Lb/pulg ²)	Presión Patrón (Lb/pulg ²)	C.B.R. (%)
I	0.1	173	1000	17.3
II	0.1	112	1000	11.2
III	0.1	65	1000	6.5

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. : 17.3 %

C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. : 11.0 %

d).- Expansión(%) : 1.0

Nota: La muestra fue remitida e identificada por el solicitante.

Ejecutado por: Jorge Lindo



Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
 Jefa del Laboratorio N°2
 Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

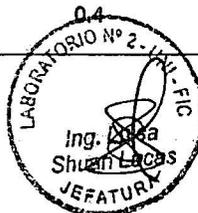
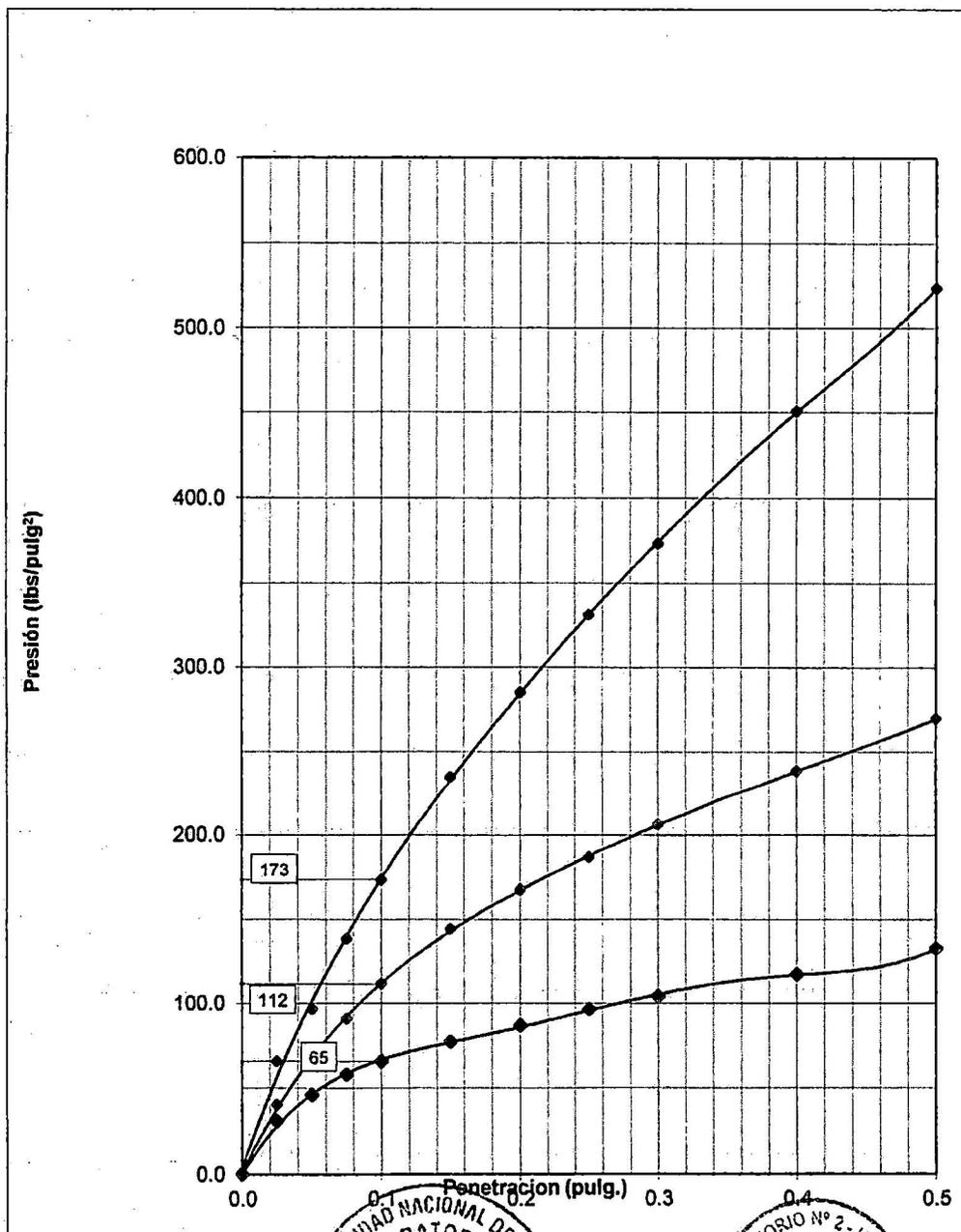
Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBON PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : LIMA
FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) ASTM D 1883 (A)

Muestra: ARCILLA 80% + CENIZA VOLANTE 20%





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

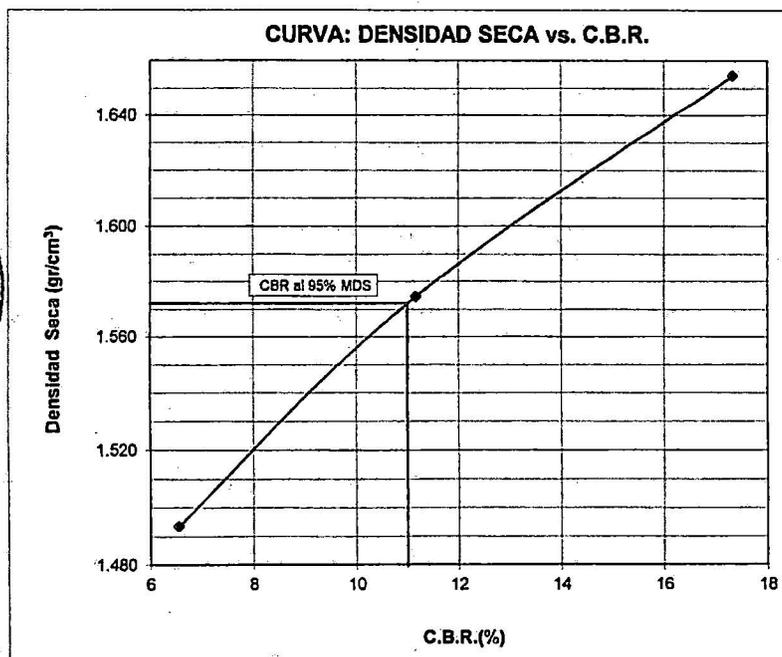
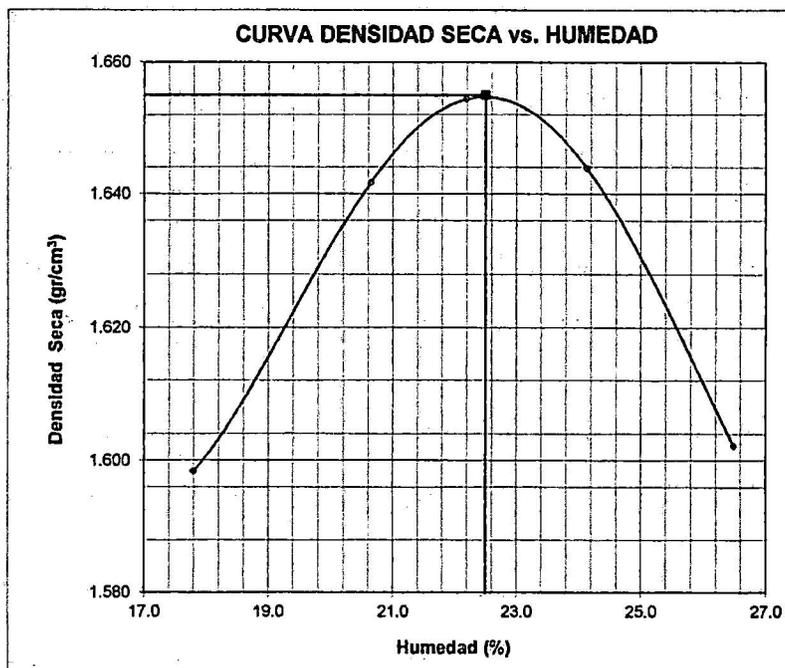
INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBON PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : LIMA
FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) - ASTM D1883 (A)

Muestra: ARCILLA 80% + CENIZA VOLANTE 20%

Máxima Densidad Seca (gr/cm^3) : 1.655
Óptimo Contenido de Humedad (%) : 22.5
CBR al 100% de la MDS (%) : 17.3
CBR al 95% de la MDS (%) : 11.0





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITANTE : Bach. Carolina Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis " Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Perú
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : ARCILLA 70% + CENIZA 30%

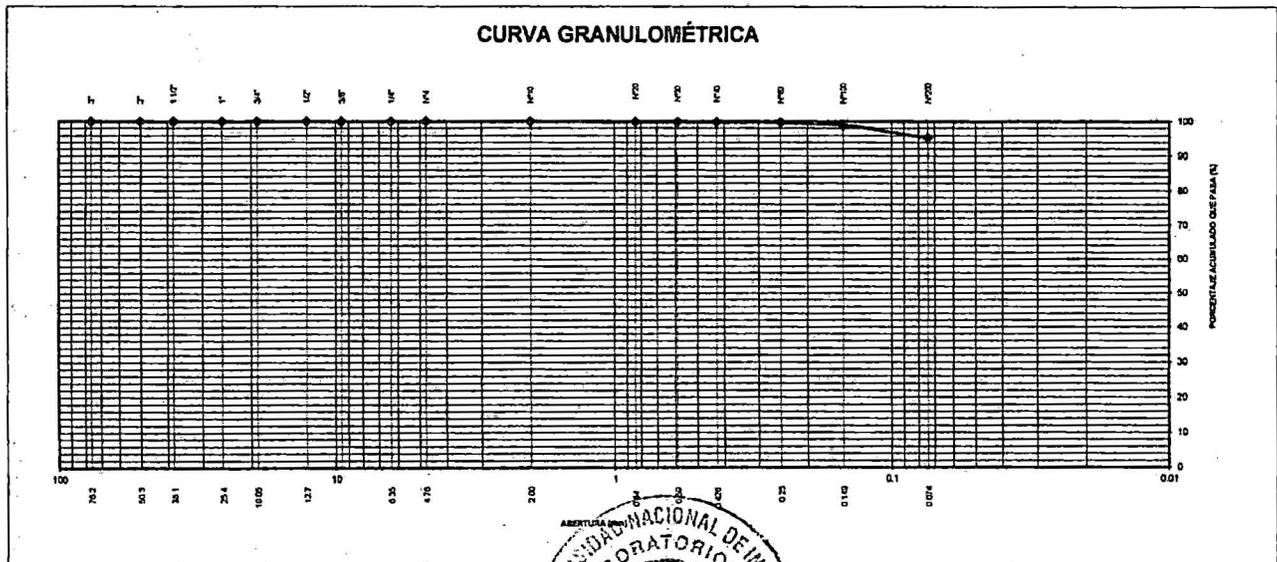
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

Tamiz	Abertura (mm)	(%) Parcial Retenido	(%) Acumulado	
			Retenido	Pasa
3"	76.200	-	-	100.0
2"	50.300	-	-	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	4.760	-	-	100.0
N°10	2.000	-	-	100.0
N°20	0.840	0.1	0.1	99.9
N°30	0.590	0.0	0.1	99.9
N°40	0.426	0.1	0.2	99.8
N°60	0.250	0.1	0.3	99.7
N°100	0.149	0.8	1.0	99.0
N°200	0.074	3.5	4.6	95.4
- N°200		95.4		

% grava	: -----
% arena	: 4.6
% finos	: 95.4

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318	
Límite Líquido (%)	: 39.04
Límite Plástico (%)	: 17.69
Índice Plástico (%)	: 21.35

Clasificación SUCS ASTM D2487 : CL



Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecutor: Laboratorio N° 2, Ing. Jorge Lindo



Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
 Jefa del Laboratorio N°2
 Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Ubicacion : -
Muestra : ARCILLA 70% + CENIZA 30%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM - D422

Malla	(%) Acumulado que pasa
2"	
11/2"	
1"	
3/4"	
1/2"	
3/8"	
1/4"	
N° 4	100.0
N° 10	100.0
N° 20	99.9
N°30	99.9
N°40	99.8
N°50	99.7
N°100	99.0
N°200	95.4

Muestra Remitida e identificada por el solicitante




Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de
UBICACIÓN : carbón para su uso como subrasante mejorada".
FECHA : 15 de Mayo del 2012

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Ubicacion : -
Muestra : ARCILLA 70% + CENIZA 30%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACION ASTM - D422

Diámetro Corregido (mm)	(%) Material que pasa
0.04107	51.01
0.02961	46.20
0.01934	39.78
0.01386	36.57
0.01151	33.36
0.00831	28.55
0.00593	24.39
0.00309	15.77
0.00128	10.90

RESULTADOS :
Gravas (%) : 0.0
Arenas (%) : 4.6
Limos (%) : 79.7
Arcillas y Coloides (%) : 15.8

Muestra Remitida e identificada por el solicitante

Realizado por : tec. J. Lindo

Revisado por :




Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

ANALISIS GRANULOMETRICO POR SEDIMENTACION INFORME S12-422

ASTM D-422

Solicitado : Bach. Carolina A. Pérez Collantes

Proyecto : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".

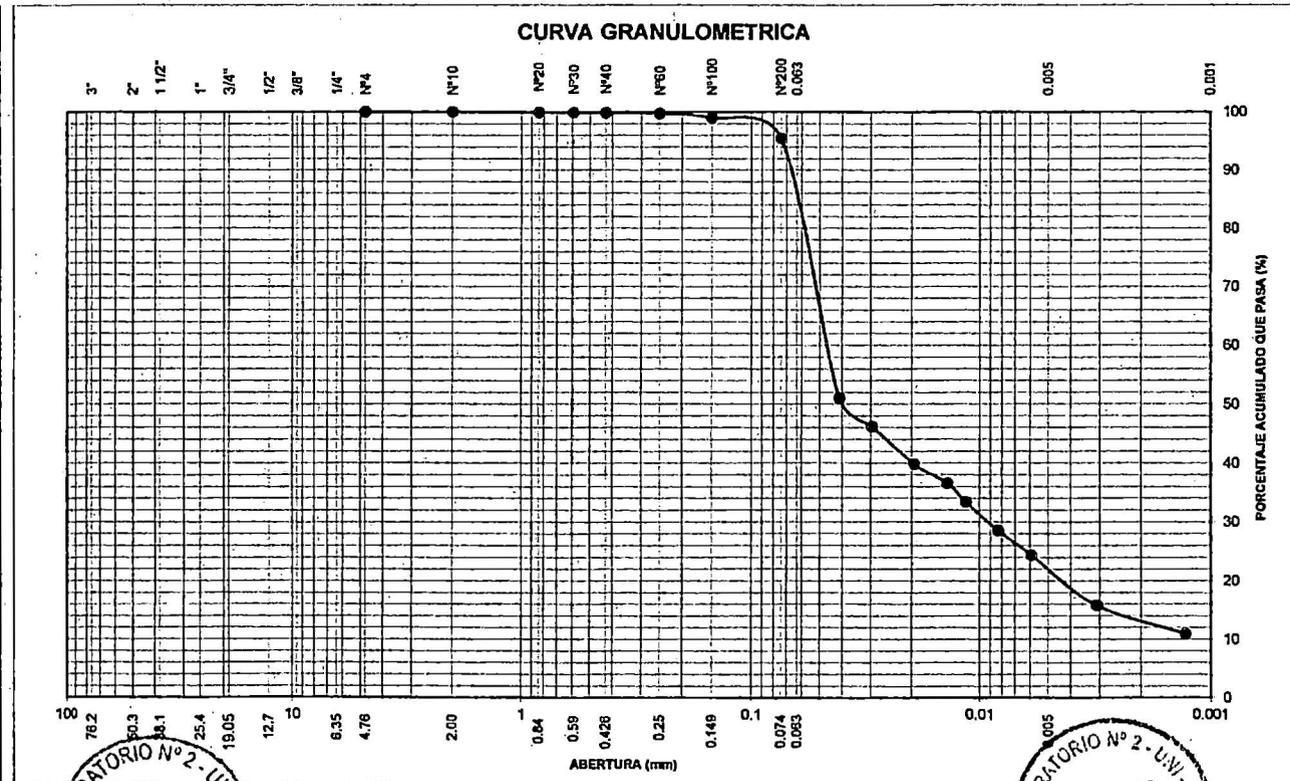
Ubicación : -

Ubicación : Lima

Muestra : ARCILLA 70% + CENIZA 30%

Fecha : 15 de Mayo del 2012

Tamiz	Abertura (mm.)	% que pasa
3"	76.200	
2"	50.300	
1 1/2"	38.100	
1"	25.400	
3/4"	19.050	
1/2"	12.700	
3/8"	9.525	
1/4"	6.350	
N°4	4.760	100.0
N°10	2.000	100.0
N°20	0.840	99.9
N°30	0.590	99.9
N°40	0.426	99.8
N°60	0.250	99.7
N°100	0.149	99.0
N°200	0.074	95.4
	0.041	51.0
	0.030	46.2
	0.019	39.8
	0.014	36.6
	0.012	33.4
	0.008	28.5
	0.006	24.4
	0.003	15.8
	0.001	10.9





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITANTE : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis " Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón
UBICACIÓN : para su uso como subrasante mejorada".
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS ASTM D-854

Muestra : ARCILLA 70% + CENIZA 30%

Peso Especifico Relativo de Sólidos : 2.584

Nota: Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución : Tec. J. Lindo




Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : LIMA
FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) ASTM D1883 A

Muestra: ARCILLA 70% + CENIZA VOLANTE 30%

a).- Ensayo Preliminar de Compactación

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557 (A)-91

Máxima Densidad Seca (gr/cm^3) : 1.648
Optimo Contenido de Humedad (%) : 21.4

b).- Compactación de moldes

MOLDE N°	I	II	III
N° de capas	5	5	5
Numero de golpes/capa	56	25	10
Densidad Seca (gr/cm^3)	1.648	1.501	1.401
Contenido de Humedad	21.4	21.4	21.4

c).- Cuadro C.B.R. Para 0.1 pulg de Penetración

MOLDE N°	Penetración (pulg)	Presión Aplicada (Lb/pulg^2)	Presión Patrón (Lb/pulg^2)	C.B.R. (%)
I	0.1	127	1000	12.7
II	0.1	62	1000	6.2
III	0.1	23	1000	2.3

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. : 12.7 %

C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. : 9.0 %

d).- Expansión(%) : 2.1

Nota: La muestra fue remitida e identificada por el solicitante.

Ejecutado por: Jorge Lindo



Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

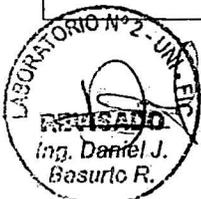
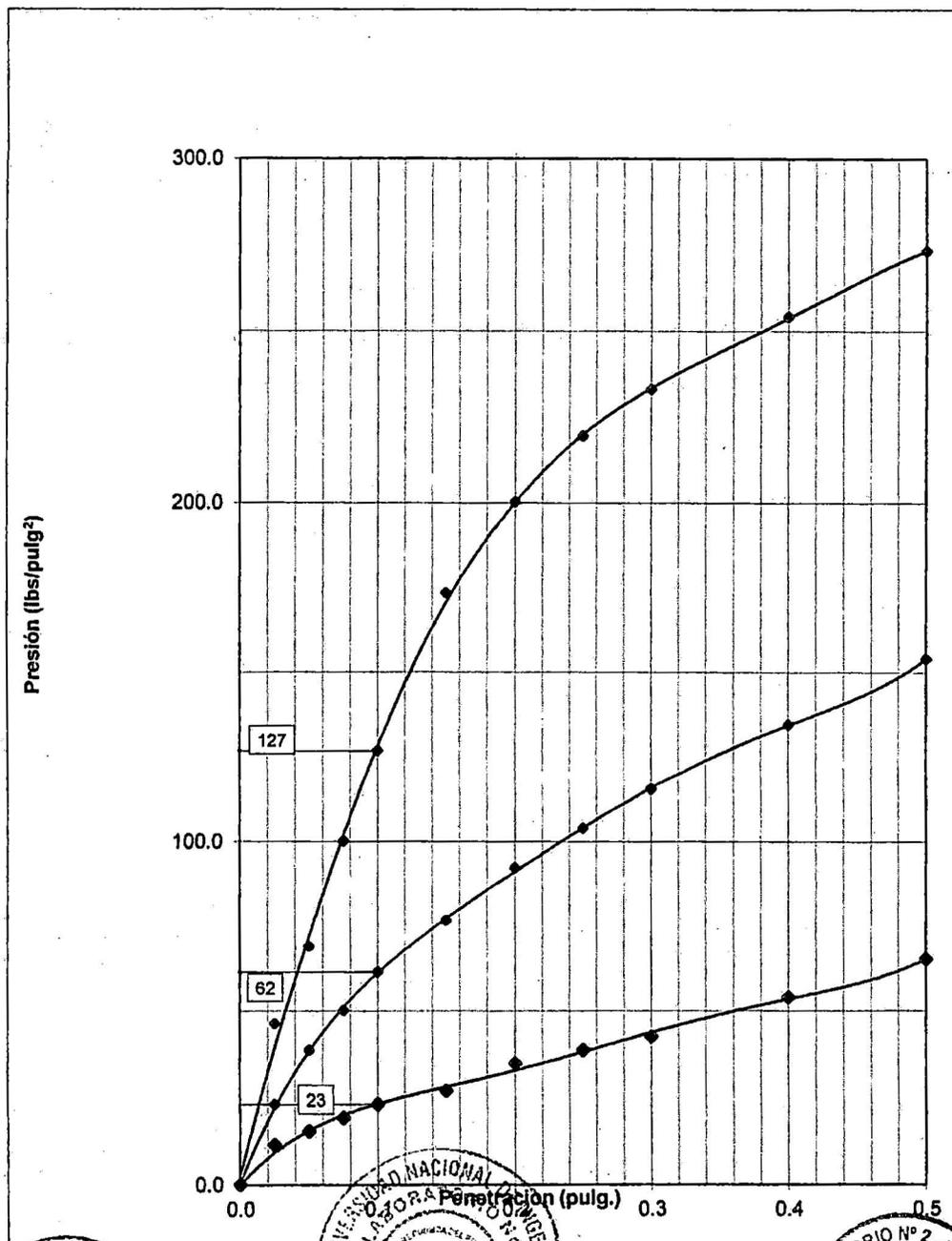
Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : LIMA
FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) ASTM D 1883 (A)

Muestra: ARCILLA 70% + CENIZA VOLANTE 30%





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

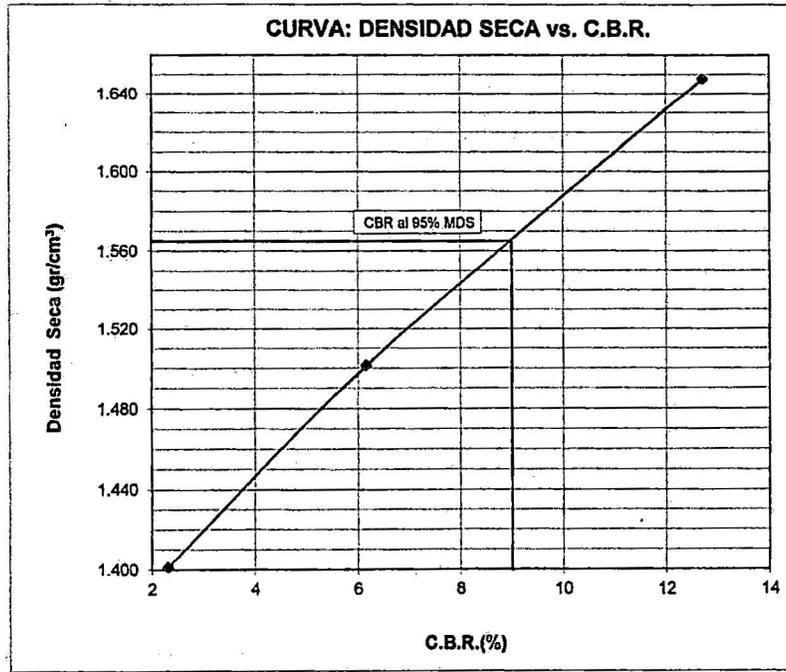
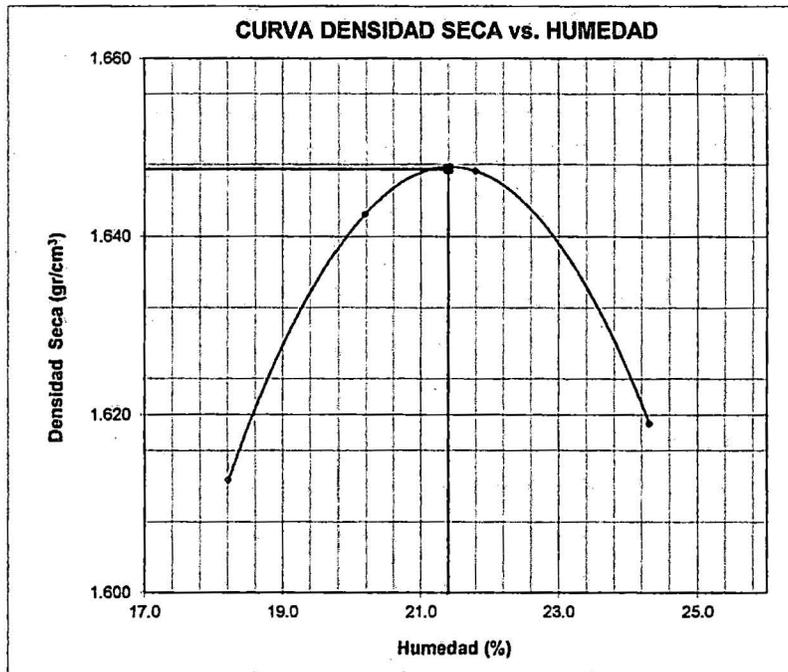
INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
 PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
 UBICACIÓN : LIMA
 FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) - ASTM D1883 (A)

Muestra: ARCILLA 70% + CENIZA VOLANTE 30%

Máxima Densidad Seca (gr/cm³) : 1.648
 Óptimo Contenido de Humedad (%) : 21.4
 CBR al 100% de la MDS (%) : 12.7
 CBR al 95% de la MDS (%) : 9.0





Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITANTE : Bach. Carolina Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis " Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : ARCILLA 60% + CENIZA 40%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

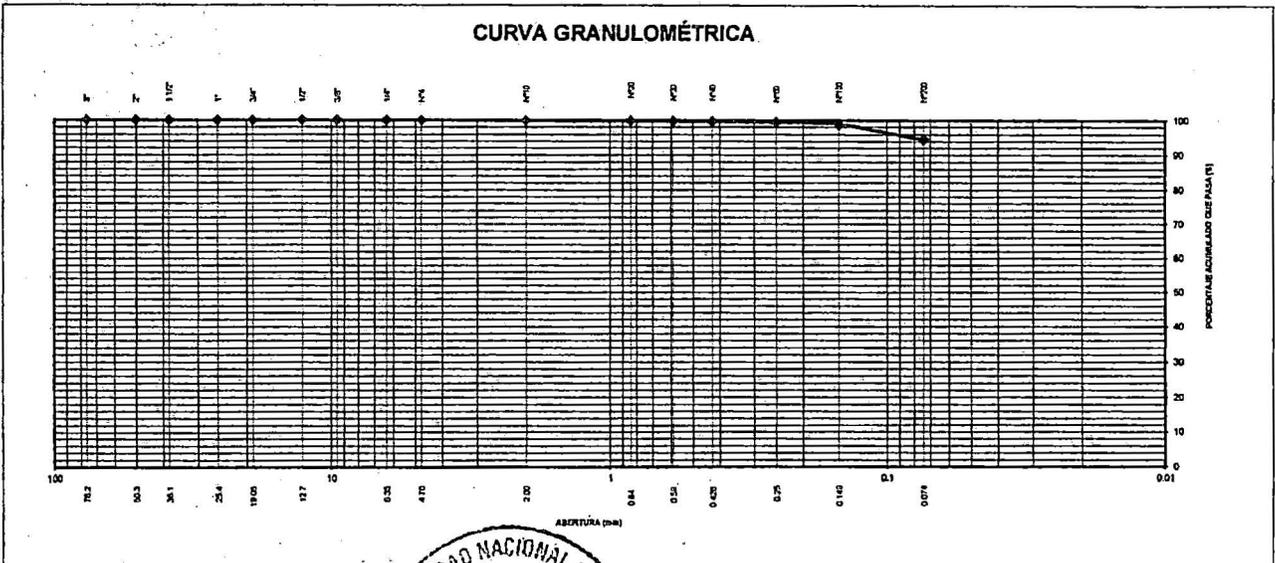
Table with 5 columns: Tamiz, Abertura (mm), (% Parcial Retenido), (% Acumulado Retenido), Pasá. Rows include sieve sizes from 3" down to -N°200.

Summary table: % grava : —, % arena : 5.4, % finos : 94.6

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318 table: Límite Líquido (%): 34.00, Límite Plástico (%): 19.00, Índice Plástico (%): 15.00

Clasificación SUCS ASTM D2487 : CL

CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante.

Ejecutor Téc. Jorge Lindo



Signature of Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS, Jefa del Laboratorio N°2, Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Ubicacion : -
Muestra : ARCILLA 60% + CENIZA 40%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM - D422

Malla	(%) Acumulado que pasa
2"	
1 1/2"	
1"	
3/4"	
1/2"	
3/8"	
1/4"	
N° 4	100.0
N° 10	99.9
N° 20	99.8
N° 30	99.8
N° 40	99.7
N° 50	99.5
N° 100	98.9
N° 200	94.6

Muestra Remitida e identificada por el solicitante




Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : ARCILLA 60% + CENIZA 40%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACION ASTM - D422

Diámetro Corregido (mm)	(%) Material que pasa
0.04483	47.26
0.03201	45.64
0.02072	40.79
0.01499	35.93
0.01240	32.69
0.00895	27.84
0.00641	24.60
0.00333	14.89
0.00135	10.84

RESULTADOS :

Gravas (%)	:	0.0
Arenas (%)	:	5.4
Limos (%)	:	79.7
Arcillas y Coloides (%)	:	14.9

Muestra Remitida e identificada por el solicitante

Realizado por : tec. J. Lindo

Revisado por :



Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

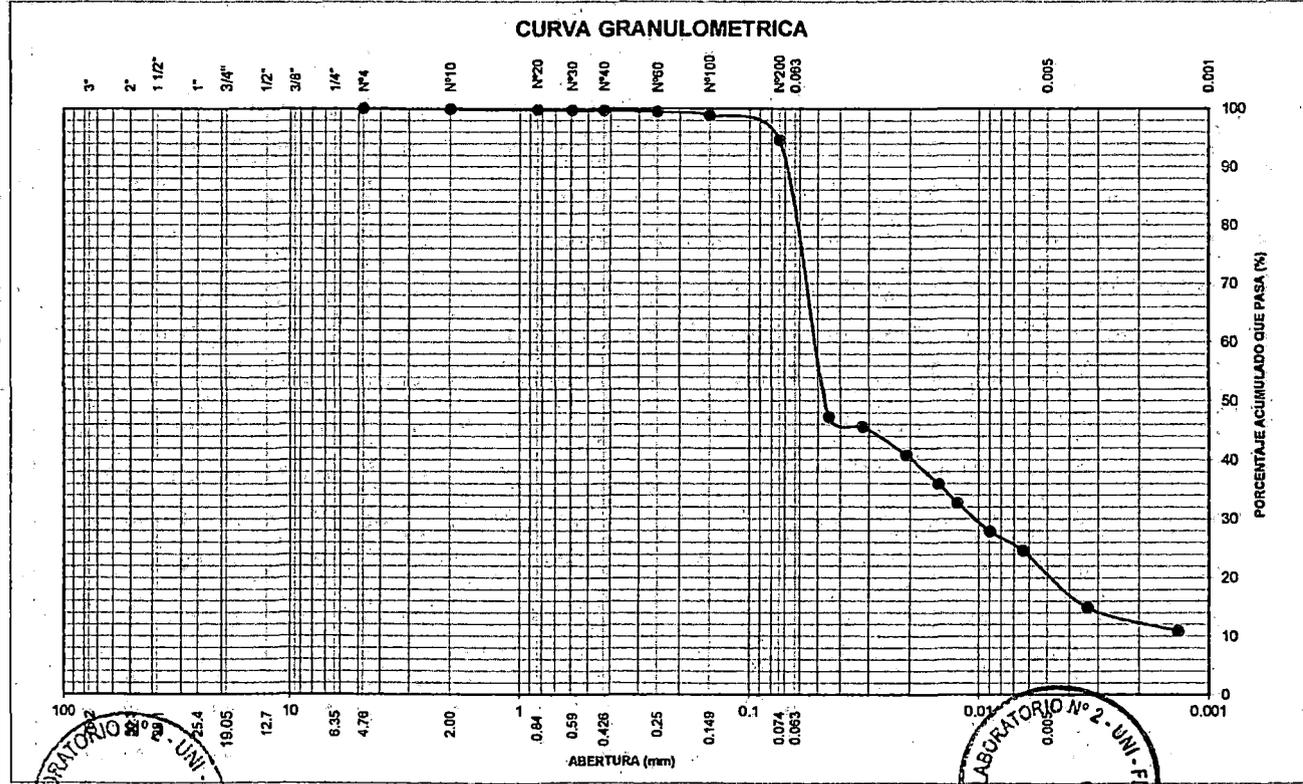
ANALISIS GRANULOMETRICO POR SEDIMENTACION INFORME S12-422
ASTM D-422

Solicitado : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
Proyecto : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".

Ubicación : -
Muestra : ARCILLA 60% + CENIZA 40%

Ubicación : Lima
Fecha : 15 de Mayo del 2012

Tamiz	Abertura (mm.)	% que pasa
3"	76.200	
2"	50.300	
1 1/2"	38.100	
1"	25.400	
3/4"	19.050	
1/2"	12.700	
3/8"	9.525	
1/4"	6.350	
N°4	4.760	100.0
N°10	2.000	99.9
N°20	0.840	99.8
N°30	0.590	99.8
N°40	0.426	99.7
N°60	0.250	99.5
N°100	0.149	98.9
N°200	0.074	94.6
	0.045	47.3
	0.032	45.6
	0.021	40.8
	0.015	35.9
	0.012	32.7
	0.009	27.8
	0.006	24.6
	0.003	14.9
	0.001	10.8





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITANTE : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis " Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS ASTM D-854

Muestra : ARCILLA 60% + CENIZA40%

Peso Específico Relativo de Sólidos : 2.516

Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución : Tec. J. Lindo



Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : LIMA
FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) ASTM D1883 A

Muestra: ARCILLA 60% + CENIZA VOLANTE 40%

a).- Ensayo Preliminar de Compactación

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557 (A)-91

Máxima Densidad Seca (gr/cm³) : 1.650
Optimo Contenido de Humedad (%) : 18.6

b).- Compactación de moldes

Table with 4 columns: MOLDE N°, I, II, III. Rows include: Nº de capas, Numero de golpes/capa, Densidad Seca (gr/cm³), Contenido de Humedad.

c).- Cuadro C.B.R. Para 0.1 pulg de Penetración

Table with 5 columns: MOLDE N°, Penetración (pulg), Presión Aplicada (Lb/pulg²), Presión Patrón (Lb/pulg²), C.B.R. (%). Rows include: I, II, III.

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. : 20.8 %
C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. : 11.1 %

d).- Expansión(%) : 1.1

Nota: La muestra fue remitida e identificada por el solicitante.

Ejecutado por: Jorge Lindo



Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

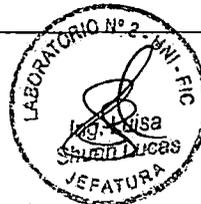
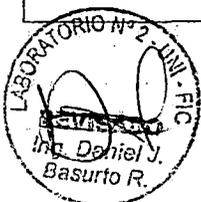
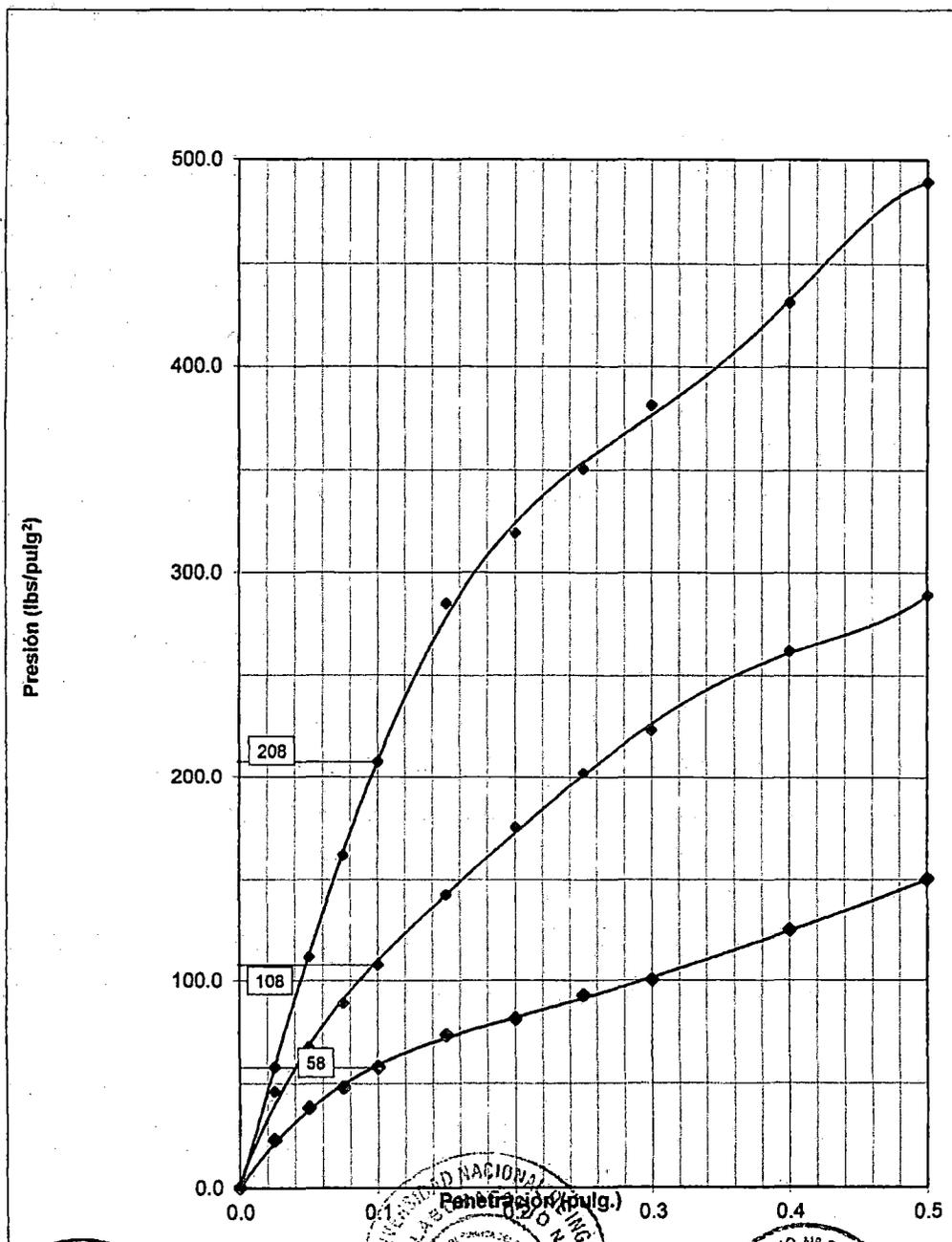
Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : LIMA
FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) ASTM D 1883 (A)

Muestra: **ARCILLA 60% + CENIZA VOLANTE 40%**





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

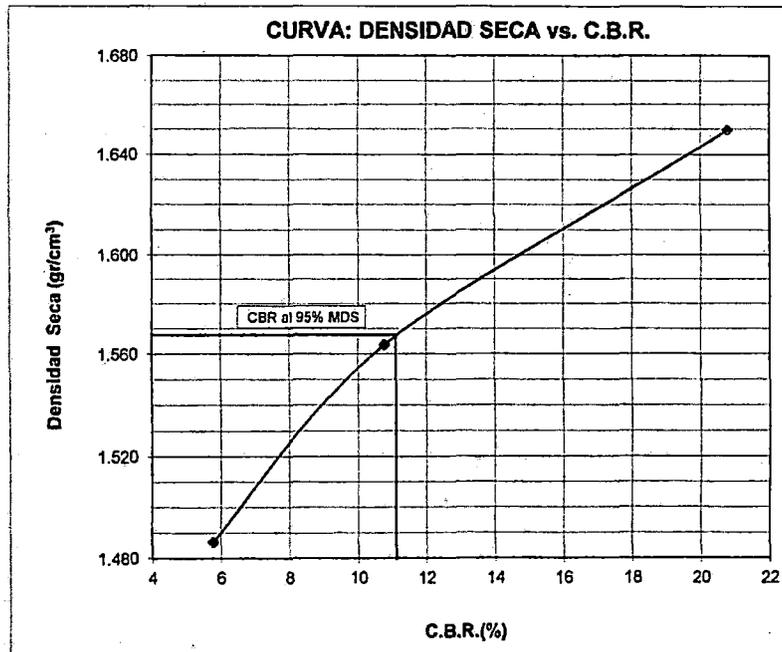
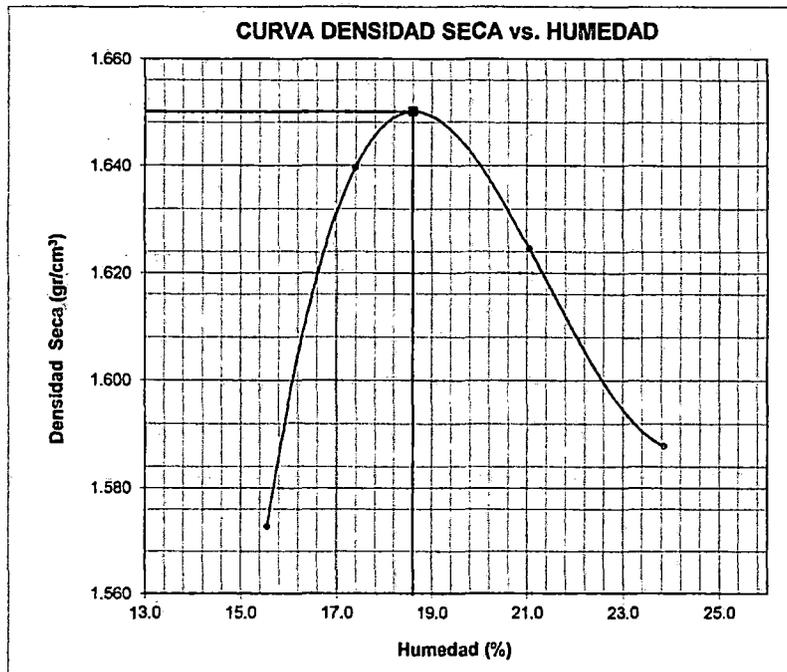
INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
 PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
 UBICACIÓN : LIMA
 FECHA : 15 DE MAYO DEL 2012

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) - ASTM D1883 (A)

Muestra: **ARCILLA 60% + CENIZA VOLANTE 40%**

Máxima Densidad Seca (gr/cm^3) : 1.650
 Óptimo Contenido de Humedad (%) : 18.6
 CBR al 100% de la MDS (%) : 20.8
 CBR al 95% de la MDS (%) : 11.1





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITANTE : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis " Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Perú
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : ARCILLA 70%+CENIZA 27%+CEMENTO 3%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

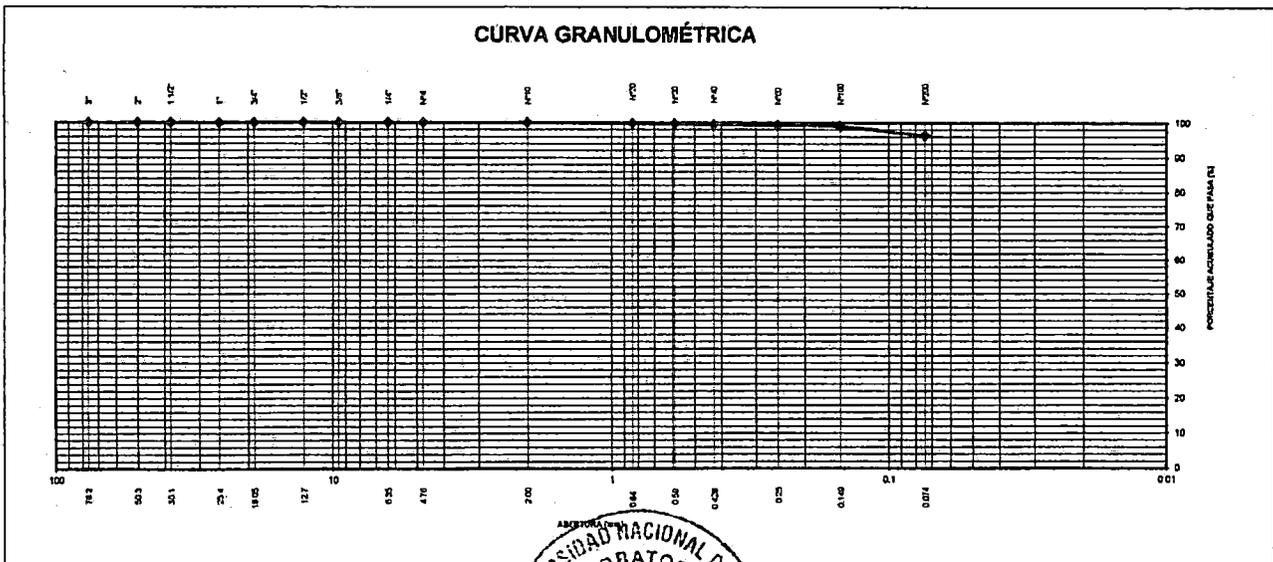
Tamiz	Abertura (mm)	(%) Parcial Retenido	(%) Acumulado	
			Retenido	Pasa
3"	76.200	-	-	100.0
2"	50.300	-	-	100.0
1 1/2"	38.100	-	-	100.0
1"	25.400	-	-	100.0
3/4"	19.050	-	-	100.0
1/2"	12.700	-	-	100.0
3/8"	9.525	-	-	100.0
1/4"	6.350	-	-	100.0
N°4	4.760	-	-	100.0
N°10	2.000	-	-	100.0
N°20	0.840	0.2	0.2	99.8
N°30	0.590	0.1	0.3	99.7
N°40	0.426	0.2	0.5	99.5
N°60	0.250	0.2	0.7	99.3
N°100	0.149	0.4	1.1	98.9
N°200	0.074	2.6	3.7	96.3
- N°200		96.3		

% grava	: ---
% arena	: 3.7
% finos	: 96.3

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318	
Límite Líquido (%)	: 46.00
Límite Plástico (%)	: 32.00
Índice Plástico (%)	: 14.00

Clasificación SUCS ASTM D2487 : ML

CURVA GRANULOMÉTRICA



Nota: Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Elaboración: Jorge Lindo



L. E. Shuan Lucas
Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

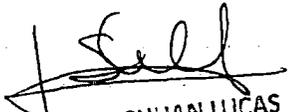
Ubicacion : -
Muestra : ARCILLA 70%+CENIZA 27%+CEMENTO 3%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO ASTM - D422

Malla	(%) Acumulado que pasa
2"	
1 1/2"	
1"	
3/4"	
1/2"	
3/8"	
1/4"	
N° 4	100.0
N° 10	100.0
N° 20	99.8
N° 30	99.7
N° 40	99.5
N° 50	99.3
N° 100	98.9
N° 200	96.3

Muestra Remitida e identificada por el solicitante




Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : ARCILLA 70%+CENIZA 27%+CEMENTO 3%

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR SEDIMENTACION ASTM - D422

Diámetro Corregido (mm)	(%) Material que pasa
0.04249	43.94
0.03089	39.19
0.01980	36.01
0.01436	29.67
0.01192	26.49
0.00846	24.91
0.00608	21.73
0.00310	18.09
0.00132	9.84

RESULTADOS :

Gravas (%)	:	0.0
Arenas (%)	:	3.7
Limos (%)	:	78.2
Arcillas y Coloides (%)	:	18.1

Muestra Remitida e identificada por el solicitante

Realizado por : tec. J. Lindo

Revisado por :



Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefex 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

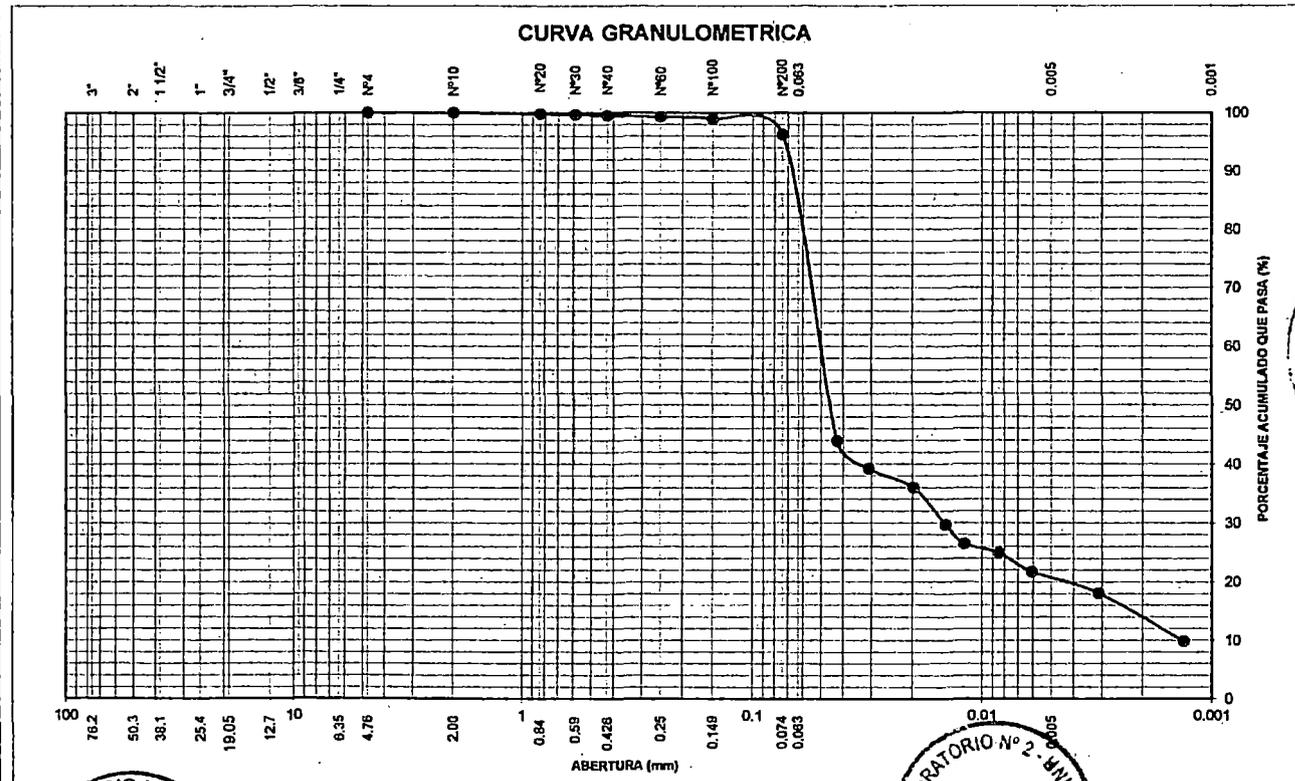
ANALISIS GRANULOMETRICO POR SEDIMENTACION INFORME S12-422

ASTM D-422

Solicitado : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
 Proyecto : Tesis "Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".

Ubicacion : - Ubicación : Lima
 Muestra : ARCILLA 70%+CENIZA 27%+CEMENTO 3% Fecha : 15 de Mayo del 2012

Tamiz	Abertura (mm.)	% que pasa
3"	76.200	
2"	50.300	
1 1/2"	38.100	
1"	25.400	
3/4"	19.050	
1/2"	12.700	
3/8"	9.525	
1/4"	6.350	
N°4	4.760	100.0
N°10	2.000	100.0
N°20	0.840	99.8
N°30	0.590	99.7
N°40	0.426	99.5
N°60	0.250	99.3
N°100	0.149	98.9
N°200	0.074	96.3
	0.042	43.9
	0.031	39.2
	0.020	36.0
	0.014	29.7
	0.012	26.5
	0.008	24.9
	0.006	21.7
	0.003	18.1
	0.001	9.8





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefex 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITANTE : Bach. Carolina A. Pérez Collantes
PROYECTO : Tesis " Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada".
UBICACIÓN : Lima
FECHA : 15 de Mayo del 2012

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS ASTM D-854

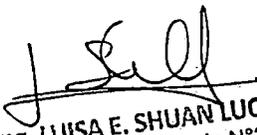
Muestra : ARCILLA 70%+CENIZA 27%+CEMENTO 3%

Peso Especifico Relativo de Sólidos : : 2.672

Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución : Tec. J. Lindo




Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa del Laboratorio N°2
Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBON PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACION : LIMA
FECHA : 12 DE MARZO DEL 2012

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) ASTM D1883 A

Muestra: MEZCLA ARCILLA 70% + CENIZA VOLANTE 27% + CEMENTO 3% Y CURADO DE 7 DIAS

a).- Ensayo Preliminar de Compactación

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557 (A)-91

Máxima Densidad Seca (gr/cm³) : 1.622
Optimo Contenido de Humedad (%) : 19.4

b).- Compactación de moldes

Table with 4 columns: MOLDE N°, I, II, III and rows for N° de capas, Numero de golpes/capa, Densidad Seca (gr/cm³), and Contenido de Humedad.

c).- Cuadro C.B.R. Para 0.1 pulg de Penetración

Table with 5 columns: MOLDE N°, Penetración (pulg), Presión Aplicada (Lb/pulg²), Presión Patrón (Lb/pulg²), and C.B.R. (%).

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. : 51.0 %
C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. : 35.0 %

d).- Expansión(%) : 1.7

Nota: La muestra fue remitida e identificada por el solicitante.

Ejecutado por: Jorge Lindo



Handwritten signature and stamp of Ing. LUISA E. SUJANLUCAS, Jefa del Laboratorio N°2 Mecánica de Suelos y Pavimentos - UNI - FIC



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

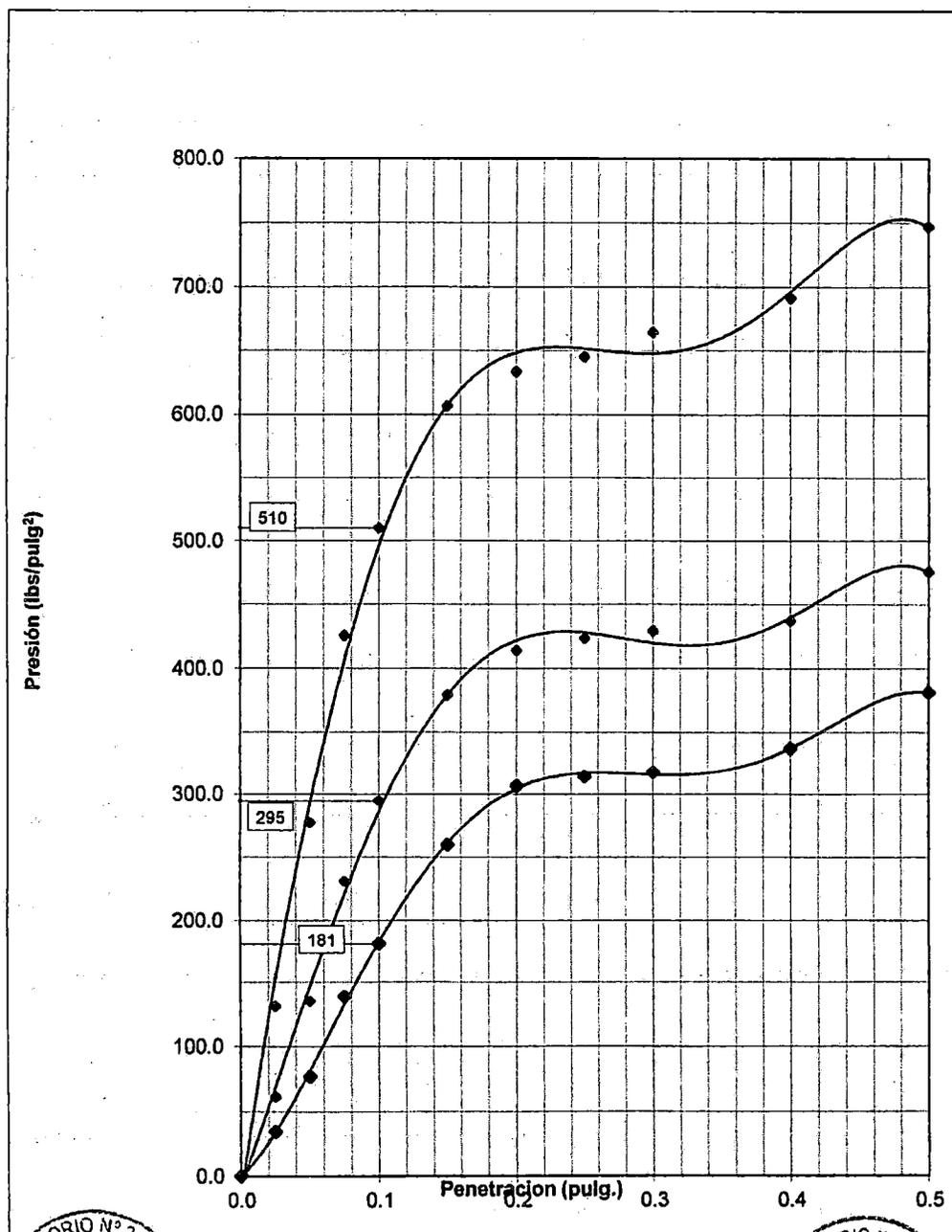
Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Teléfax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
PROYECTO : TESIS "ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBON PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : LIMA
FECHA : 12 DE MARZO DEL 2012

ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) ASTM D 1883 (A)

Muestra: MEZCLA ARCILLA 70% + CENIZA VOLANTE 27% + CEMENTO 3% Y CURADO DE 7 DIAS





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Civil Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos y Pavimentos

Av. Tupac Amaru N° 210 - Lima 25 - Perú Telefax 381-3842 Central Telefónica 481-1070 Anexo 308

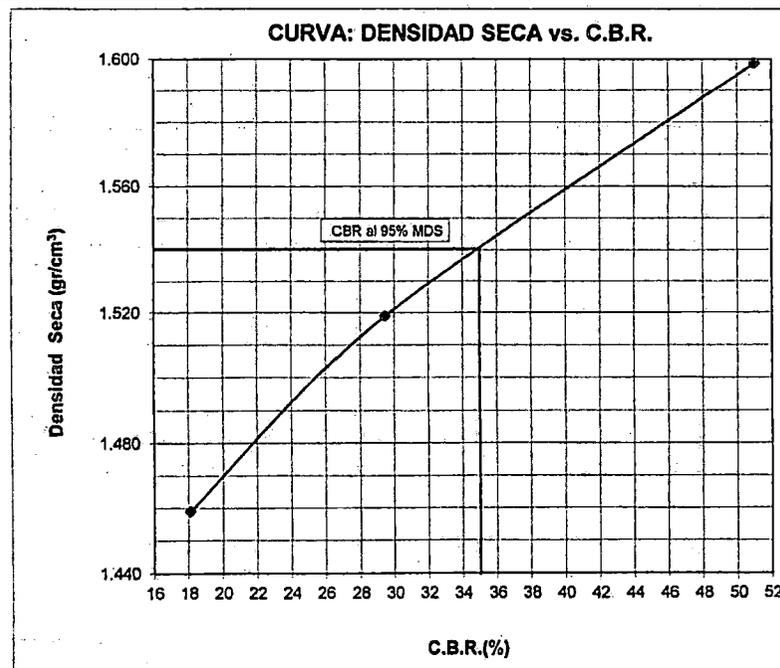
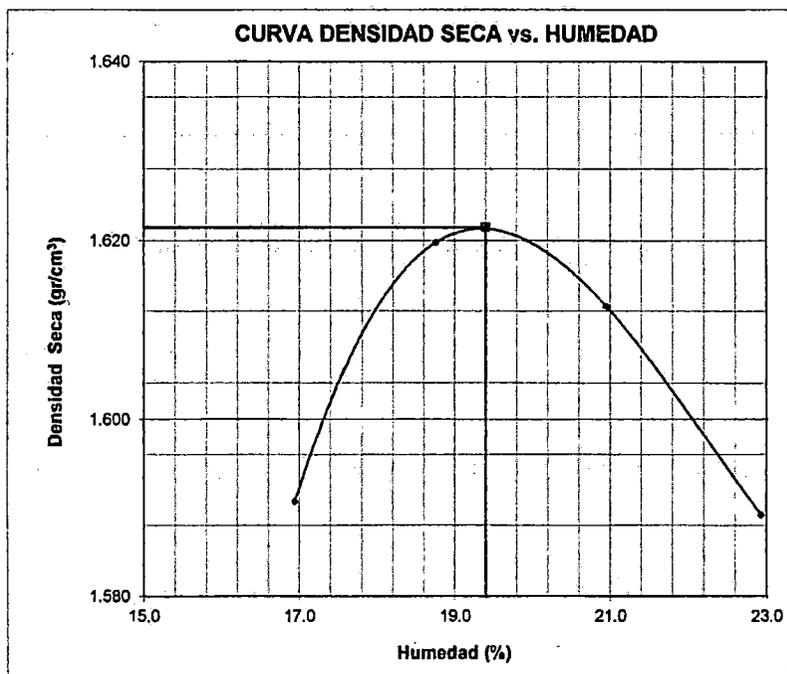
INFORME N° S12-422

SOLICITADO : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES
 PROYECTO : TESIS ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBON PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA
 UBICACIÓN : LIMA
 FECHA : 12 DE MARZO DEL 2012

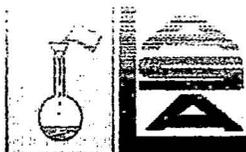
ENSAYO CALIFORNIA BEARING RATIO (C.B.R.) - ASTM D1883 (A)

Muestra: MEZCLA ARCILLA 70% + CENIZA VOLANTE 27% + CEMENTO 3% Y CURADO DE 7 DIAS

Máxima Densidad Seca (gr/cm ³)	: 1.622
Optimo Contenido de Humedad (%)	: 19.4
CBR al 100% de la MDS (%)	: 51.0
CBR al 95% de la MDS (%)	: 35.0



ANEXO C
REGISTROS DE ENSAYOS QUIMICOS



LABORATORIOS "LASA" INGENIEROS

ANALISIS DE SUELOS

PROCEDENTE DE : **PROY. DE TESIS "ESTABILIZACION DE SUELOS CON CENIZAS DE CARBON PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA Y/O SUB BASE DE PAVIMENTOS"**

INFORMADO A : **BACH. CAROLIN A PREZ COLLANTES**

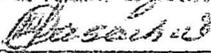
FECHA : **LIMA. 31 DE ENERO DEL 2012**

N° DE CAMPO	Materia Orgánica %
muestra Ceniza Volante	3.70

La Muestra fue tomada por el interesado.

INFORMADO POR:

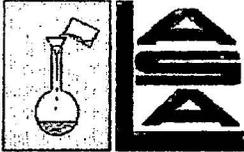
L. A. S. A. Ingenieros
Laboratorio de Analisis de Suelos y Aguas


ING. MIGUEL PASACHE ANGULO
GERENTE GENERAL

ANALISIS DE SUELOS Y AGUAS: Asesoría - Consulta - Supervisión

Calle Colones N° 310 - Urb. La Florida - Rímac - Lima.

Teléfono 481-3311 - Celular 99992-1506 - Email lasaingenieros@latinmail.com



LABORATORIOS "LASA" INGENIEROS

ANALISIS DE SUELOS

PROCEDENTE DE : PROY. DE TESIS "ESTABILIZACION DE SUELOS
ARCILLOSOS CON CENIZAS DE CARBON PARA
SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA.

INFORMADO A : BACH. CAROLINA PEREZ COLLANTES

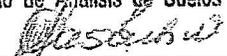
FECHA : LIMA, 31 DE ENERO DEL 2012

N° DE CAMPO	Materia Orgánica %
muestra Arcilla	0.24

La Muestra fue tomada por el interesado.

INFORMADO POR:

L. A. S. A. Ingenieros
Laboratorio de Analisis de Suelos y Aguas


ING. MIGUEL PASACHE ANGULO
CERENUE GENERAL

ANALISIS DE SUELOS Y AGUAS: Asesoría - Consulta - Supervisión

Calle Catorces N° 310 - Urb. La Florida - Rincón - Lima.

Teléfono: 451-3311 - Celular 999982-1506 - ✉ lasaingenieros@latinmail.com

ANEXO D
PANEL FOTOGRÁFICO

ENSAYOS DE LABORATORIO

REALIZANDO EL ENSAYO DE GRANULOMETRÍA



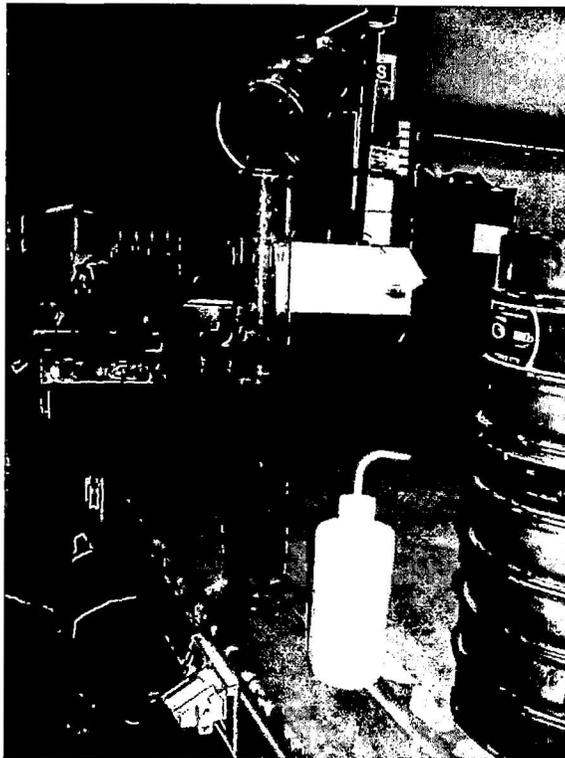
ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE
CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA
Pérez Collantes Carolina Alejandra



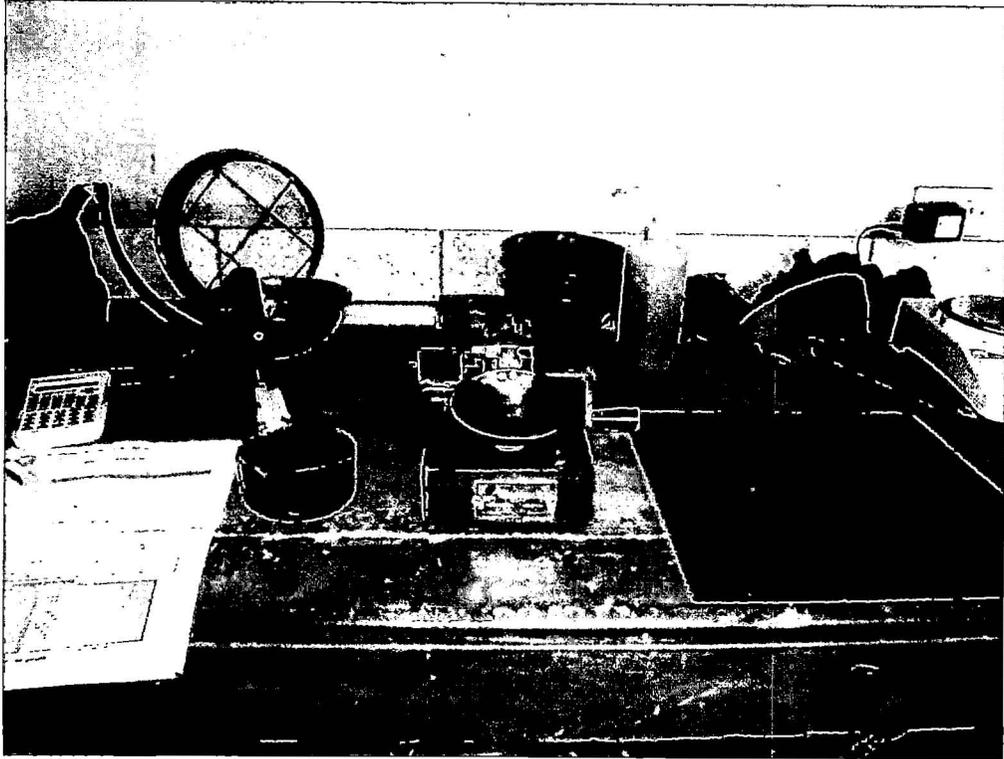
**REALIZANDO EL ENSAYO DE ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR
MÉTODO DEL HIDRÓMETRO**



**ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON CENIZAS DE
CARBÓN PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA**
Pérez Collantes Carolina Alejandra

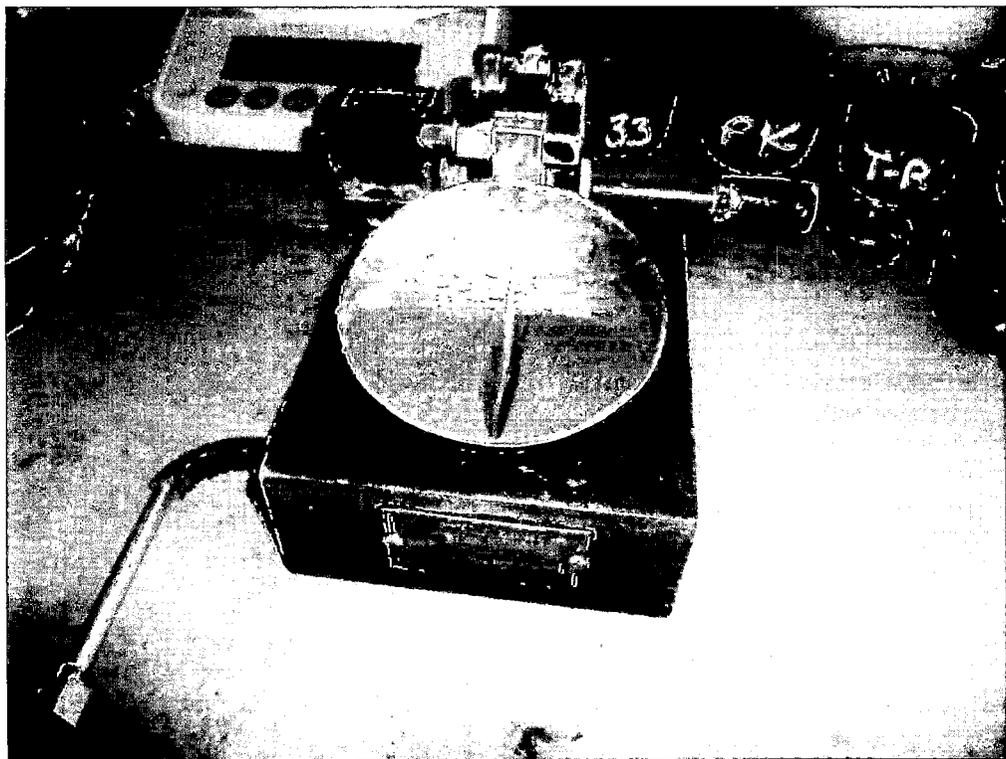


REALIZANDO EL ENSAYO DE LÍMITE LÍQUIDO, LÍMITE PLÁSTICO

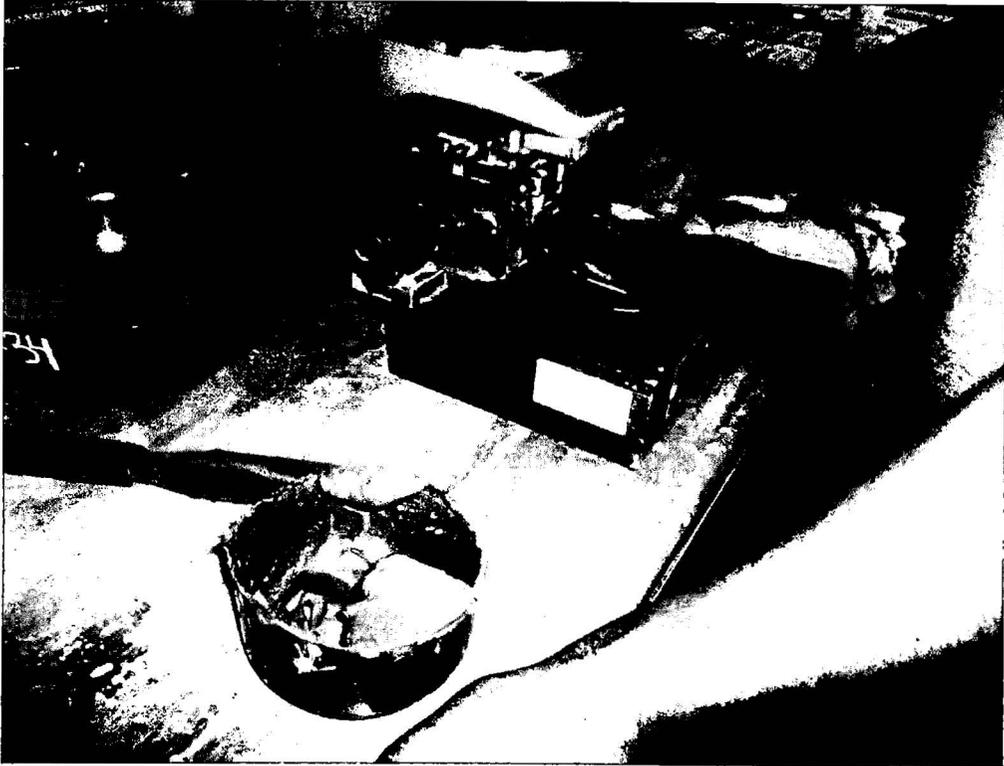




Hacemos las mediciones correspondientes para obtener el límite líquido



Ensayo de Limite Liquido con equipo de la Copa de Casagrande



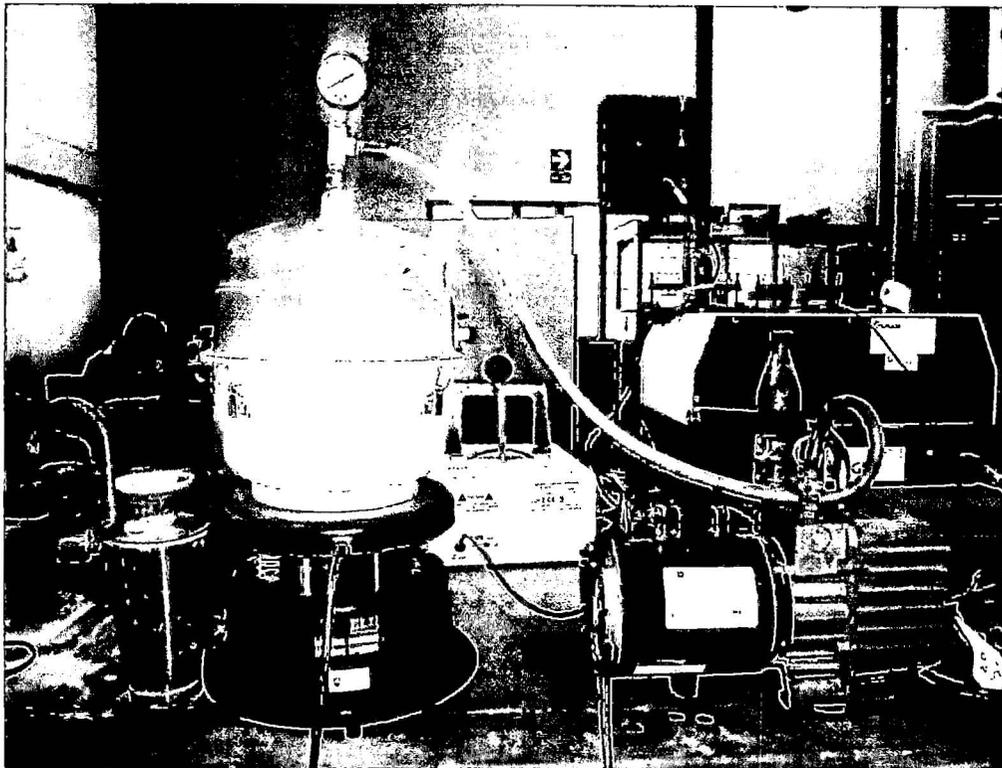
GRAVEDAD ESPECÍFICA



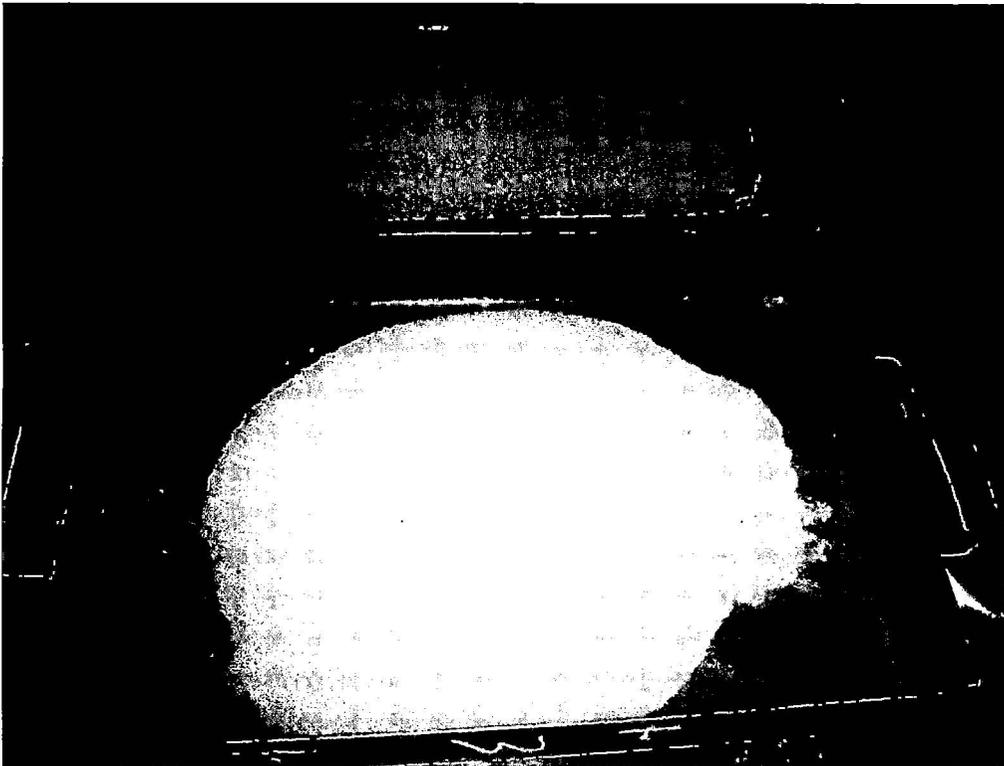




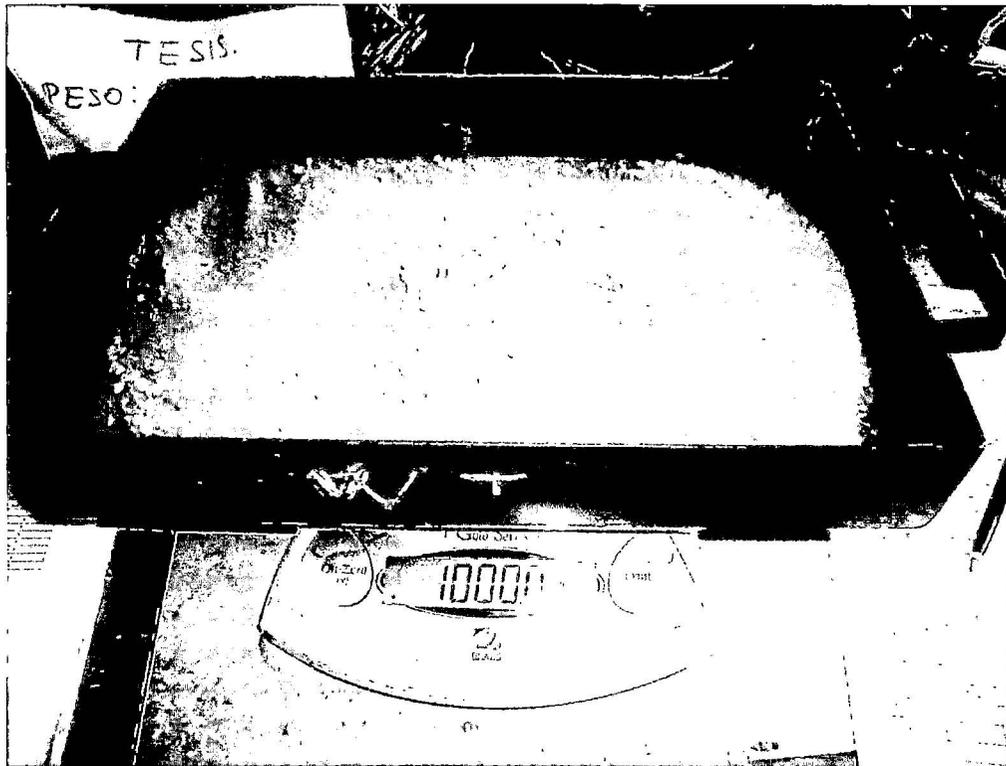
Bomba de vacíos utilizada en el ensayo de gravedad específica



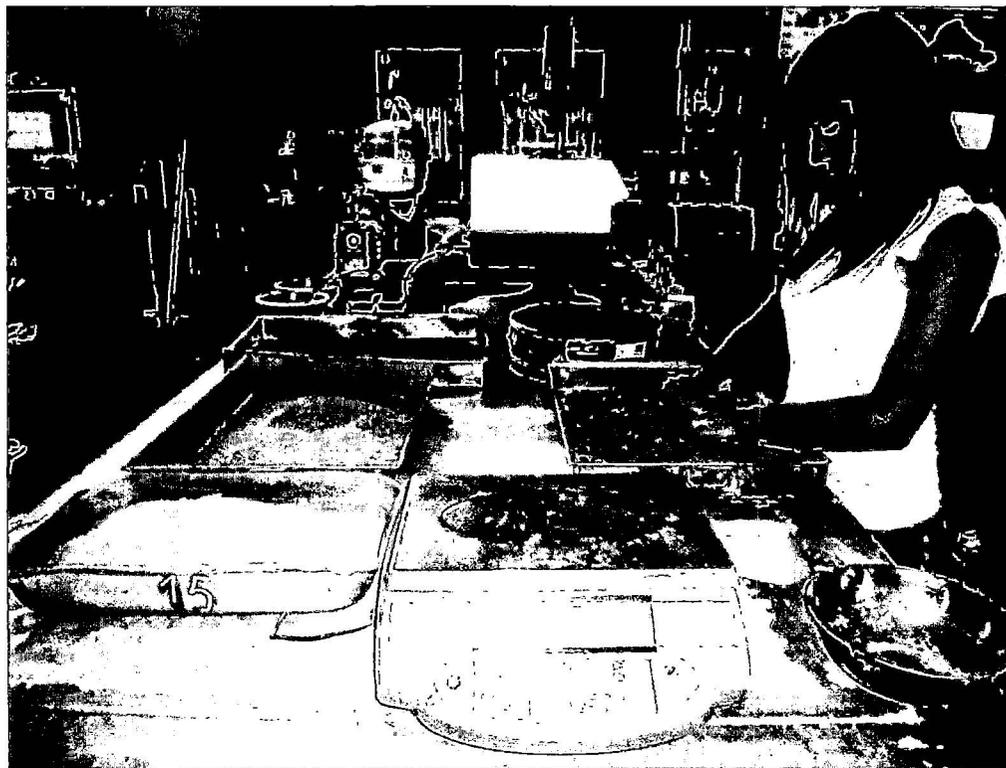
REALIZANDO EL ENSAYO PROCTOR

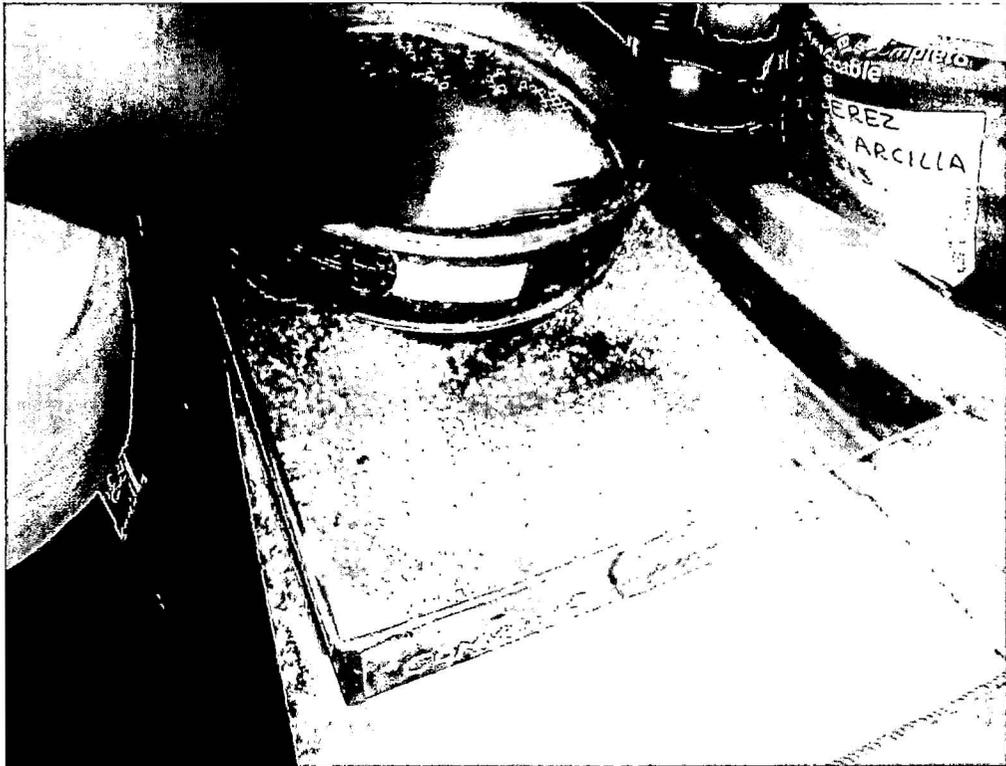


Preparación del suelo y ceniza separada en proporciones adecuadas para ensayar.



Luego de pesar, mezclamos una cantidad de 1000 gr para luego mezclando uniformemente, adicionando agua.





Tamizando la mezcla suelo-cemento



Se hizo el proceso de compactación.

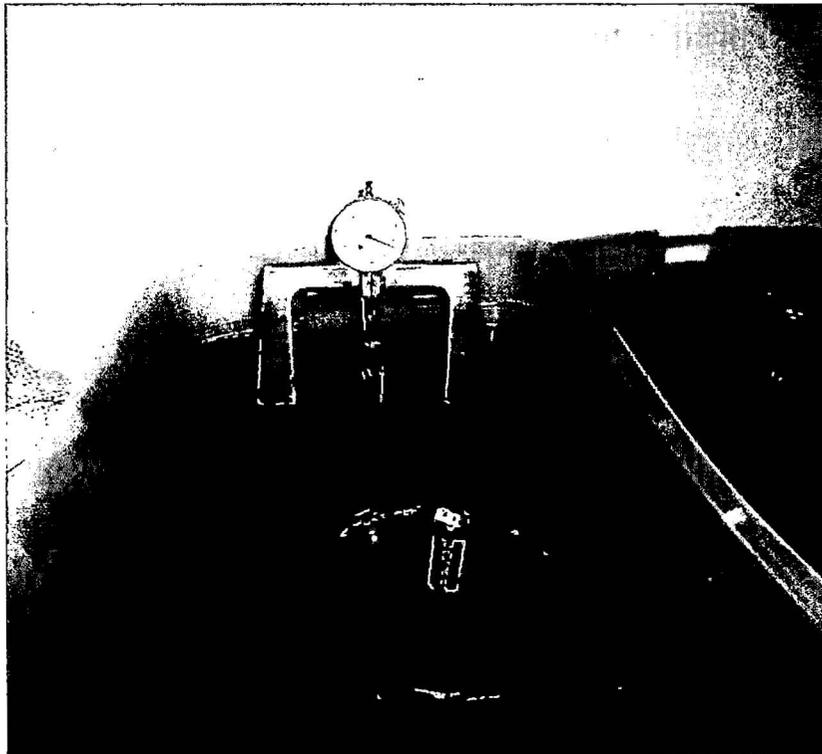


Luego se midió el peso del suelo compactado.

REALIZANDO EL ENSAYO CBR



Preparación de la muestra de arcilla e arcilla con ceniza

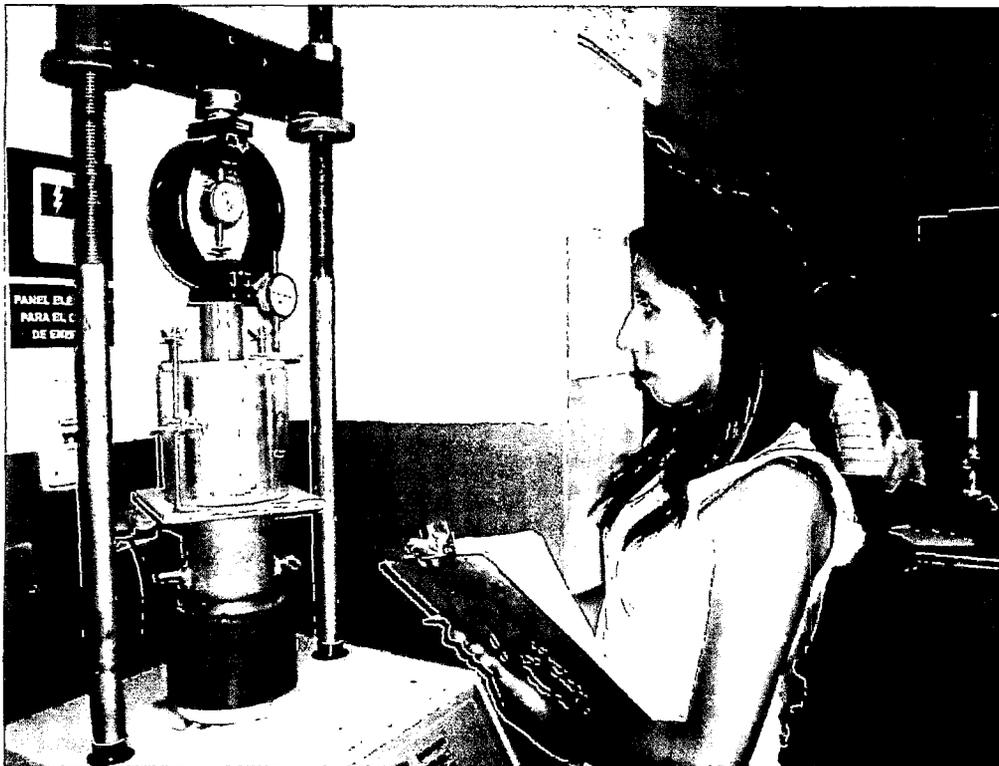


Se midieron las expansiones de los moldes a ensayar.





Se colocó el molde a enseñar al equipo de CBR



Se hicieron las mediciones.