

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TESIS

**“ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS UTILIZANDO
ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE
MEJORADA”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

YONATAN MALCO TORRES MORA

ASESOR:

Msc. Ing. LUIS SERAFÍN GONZALES HÍJAR

Lima – Perú

2019

© 2019, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI a reproducir de la Tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

Torres Mora, Yonatan Malco

ytorresm@uni.pe.

931296893

DEDICATORIA:

A Dios;

A mi madre por su infinita comprensión;

A mis tíos Víctor, Celia,

Dionisio y Susana por su apoyo constante;

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor el ingeniero Luis Gonzales Hjar por haberme brindado su valiosa ayuda en la elaboración de mi proyecto de tesis.

De la misma manera es muy grato agradecer a las personas que laboran en el Laboratorio de Mecánica de suelos de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería por brindarme las facilidades necesarias para realizar mis ensayos para la elaboración de mi proyecto de tesis.

Me es muy grato agradecer también a mi alma mater y en especial a la Facultad de Ingeniería Civil por formarme de manera académica y con valores ; y a cada uno de los docentes por impartir sus enseñanzas a lo largo de mi etapa universitaria.

ÍNDICE

RESUMEN	4
ABSTRACT.....	5
PRÓLOGO	6
LISTA DE TABLAS	7
LISTA DE FIGURAS	8
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	10
1.1. ANTECEDENTES.....	10
1.1.1. Antecedentes Internacionales.....	10
1.1.2. Antecedentes Nacionales	10
1.1.3. Antecedentes Locales	12
1.2. PROBLEMÁTICA.....	13
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	14
1.4. JUSTIFICACIÓN	14
1.5. OBJETIVOS.....	15
1.5.1. Objetivo General	15
1.5.2. Objetivos Específicos.....	15
1.6. HIPÓTESIS.....	16
CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO	17
2.1. BASES TEÓRICAS.....	17
2.1.1. Escoria de cobre	17
2.1.1.1. <i>Definición.</i>	17
2.1.1.2. <i>Origen y proceso de obtención de la escoria de cobre.</i>	18
2.1.1.3. <i>Composición de la escoria de cobre.</i>	19
2.1.1.4. <i>Tipos de escoria de cobre</i>	22
2.1.2. <i>Tipos de estabilización de suelos</i>	24
2.1.2.1. <i>Consideraciones geotécnicas para la estabilización de suelos</i>	25
2.1.2.2. <i>Estabilización mecánica de los suelos</i>	29
2.1.2.3. <i>Estabilización por combinación de suelos</i>	30
2.1.2.4. <i>Estabilización por sustitución de los suelos</i>	30
2.1.2.5. <i>Estabilización de suelos con cal</i>	33
2.1.2.6. <i>Estabilización de suelos con cemento</i>	35
2.1.2.7. <i>Suelos estabilizados con escoria</i>	37

2.1.2.8.	<i>Estabilización con productos asfálticos</i>	38
2.1.3.	Pavimento	38
2.1.3.1.	<i>Definición del pavimento</i>	38
2.1.3.2.	<i>Definición de la subrasante</i>	39
2.1.3.3.	<i>Características de la subrasante</i>	40
2.1.3.4.	<i>Capacidad de soporte de la subrasante</i>	40
2.2.	Normas Técnicas Peruanas	41
2.2.1.	NTP 339.129 (Método de Ensayo para Límites de Atterberg)	41
2.2.2.	NTP 339.128: 1999 (Método de Ensayo para el Análisis Granulométrico)...	41
2.2.3.	NTP 339.141 (Ensayo de Proctor Modificado).....	41
2.2.4.	NTP 339.145: 1999 (Método de Ensayo de CBR)	41
CAPÍTULO III: TRABAJO DE CAMPO		42
3.1.	UBICACIÓN DEL MUESTREO.....	42
3.2.	CANTIDAD DE MUESTRAS SEGÚN NORMATIVA	42
3.3.	EXTRACCIÓN DE LAS MUESTRAS.....	43
3.3.1.	Obtención de la escoria de cobre	43
3.3.2.	Obtención del suelo cohesivo	43
CAPÍTULO IV: ENSAYOS DE LABORATORIO.....		47
4.1.	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA.....	47
4.1.1.	Análisis Granulométrico	47
4.1.1.1.	<i>Definición:</i>	47
4.1.1.2.	<i>Normativa</i>	47
4.1.1.3.	<i>Objetivo del Ensayo</i>	47
4.1.1.4.	<i>Instrumentos y Equipos</i>	47
4.1.1.5.	<i>Procedimiento</i>	48
4.1.1.6.	<i>Cálculos</i>	49
4.1.2.	Límites de Atterberg	50
4.1.2.1.	<i>Definición:</i>	50
4.1.2.2.	<i>Normativa</i>	50
4.1.2.3.	<i>Objetivo del Ensayo</i>	51
4.1.2.4.	<i>Instrumentos y Equipos</i>	51
4.1.2.5.	<i>Procedimiento</i>	51
4.1.2.6.	<i>Cálculos</i>	52
4.1.3.	Clasificación de Suelos	52

4.1.3.1.	Clasificación SUCS:	53
4.1.3.2.	Clasificación AASHTO:	54
4.2.	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA	55
4.2.1.	Ensayo de Proctor Modificado	55
4.2.2.	Ensayo CBR.....	56
4.3.	MÉTODO DE DIMENSIONAMIENTO DEL PAVIMENTO TÍPICO	58
4.4.	EVALUACIÓN ECONÓMICA	59
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS		60
5.1.	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	60
5.1.1.	Ensayos de Caracterización Física	60
5.1.1.1.	Análisis Granulométrico	60
5.1.1.2.	Límites de Atterberg	60
5.1.1.3.	Clasificación de Suelos	61
5.1.1.4.	Gravedad específica de sólidos	62
5.1.2.	Ensayos de Caracterización Mecánica	62
5.1.2.1.	Ensayo de Proctor Modificado	62
5.1.2.2.	Ensayo CBR.....	65
5.2.	DIMENSIONAMIENTO DEL PAVIMENTO TÍPICO.....	67
5.3.	EVALUACIÓN ECONÓMICA	69
CONCLUSIONES		78
RECOMENDACIONES.....		80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		81
SUMARIO DE ANEXOS		83

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se realiza la evaluación de la interacción entre la escoria de cobre y suelo cohesivo como una alternativa para estabilizar subrasantes con baja capacidad de soporte (valor CBR menores de 3%.)

Las muestras de suelos cohesivos fueron extraídos del camino de acceso al centro poblado de Shicuy, distrito de San Juan de Jarpa, provincia de Chupaca, departamento de Junin realizando 3 calicatas de 1.5 metros.

La escoria de cobre fue extraída del depósito de relaves de la refinería de DOE RUN ubicado en la Oroya, con el propósito de determinar si la mezcla con suelo cohesivo eleva el valor de CBR y pueda ser usado como subrasante mejorada.

Mediante los ensayos de laboratorio se demostró que las mezclas de escoria de cobre con el suelo cohesivo presentan mejoras en el valor de CBR, dichos resultados mostraron que la mezcla de 60% suelo natural y 40% escoria de cobre elevan el valor de CBR a 17% considerado según el MTC un subrasante buena, con este valor se obtuvo un espesor de la capa de pavimento a nivel de afirmado de 15 cm, haciendo que los costos de construcción del pavimento a nivel de afirmado se reduzcan en un 20%, adicionalmente se utilizó una mezcla de 27% de escoria de cobre Además se mezcló 70% suelo natural, 27% de escoria de cobre y 3% cemento que hizo incrementar el valor de CBR a 23.7% que es considerado como subrasante muy buena, también se comprobó que reduce la expansión del suelo cohesivo de 3.6% a 0.6%.

El empleo de la escoria de cobre reduce el impacto ambiental dejado por la refinería DOE RUN, ya que se le da un uso alternativo y a la vez aprovecha sus propiedades resistentes.

ABSTRACT

In the present investigation the evaluation of the interaction between the copper slag and the cohesive soil is carried out as an alternative to stabilize sub grades with low support capacity (CBR value less than 3%).

The samples of cohesive soils were extracted from the access road to the town of Shicuy, San Juan de Jarpa district, Chupaca province, Junin department that makes 3 test pits of 1.5 meters.

The copper slag was extracted from the relay deposit of the DOE RUN refinery located in La Oroya, with the purpose of determining if the mixture with the cohesive raise the value of CBR and can be used as an improved subgrade.

Through the laboratory tests, the mixtures of the copper slag with the cohesive soil show improvements in the value of the CBR, the results of the mixture of 60% natural soil and 40% of copper slag raise the value of CBR to 17% according to the MTC named as good subgrade, with this value was obtained a thickness of the layer of pavement as an affirmed of 15 cm, making the costs of pavement construction reduce in a 20%. In addition, 70% natural soil, 27% copper slag and 3% cement were mixed and increased the CBR value to 23.7%, which is considered a very good subgrade. Also it reduces the expansion of cohesive soil from 3.6% to 0.6%.

The use of the copper slag reduces the environmental impact of the DOE RUN refinery. Also it gives an alternative use and at the same time takes advantage of its resistant properties.

PRÓLOGO

En el mundo, uno de los mayores problemas en los suelos cohesivos es la poca capacidad de soporte que presentan debido a la naturaleza mineralógica que estos tienen. Estos problemas se ven reflejados en fallas en las carreteras o pavimentaciones urbanas, lo cual a largo plazo, encarece el proyecto y pone en riesgo la vida útil del mismo.

Por esta razón, se decidió realizar esta investigación, con la finalidad de mejorar este tipo de suelos al adicionarle un material ajeno al suelo, por lo que esta investigación propone analizar en qué cantidad se realiza esta mejora y cuál sería la cantidad óptima, para obtener un suelo de buena calidad y económicamente viable.

En el primer capítulo, se habla sobre los antecedentes de esta tesis, investigaciones pasadas que sirvieron como principal referencia, así como también se expuso la realidad problemática, la formulación del problema y la justificación del proyecto, para luego plantear los objetivos específicos que llevarán al objetivo general.

En el segundo capítulo, tratamos el fundamento teórico de esta investigación, explicando aspectos teóricos básicos sobre la escoria de cobre, los suelos y la estabilización de suelos en general, para luego pasar a la explicación de la estructura del pavimento y la interpretación de las normas.

En el trabajo de campo, el cual es el tercer capítulo, definimos las variables y cómo será la extracción de las muestras. Así mismo, en el cuarto capítulo hablamos sobre los ensayos de laboratorio realizados, desde la clasificación del suelo, hasta el próctor modificado y la capacidad de soporte de suelo (C.B.R.). Se obtuvieron inicialmente 5 tipos de muestras, las cuales son la de suelo natural (para conocer las condiciones iniciales), y las muestras de suelo estabilizadas con 10%, 20%, 30% y 40% de escoria de cobre, siendo la de 40% la que alcanza un valor CBR más alto, Luego, se decidió proponer una muestra más, estabilizada con 27% de escoria de cobre y 3% de cemento, esta mezcla eleva el valor de CBR y disminuye la expansión.

Ing. Luis Serafín Gonzales Híjar

LISTA DE TABLAS

Tabla Nº 1 Óxidos fundamentales presentes en la escoria.....	19
Tabla Nº 2 Principales características físicas de la escoria de cobre.....	20
Tabla Nº 3 Composiciones y estructuras de los silicatos	24
Tabla Nº 4 Espesores recomendados para la sustitución de suelos.....	32
Tabla Nº 5 Rango de cemento requerido para la estabilización de suelo	36
Tabla Nº 6 Categorías de subrasante.....	40
Tabla Nº 7 Clasificación AASHTO.....	55
Tabla Nº 8 Gravedad específica de suelos por Muestra.....	62
Tabla Nº 9 Óptimo Contenido de Humedad (%) por Muestra	63
Tabla Nº 10 Máxima Densidad Seca (gr/cm ³) por Muestra	64
Tabla Nº 11 C.B.R. para el 95% de la M.D.S. (%) por Muestra.....	65
Tabla Nº 12 Expansión (%) por Muestra	66
Tabla Nº 13 C.B.R. para el 95% de la M.D.S. (%) por Muestra.....	68
Tabla Nº 14 Espesor (mm) por muestra	69
Tabla Nº 15 APU Preparación de terreno	70
Tabla Nº 16 APU Colocación de afirmado	71
Tabla Nº 17 . APU de eliminación de material excedente	71
Tabla Nº 18 Costo de la primera alternativa	71
Tabla Nº 19 APU de conformación de subrasante con 10% escoria.....	72
Tabla Nº 20 Costo de la segunda alternativa	72
Tabla Nº 21 APU de conformación de subrasante con 20% escoria.....	73
Tabla Nº 22 Costo de la tercera alternativa	73
Tabla Nº 23 APU de conformación de subrasante con 30 % de escoria	74
Tabla Nº 24 Costo de la cuarta alternativa.....	74
Tabla Nº 25 APU de conformación de subrasante con 40 % de escoria	75
Tabla Nº 26 Costo de la quinta alternativa.....	75
Tabla Nº 27 APU conformación de subrasante 27 % escoria y 3% cemento	76
Tabla Nº 28 Costo de sexta alternativa	76
Tabla Nº 29 Resumen de costos	77

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1: Escoria de Cobre	18
Figura N° 2: Proceso Pirometalúrgico del cobre	19
Figura N° 3: Microscopía de la escoria de cobre	22
Figura N° 4: Difractograma típica de la escoria de cobre minera.....	22
Figura N° 5: Tipos de escoria de cobre	23
Figura N° 6: Algunos tipos de estabilización de suelos	25
Figura N° 7: Proceso de identificación del tipo de suelo.....	28
Figura N° 8: Proceso de selección del tipo de estabilización de suelos	29
Figura N° 9: Proceso de estabilización en un suelo con maquinaria.....	30
Figura N° 10: Estabilización de Suelos con Cal.....	35
Figura N° 11: Estabilización de suelos con cemento	37
Figura N° 12: Lugar de extracción de muestras - San Juan de Jarpa.....	42
Figura N° 13: Reconocimiento de campo - San Juan de Jarpa.....	44
Figura N° 14: Primera calicata realizada - extracción de muestra de suelo	44
Figura N° 15: Segunda calicata - extracción de muestra de suelo	45
Figura N° 16: Tercera calicata - extracción de muestra de suelo	46
Figura N° 17: Carta de plasticidad de Casagrande	54
Figura N° 18: Óptimo Contenido de Humedad (%) por Muestra	63
Figura N° 19: Máxima Densidad Seca (gr/cm^3) por Muestra	64
Figura N° 20: C.B.R. para el 95% de la M.D.S. (%) por Muestra	65
Figura N° 21: Expansión (%) por Muestra.....	66
Figura N° 22: Gráfico para determinar el espesor de la capa de revestimiento. .	67

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Official.
ASTM	: American Society for Testing and Materials.
CBR	: California Bearing Ratio.
C_u	: Coeficiente de uniformidad.
C_c	: Coeficiente de uniformidad.
D_{10}	: Diámetro por debajo del cual queda 10% del peso total.
D_{30}	: Diámetro por debajo del cual queda 30% del peso total.
D_{60}	: Diámetro por debajo del cual queda 60% del peso total.
D_{30}	: Diámetro por debajo del cual queda 30% del peso total.
e	: Espesor de la carpeta de rodadura.
EE	: Ejes equivalentes.
Fc	: Factor de carril de diseño.
Fd	: Factor direccional.
Fpi	: Factor de vehículo pesado del tipo seleccionado.
Fpi	: Factor de presión de neumáticos.
MTC	: Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
Mr	: Módulo de Resiliencia.
NAASRA	: National Association of Australian State Road Authorities.
NTP	: Norma Técnica Peruana.
PAMA	: Programa de Adecuación y Manejo Ambiental.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

1.1.1. Antecedentes Internacionales

En una investigación (Rojas y Piracon, 2007) se comparó las propiedades físico - mecánicas del multienzemático (Perma Zyme 11 X) y el cemento para estabilizar una capa de material granular de la localidad 11 de Bogotá. Los ensayos de CBR arrojaron 27% para el material granular, 57% a la mezcla de material granular con aditivo Perma Zyme 11X y 98.8% a la mezcla de 7% de cemento con material granular. Concluyendo que ambos estabilizantes mejoran las resistencia del material ensayado.

Con el objetivo principal de incrementar las características principales de las propiedades mecánicas de la subrasante, (Caamaño, 2016) realizó ensayos para determinar el comportamiento del módulo resiliente al mezclar ceniza de cascarilla de arroz en porcentajes de 2, 4 y 6% con el material granular de la subrasante de la vía Pedregal, en el departamento de Nariño, Colombia; este material presenta un módulo resiliente de 45 MPa. Luego de ensayar las 3 mezclas mencionadas llegó a la conclusión que el porcentaje óptimo de ceniza de cascarilla de arroz que incrementa el módulo resiliente a 65 Mpa es de 4%, ya que al incrementar el porcentaje de ceniza a 6% el módulo resiliente desciende a 62.5 Mpa.

1.1.2. Antecedentes Nacionales

León y Peña (2017) lograron obtener el contenido óptimo de escoria de horno eléctrico para estabilizar la subrasante del jirón Bolognesi en Chimbote, logrando elevar el valor de CBR y disminuyendo de esta manera el espesor del pavimento, esta investigación demuestra que es factible elevar la capacidad resistente de un suelo arcilloso utilizando escoria.

La metodología de esta investigación es experimental porque se realizaron ensayos para caracterizar el material granular in situ posteriormente se realizaron los ensayos de laboratorio para determinar el porcentaje óptimo de contenido de humedad y CBR con escoria, los resultados de estos ensayos sirvieron para realizar el diseño estructural y la determinación de los espesores de las diferentes capas de un pavimento por el método AASHTO 93.

Choque (2016) planteó como objetivo en su investigación evaluar la escoria producida en la planta Siderúrgica de Chimbote (Sider Peru) como agregado para base, sub base, y mezcla asfáltica de acuerdo a las especificaciones técnicas basadas en las normas NTP, ASTM y AASHTO. La metodología empleada fue cuantitativa y experimental, debido a que se realizaron ensayos de laboratorio para determinar las propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica; se realizaron ensayos de granulometría, sulfatos de sodio para determinar la durabilidad, la máquina de los ángeles para determinar la resistencia al desgaste de los agregados y el ensayo de California Bearing Ratio (CBR). Para la caracterización química de la escoria se hizo el ensayo de difractograma de rayos x, y para la composición de la escoria se realizó el método de la absorción atómica. Luego de caracterizar la escoria y el agregado tradicional se evaluaron tres mezclas asfálticas con diferentes dosificaciones de agregado tradicional - escoria en los porcentajes de (100%, 0%), (70%, 30%), (60%, 40%, 10%). La mezcla con 100% agregado se utilizó como patrón de comparación para conocer las diferencias entre las mezclas con escoria, para el diseño de mezcla se utilizó el método Marshall (AASHTO T=245), la mezcla que presento mejor comportamiento fue la mezcla de agregado tradicional con escoria de acería eléctrica en porcentajes de 70% y 30%, concluyendo así que la escoria puede ser utilizada como agregado para base, sub base y mezcla asfáltica.

Angulo (2012) investigó las propiedades mecánicas de la subrasante con suelo arcilloso de mala calidad ubicado en Piura. Para la estabilización se incorporó porcentajes de cal. Concluyendo que la cal disminuye la plasticidad e incrementa el valor del CBR.

1.1.3. Antecedentes Locales

Ccoillo (2016) demostró la influencia de la escoria de altos hornos en el comportamiento de la subrasante del pavimento de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Concluyendo que el valor de CBR del suelo natural se incrementa de 5.61% hasta 70% al adicionar 40% de escoria de altos hornos y la expansión se reduce de 1.5% hasta 0.55%.

Pérez (2014) logró estabilizar la subrasante de un suelo arcilloso con cenizas de carbón. La metodología aplicada fue del tipo experimental y cuantitativa, para determinar las propiedades mecánicas y físicas del suelo arcilloso se efectuaron ensayos de granulometría por medio de mallas granulométricas y por hidrometría, contenido de humedad, límites de consistencia, 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 los ensayos de caracterización física, materia orgánica y composición química, fluorescencia de rayos X y dispersión. Los ensayos anteriormente mencionados se realizaron primero para el suelo natural como una muestra patrón, posteriormente para el suelo estabilizado con cenizas de carbón en diferentes porcentajes de peso (10%, 20% , 30% y 40%). Llegando a incrementar el valor de CBR de 8.3% hasta 20.8%, con este valor el suelo arcilloso puede ser empleado como capa de sub-rasante mejorada de pavimentos de alto volumen de tráfico y/o como un pavimento de bajo volumen de tráfico. Esta investigación es un antecedente directo del trabajo que se desarrollará, debido a que

se tomarán como referencia los ensayos de laboratorio realizados tanto al suelo como a la ceniza de carbón.

1.2. PROBLEMÁTICA

En el mundo, los suelos arcillosos han presentado problemas en diversos proyectos de ingeniería civil, debido a su baja capacidad de soporte y mala calidad, estos problemas subyacen a su naturaleza mineralógica y mecánica encareciendo el costo de construcción de una carretera, así surge la necesidad de aumentar su capacidad de soporte y reducir los costos.

En el Perú, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), en su Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos del año 2014, recomienda que los últimos 0.60 m del suelo que servirá como subrasante, la capacidad de soporte deberá ser mayor a 6%. Aquellos suelos que no cumplan con este requisito se considerarán como suelos malos para soportar la estructura del pavimento, teniendo así que estabilizarse para poder aumentar dicha resistencia.

Eso sucede mucho más en suelos cohesivos que trabajan como trocha carrozable debido a que son caminos para bajo tránsito vehicular, cuya vida útil suele ser poca y su deterioro rápido, sobre todo si es que el camino se encuentra en un ambiente agresivo, es por eso que se buscan constantemente nuevas tecnologías para poder contrarrestar dichos efectos que ocasionan daños en los caminos de bajo tránsito, y por ello a la calidad de vida de las personas que viven cerca a dichos caminos.

La producción de cobre y otros minerales por la refinería ubicada en la Oroya (DOE-RUN) han generado durante años acumulación de escoria de cobre, que hasta la actualidad están depositados a los costados de la carretera central a unos metros de la ciudad; estos depósitos se han convertido en un pasivo ambiental.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Los suelos cohesivos presentan generalmente bajos valores de CBR, alta plasticidad y expansión de su volumen al contacto con el agua, estos problemas hacen que no sean aptos como suelo de fundación para una subrasante y encarecen el costo de construcción.

El acceso hacia el centro poblado Shicuy en el distrito de San Juan de Jarpa provincia de Chupaca parte desde la carretera Cañete Yauyos, este acceso creado de manera rústica por los pobladores de la zona, tiene en sus 5 km de distancia material arcilloso que en época de lluvia hace peligroso su tránsito debido a su naturaleza plástica del suelo cohesivo, frente a este problema surge la necesidad de estabilizar la subrasante y mejorar las características mecánicas resistentes utilizando escoria de cobre.

En departamento de Junin, provincia de Yauli se encuentra la refinería de cobre DOE – RUN que habiendo cerrado sus operaciones en los años 2009 por no cumplir con el programa de adecuación ambiental PAMA deja pasivos ambientales como son la escoria de cobre depositadas cerca a la ciudad y adyacentes a la carretera central.

1.4. JUSTIFICACIÓN

En obras de ingeniería de caminos, la subrasante es la base donde se apoyan las diferentes capas de la estructura de un pavimento. La capacidad de soporte de esta subrasante sirve como patrón para conocer la vida útil de un pavimento, ya que a mayor valor de CBR, menor será los costos en mantenimiento.

Desde el punto de vista económico, se justifica este proyecto porque pretende elevar el valor del CBR y disminuir el costo de mantenimiento, que en carreteras suelen ser muy altos; muchas veces por no mejorar el nivel de subrasante se generan problemas como la expansión o contracción de los suelos cohesivos, los cuales se ven reflejados en daños estructurales. A menudo no se toma en cuenta el mantenimiento en su real dimensión y las carreteras deben ser reparadas cuando las

fallas como los agrietamientos o el ahuellamiento son muy notorios, esta última falla se presenta por la mala calidad de la subrasante. Con el fin de reducir esos costos de mantenimiento es importante tener un adecuado CBR en la subrasante. (Cusato y Pastor 2008)

Desde el punto de vista técnico, la estabilización de suelos es un método que ya se ha utilizado en suelos con baja capacidad portante, a través de otros materiales como lo son la cal y el cemento, sin embargo, el realizarlo con residuos de materiales como la escoria de cobre, desarrollaría nuevas formas de realizar controles de calidad o diseños estructurales del pavimento.

Desde el punto de vista científico, es importante desarrollar nuevas tecnologías aplicadas a la ingeniería civil, así como nuevos métodos de estabilización de suelos. El aporte de esta investigación servirá como base para futuros trabajos que puedan generar mayor conocimiento.

Finalmente, desde el punto de vista ambiental, la reducción y el reciclaje es importante para el desarrollo sostenible, debido a que la producción de cobre origina altos volúmenes de escoria (residuo) que son apilados en los depósitos de material excedente, por ello la reutilización de este material puede reducir los impactos ambientales y a su vez mejorar los suelos para un propósito ingenieril, haciendo eficiente su uso.

1.5. OBJETIVOS

1.5.1. Objetivo General

Obtener el porcentaje óptimo de escoria de cobre para estabilizar un suelo cohesivo arcilloso para su uso como capa de subrasante de un pavimento.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Realizar los ensayos de caracterización física del suelo.
- Hacer los ensayos mecánicos para obtener una proporción adecuada de escoria de cobre con suelo cohesivo que cumpla con las especificaciones técnicas para su uso como capa subrasante.

- Evaluar económicamente el costo del afirmado estabilizado y sin estabilizar.

1.6. HIPÓTESIS

El suelo estabilizado con escoria de cobre con 10%, 20%, 30% o 40% tendrá un buen comportamiento y un adecuado CBR para su uso como subrasante, cumpliendo así con los parámetros mínimos exigidos por el Manual de Carreteras. La estabilización de un suelo cohesivo con escoria de cobre ocurre cuando las partículas de la escoria de cobre disminuyen el porcentaje de finos en un suelo arcilloso, ya que se sustituye los finos del suelo arcilloso por partículas de la escoria de cobre que tienen mayor diámetro es decir es una estabilización mecánica por combinación de suelos.

Basándonos en los objetivos específicos planteados, la hipótesis sugiere que el tipo de suelo estudiado tendrá una buena interacción con la escoria de cobre, que gracias a su composición mineralógica, mejora las propiedades de este cuando es utilizado como subrasante.

Para esto se estudian 4 porcentajes, 10%, 20%, 30% y 40%; la investigación dará alcances sobre la evolución de la interacción de dichos materiales conforme se vayan presentando los porcentajes planteados de la escoria de cobre en el suelo.

El resultado de mejorar el valor de CBR para una subrasante también generará un impacto positivo en los costos de construcción.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. BASES TEÓRICAS

2.1.1. Escoria de cobre

La finalidad de esta investigación es estudiar la viabilidad del uso de la escoria de cobre como estabilizante de la subrasante de un pavimento. Por ello, debemos estudiar las definiciones, características y propiedades de este tipo de residuo.

2.1.1.1. Definición.

El cobre es un material con una alta demanda por la actual industria, y es empleado en diversos sectores como la construcción, electricidad, medicina y otras ramas. Pero para que cumpla los requisitos mínimos de funcionabilidad y de calidad, este material debe pasar por procesos industriales y químicos que permitan la obtención de un cobre de alta pureza a partir de los materiales concentrados de cobre. (Nazer, y otros 2010)

Por esta razón, al obtener este metal de alta pureza se generan residuos como la escoria de cobre. La escoria de cobre (ver Figura N°1) es un material que proviene del proceso pirometalúrgico masivo producido por la fusión de los materiales concentrados de cobre en la fundición y fue depositado en botaderos que son autorizados. Este tipo de escoria es considerada como un pasivo ambiental y puede permanecer por un largo tiempo en los lugares donde fueron depositados. (Nazer, y otros 2010)



Figura N° 1: Escoria de Cobre

Fuente: Google Imágenes

2.1.1.2. Origen y proceso de obtención de la escoria de cobre.

Al principio, la escoria es enfriada en su estado natural en el lugar donde fue depositado al finalizar el proceso pirometalúrgico. Este material tiene en su composición interna óxidos de hierro, silicio y aluminio. Además, dentro de su caracterización mineralógica normalmente se puede observar que la escoria de cobre contiene minerales como de fayalita y magnetita, entre otras composiciones. La escoria de cobre es un residuo que se genera en grandes cantidades anualmente, alcanzando un número de 24.6 millones de toneladas aproximadamente. (Nazer, y otros 2010)

Para una mejor explicación del proceso pirometalúrgico del cobre y como es el proceso de obtención de las escorias de cobre, podemos ver la Figura N°2.

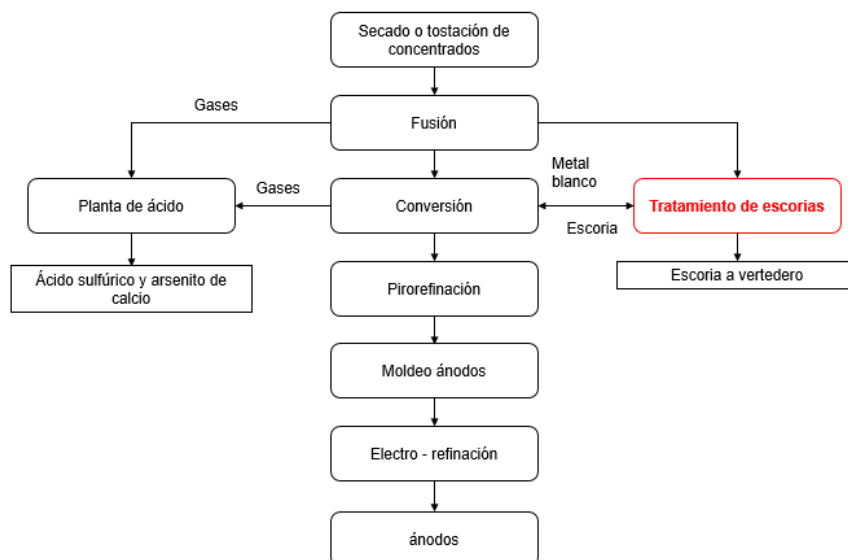


Figura N° 2: Proceso Pirometalúrgico del cobre

Fuente: (Pérez, 2017)

2.1.1.3. Composición de la escoria de cobre.

La escoria de cobre está compuesta por óxidos que están tanto en la carga del horno, como los que se producen durante el proceso de pirometalurgia anteriormente mencionado. Generalmente, los óxidos que se obtienen de forma común de la escoria de cobre varían según la naturaleza de los minerales, los materiales utilizados para su fundición, los concentrados, los procesos de operación y mantenimiento y otros factores relacionados con el proceso de producción del cobre. Estos óxidos se pueden observar en la Tabla N°1:

Tabla N° 1 Óxidos fundamentales presentes en la escoria

Tipo de óxido	Presencia en la escoria (%)
Óxidos de hierro (FeO, Fe ₃ O ₄)	30 - 40
Óxidos de silicio (SiO ₂)	35 - 40
Óxidos de aluminio (Al ₂ O ₃)	0 - 10
Óxidos de calcio (CaO)	0 - 10

Fuente: (Perez 2017)

La composición física, química y las propiedades mecánicas dependen de la naturaleza de la materia prima utilizada, la tecnología utilizada para llevar a cabo la refinación, así como también el proceso de refinación utilizado. Esto se debe porque las escorias desde los 1600°C se encuentran en un estado líquido, por lo que su estructura nueva dependerá del proceso de enfriamiento. Si existe un enfriamiento rápido, la estructura colapsará y presentará una estructura sin forma y sus propiedades serán parecidas a las de un material altamente reactivo. (Perez 2017)

Considerar las fases cristalinas y vítreas es importante debido a que en la fase vítrea se encuentra el componente hidráulicamente activo de la escoria, considerándose así a la fase cristalina como inerte, mientras que la fase vítrea supera en un 69% en el caso de la escoria de alto horno. En la fase vítrea, el porcentaje varía desde un 45% si es que es enfriado lentamente y hasta un 95% para las escorias enfriadas de manera brusca. (Perez 2017).

Eso lo podemos observar en la Tabla N°2 donde muestran las siguientes características:

Tabla N° 2 Principales características físicas de la escoria de cobre

Características	Detalle
Apariencia	Color negro, textura lisa o porosa
Forma de las partículas	Irregular con bordes agudos
Densidad (kg/m ³)	3160 - 3870
Absorción de agua (%)	0.15 - 0.55
Dureza	4 - 6
Granulometría	Variada según su formación

Fuente: (Perez 2017)

Debido al sistema de producción, la escoria tiene una matriz vítrea, la cual mantiene a los metales pesados atrapados, eliminando así la posibilidad de lixiviar. Por esta razón, la escoria es considerada como un material inerte lo cual permite que su uso sea en sistemas de aplicación directa.

En la investigación de Pérez (2017) Se ha mencionado que el sistema de enfriamiento empleado es importante a la hora de desarrollar distintos tipos de escoria. Como se dijo anteriormente, al existir un enfriamiento brusco al aire suele generar una escoria porosa y ligera, la cual es muy apta para fabricar hormigones ligeros. Todo lo contrario, si el enfriamiento se realiza lentamente, se recrystalizará la escoria, aumentándose así la dureza y reduciendo la porosidad y la absorción del material. Esto resulta en un material muy conveniente para el desarrollo de morteros, estructura de carreteras, balasto para los rieles del ferrocarril o incluso como agregados para hormigones.

Como podemos observar, en conclusión, el proceso de fabricación, producción y refinamiento del cobre tiene mucho que ver con las propiedades y características mecánicas y físicas que tendrá la escoria, es por eso la gran importancia conocer para efectos de esta investigación, la procedencia de la escoria de cobre utilizada para estabilizar la subrasante en suelos cohesivos.

Para efectos de esta investigación, una de las caracterizaciones químicas que se realizarán en la escoria de cobre es la difracción de rayos X, en los cuales observaremos la mineralogía de dicho residuo (ver Figura N°4). Para poder tener un mayor alcance a nivel microscópico se puede observar una figura (Figura N°3) que muestra una fotografía a través de la microscopía electrónica de barrido, el cual nos muestra el tamaño la partícula.

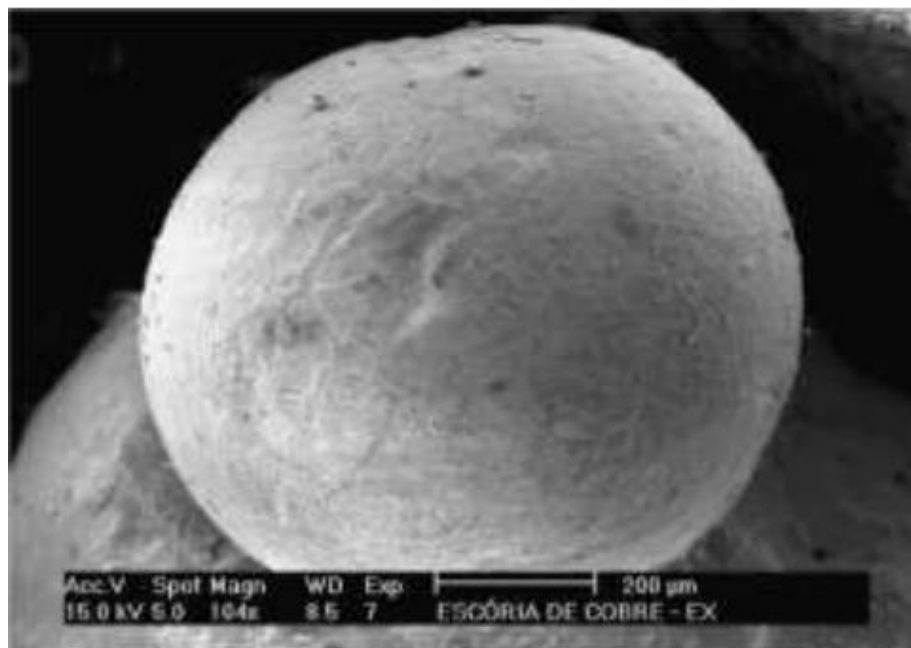


Figura N° 3: Microscopía de la escoria de cobre

Fuente: (Perez 2017)

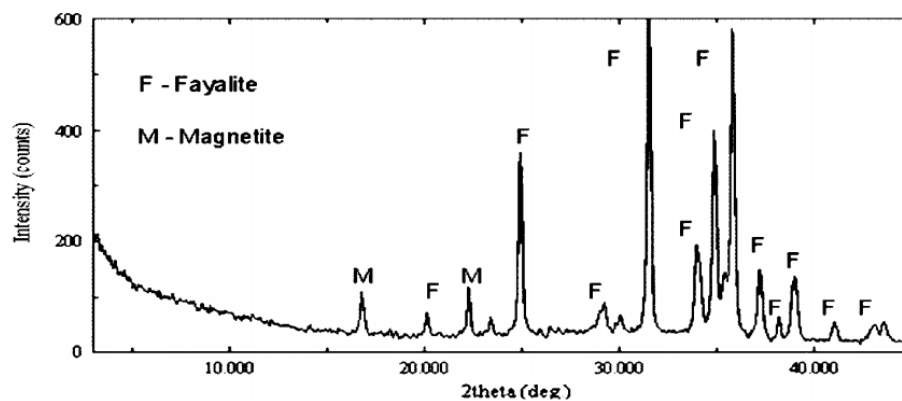


Figura N° 4: Difractograma típica de la escoria de cobre minera

Fuente: (Perez 2017)

2.1.1.4. Tipos de escoria de cobre

Como se puede observar en la Figura N°5, los tipos de escoria de cobre se clasifican principalmente según los elementos que la componen como por el proceso de enfriamiento que sufre al momento de ser vertida:

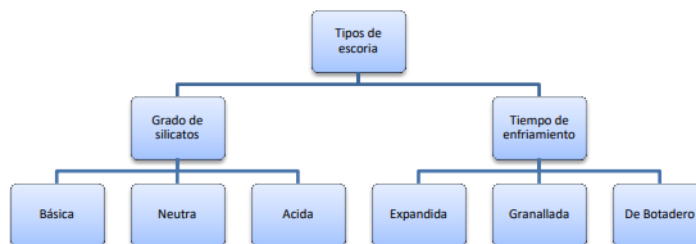


Figura N° 5: Tipos de escoria de cobre

Fuente: (Perez 2017)

Debido a que principalmente la escoria de cobre está compuesta en base a óxido de Hierro, óxido de Sílice, de Aluminio y de Calcio entre otros, varía su grado de silicatos dependiendo de la combinación que estos óxidos puedan presentar.

Para determinar si la escoria posee un carácter químico neutro, ácido o básico, se utiliza tanto el Índice de Silicatación como el Grado de saturación. El Índice de Silicatación (i), es la razón entre el contenido de oxígeno de la proporción sílice que forma la escoria, y el contenido en oxígeno de la proporción de todos los óxidos que la forman (incluyendo Al_2O_3), como sigue en la siguiente expresión. (Perez 2017)



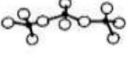
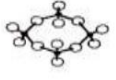

Fórmula N°1 Índice de silicatación

$$i = \frac{O \text{ de } SiO_2}{O \text{ de las Bases}}$$

Cuando este índice es igual a uno, la escoria es considerada como neutra. Si es mayor que uno se considerará como ácido, todo lo contrario que cuando es menor a uno, en el cual se considera como básica.

Esto se puede observar de una mejor manera en la Tabla N°3.

Tabla N° 3 Composiciones y estructuras de los silicatos

Tipo de Escoria	Grado de Silicato*	Ejemplos de Composiciones	Aniones Principales	Estructuras Moleculares
Básica	< 1	3FeO*SiO ₂ 2FeO*CaO* SiO ₂	O ²⁻ , SiO ₄ ⁴⁻	 SiO ₄ ⁴⁻
Neutra	1	2CaO*SiO ₂ CaO*FeO* SiO ₂	SiO ₄ ⁴⁻	
		4CaO*3 SiO ₂ 2CaO*2FeO*3 SiO ₂	Cadena de aniones de silicato	 Si ₃ O ₁₀ ⁸⁻
Ácida	> 1	4(CaO* SiO ₂)	Anillo de aniones de silicatos	 Si ₄ O ₁₂ ⁸⁻
		3(CaO*2SiO ₂)	Anillos de aniones de silicato conectados	 Si ₆ O ₁₅ ⁶⁻

Fuente: (Perez 2017)

2.1.2. Tipos de estabilización de suelos

El mejoramiento de los suelos a través de la estabilización es definido como el incremento en la calidad de las propiedades mecánicas y físicas del suelo, en este caso, de la subrasante, para incrementar la capacidad de soporte. Dicha estabilización se realiza a través de procesos químicos, físicos, naturales o sintéticos. Estos estabilizadores, generalmente, se realizan en subrasantes inadecuadas o pobres. Estas pueden realizarse con suelo cemento, suelo asfalto y otros productos. Las bases o subsasas tratadas son cuando estas capas del pavimento han sido estabilizadas para obtener una mejora en algunas propiedades. Cabe señalar que depende del tipo de estabilización para obtener las mejoras en ciertas propiedades (no todos los estabilizantes mejoran las mismas propiedades), además de verse el aspecto económico. (Pérez 2014)

El Ministerio de Transportes y Comunicaciones en su Manual de Carreteras: Suelos, geología, geotécnica y pavimentos (2014) indica que la estabilización de suelos consiste en “dotar a los mismos, de resistencia mecánica y permanencia de tales

propiedades en el tiempo. Las técnicas son variadas y van desde la adición de otro suelo, a la incorporación de uno o más agentes estabilizantes. Cualquiera sea el mecanismo de estabilización, es seguido de un proceso de compactación”.

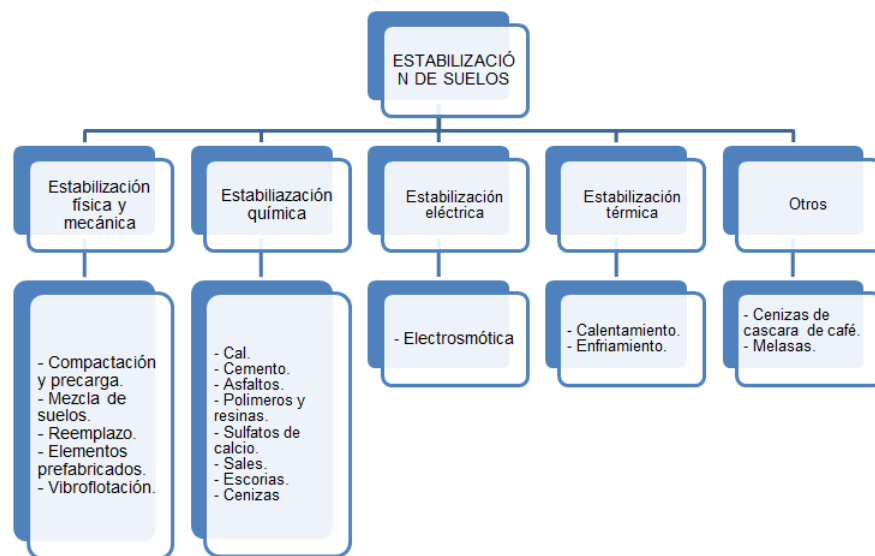


Figura N° 6: Algunos tipos de estabilización de suelos

Fuente: Perez, 2012

2.1.2.1. Consideraciones geotécnicas para la estabilización de suelos

Las siguientes consideraciones serán extraídas del Manual de Carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos (2014), esto se debe a que es la norma que rige la estabilización de suelos en subrasantes en este país, por lo tanto deben ser tomados en cuenta los parámetros dados en este manual:

Serán considerados como materiales o suelos de buena calidad para las capas de la subrasante aquellos que tengan un CBR mayor o igual a 6%. Si es menor, será considerada como una subrasante no apta o inadecuada, estos casos están presentes generalmente en zonas locales húmedas o áreas de suelos con características blandas; de presentar cualquiera de los casos mencionados será necesario realizar estudios para determinar si se requiere una

estabilización, estos estudios estarán a cargo del ingeniero responsable del proyecto, quien analizará las diversas técnicas de estabilización de suelos, mejoramiento o incluso reemplazo de la subrasante. Si la opción elegida es realizar la estabilización del suelo, se tienen las siguientes posibilidades: Una estabilización a través de procesos mecánicos, reemplazo del suelo de la subrasante, estabilización con productos químicos o aditivos que mejorarán las propiedades del suelo, estabilización con geosintéticos (geotextiles, geomallas u otros), pedraplenes, capas de arena, subir el nivel de la rasante o modificar el trazo geométrico de la carretera si es que las alternativas analizadas resultan ser poco económicas y complejas. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2014)

Si la subrasante es de tipo arcillosa o limosa, las capas de material granular sea sub base o base ante la presencia de agua tienden a contaminarse con partículas del material arcilloso por capilaridad, por esta razón se proyectará un material anticontaminante de un espesor mínimo de 10 cm o un geotextil. Esto se deberá justificar mediante un informe del ingeniero a cargo del proyecto. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2014)

El nivel de la subrasante tendrá una dependencia de la profundidad donde se encuentre el nivel freático y de la calidad del suelo, tendrá como mínimo 0.60 m por encima del nivel freático si el suelo es de buena calidad con buenas propiedades mecánicas, estará por encima del nivel freático 0.80 m cuando se trate de una subrasante regular, 1.00 m si es un suelo pobre y 1.20 m si se trata de un suelo inadecuado y de mala calidad. De ser necesario, se colocarán subdrenes o capas anticontaminantes para asegurar que la estructura del pavimento no se vea afectado, o se evaluará una posible elevación del nivel de la rasante. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2014)

En lugares que se encuentren por encima de los 4,000 msnm, será necesario evaluar la influencia de las bajas temperaturas en los

suelos. Generalmente, el congelamiento se asocia a la profundidad del nivel freático y a que tan susceptible es un suelo al congelamiento. Si la profundidad del nivel freático es mayor a 1.20 m, el congelamiento tiene casi nula posibilidad de alcanzar la capa superior de la subrasante. Todo lo contrario sucede cuando el nivel freático se encuentra en la capa superior de la subrasante, es decir, a una profundidad de 0.60 m; la posibilidad de congelamiento es mayor, de ser este el caso, este suelo será reemplazado con el espesor necesario para evitar el congelamiento o se elevará el nivel de la rasante con un relleno de material granular que cumpla con las condiciones mínimas de calidad. Los suelos susceptibles al congelamiento son generalmente los suelos limosos, para determinar si un suelo es susceptible al congelamiento se pasará por los tamices granulométricos y se determinará la distribución granulométrica del suelo, se considera un suelo susceptible al congelamiento si el porcentaje de suelo que pasa el tamiz de diámetro 0.02 mm es mayor a 3%, con la excepción de arenas finas uniformes que a pesar que más del 10% pasa por el tamiz anteriormente mencionado no es susceptible al congelamiento. Mejor dicho, los suelos en los que el porcentaje que pasa por el tamiz de diámetro de 0.02 mm sea menor a 3% no serán suelos susceptibles al congelamiento. Por otro lado, la curva granulométrica para los suelos que contengan partículas que pasen la malla N°200 (0.074 mm) será determinada mediante la sedimentación o hidrometría. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2014)

Para determinar el método de estabilización de un suelo se requiere conocer las propiedades mecánicas del suelo a estabilizar. Sin embargo, los suelos con mayor probabilidad a ser estabilizados son los limos, las arcillas, o las arenas limosas o arcillosas. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2014)

El proceso para caracterizar un suelo y elegir el tipo de estabilización se muestra en la figura N°7.

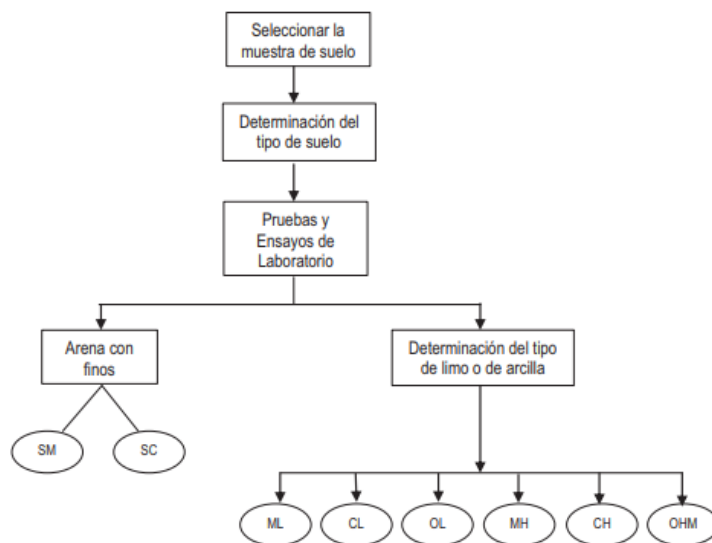


Figura N° 7: Proceso de identificación del tipo de suelo

Fuente: Manual de Carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos

El Ministerio de transporte y comunicaciones (2014) considera las siguientes características del suelo serán determinantes para elegir el tipo de estabilización:

- Características físicas y mecánicas del suelo que será estabilizado.
- Uso del suelo que será estabilizado (propuesta).
- Tipo de aditivo o agente estabilizador del suelo.
- Experiencia del tipo de estabilizador que se utilizará en subrasantes de similares características físicas y mecánicas.
- Fácil obtención en el mercado para el aditivo estabilizador.
- Obtención sin obstrucciones del equipo adecuado para realizar la estabilización de suelos.
- Estudio económico en el que se compararán diferentes propuestas de solución para tener en cuenta el costo – beneficio.

En la Figura N°8 se visualiza el diagrama de flujo que la norma MTC (2014) propone para elegir un agente estabilizador.

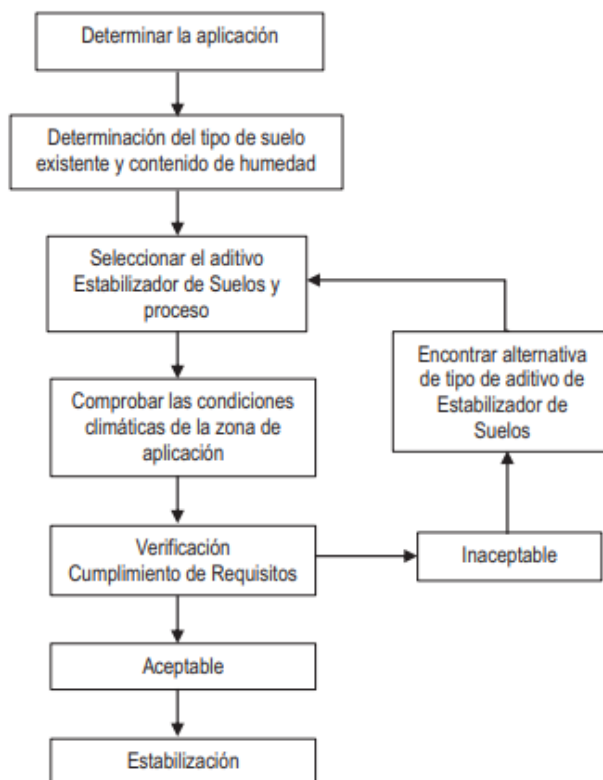


Figura N° 8: Proceso de selección del tipo de estabilización de suelos

Fuente: Manual de Carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos

2.1.2.2. Estabilización mecánica de los suelos

En este caso, la estabilización mejorará las propiedades físicas del suelo que yace naturalmente, sin cambiarse la estructura ni la composición natural del suelo. Normalmente el procedimiento para estabilizar este tipo de suelos es la compactación, el cual es un proceso mecánico que reduce el porcentaje de vacíos que contiene un suelo. Este proceso se realiza en la construcción de carreteras utilizando un rodillo compactador como se muestra en la Figura N°9.



Figura N° 9: Proceso de estabilización en un suelo con maquinaria

Fuente: Google Imágenes

2.1.2.3. Estabilización por combinación de suelos

En este caso, se realizará la estabilización a través de la combinación o mezcla del suelo original con material de buena calidad (de préstamo). El suelo existente será disgregado o escarificado, en una profundidad de aproximadamente quince centímetros y posteriormente se colocará el material de préstamo. Se eliminará las partículas cuyo diámetro es mayor a setenta y cinco milímetros y se humedecerán las muestras hasta alcanzar el porcentaje óptimo de compactación. Posteriormente se realizará la mezcla de los suelos, se acomodará y compactará de acuerdo a la exigencia de densidad y espesores hasta la cota de la subrasante exigida por el proyecto. El material de préstamo se aplicará en lugares designados por el estudio de suelos, utilizando la cantidad necesaria y la calidad que garantice que la mezcla (suelo con material de préstamo) cumpla con los parámetros exigidos en la Sección 207 de las Especificaciones Técnicas Generales para Construcción de Carreteras 2013. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2014)

2.1.2.4. Estabilización por sustitución de los suelos

Siempre que se requiera que la subrasante esté compuesta únicamente de material seleccionado, se presentan dos únicos casos, el primer caso es cuando la capa se construirá de manera directa sobre el suelo natural, y el segundo cuando deba ser excavada anteriormente y reemplazada por el material adicionado.

En el primero de los casos, el suelo original se tendrá que remover o escarificar, luego acomodar y compactar de acuerdo a la densidad especificada para cuerpos de un terraplén en una profundidad de 15 cm, una vez hecho esto, se considera que el suelo que soporta la subrasante está preparado correctamente. Luego, se autoriza la colocación de los materiales en espesores previstos según el estudio del proyecto, cumpliendo el nivel de la subrasante y densidad exigida; empleando las técnicas y equipos de compactación apropiados; para tener una correcta compactación el suelo removido será humedecido o aireados, según sea necesario, hasta obtener la humedad óptima de compactación requerida. Para el segundo caso, el mejoramiento con un material totalmente nuevo implica el reemplazo total del suelo existente, de acuerdo al espesor de diseño, cuando se haya alcanzado el nivel de excavación indicado, se procederá a colocar y compactar en capas el material de préstamo hasta alcanzar los niveles exigidos. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2014).

El estudio de mecánica de suelos indicará el espesor que sea necesario reemplazar en la subrasante considerando para ello el tipo y la cantidad de vehículos que circulen por dicha carretera, sin embargo en la Tabla N°4 se plantea recomendaciones de espesores de reemplazo con material de préstamo para subrasantes con CBR entre 3 y 6%.

Tabla Nº 4 Espesores recomendados para la sustitución de suelos

Tráfico		Espesor de Reemplazo con Material CBR>10% (cm)
0	25 000	25.0
25 001	75 000	30.0
75 001	150 000	30.0
150 001	300 000	35.0
300 001	500 000	40.0
500 001	750 000	40.0
750 001	1 000 000	45.0
1 000 001	1 500 000	55.0
1 500 001	3 000 000	55.0
3 000 001	5 000 000	60.0
5 000 001	7 500 000	60.0
7 500 001	10 000 000	65.0
10 000 001	12 500 000	65.0
12 000 001	15 000 000	65.0
15 000 001	20 000 000	70.0
20 000 001	25 000 000	75.0
25 000 001	30 000 000	75.0

Fuente: Manual de Carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos (2013).

2.1.2.5. *Estabilización de suelos con cal*

El suelo-cal (ver Figura N°10) se obtiene a través de la mezcla de agua, cal y suelo. La cal utilizada es óxido cálcico (cal anhidra o cal viva), el cual se obtiene mediante la calcinación de piedras calizas, o hidróxido cálcico (cal hidratada o cal apagada). Este tipo de cal también es llamada aérea debido a su propiedad de carbonatarse o endurecerse al contacto con el aire, y llamadas cal hidráulica cuando estas se carbonatan al contacto con agua, esta propiedad se debe a la presencia del anhídrido carbónico. (Angulo 2012)

Después que se estabiliza el suelo con cal, se produce dos reacciones una rápida llamada floculación e intercambio iónico, y una reacción posterior mucha más lenta llamada puzolánica. La sílice y alúmina que contienen las partículas del suelo se mezclan con la cal cuando están en estado de saturación para formar silicatos y aluminatos cálcicos insolubles. Una de las consecuencias más significativas de la cal cuando se adiciona al suelo, es el de cambiar de manera significativa su plasticidad. Por ejemplo, en los suelos que tienen un índice de plasticidad menor a 15%, aumentan ambos límites de consistencia los cuales se usan para calcular el índice de plasticidad; en cambio, en los suelos que tienen un índice de plasticidad mayor al 15%, disminuye dicho índice de plasticidad. Con la ayuda de la cal, el suelo se ve beneficiado en la humedad óptima de compactación, viéndose esto reflejado en el ensayo del proctor modificado, que de otro modo no se permitiría la construcción de carpeta asfáltica encima de ellos. (Melendrés 2016)

Los suelos que poseen de acuerdo a su granulometría un gran porcentaje de finos y alta plasticidad se estabilizan con cal, estas características mencionadas las tienen generalmente los suelos arcillosos. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2014).

La puesta en obra se realiza de una manera más fácil y rápida, debido al aumento que tuvo su plasticidad y la humedad óptima de compactación. Es normal que la mezcla se realice en dos periodos, con un período intermedio de reacción de uno a dos días.

El uso más común de la cal, cuando se habla de estabilizaciones de suelo, es en subrasantes y como carpeta de rodadura, en zonas donde se encuentra suelos con altos contenidos de arcilla en su estructura o en canteras donde el material predominante es el granular. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2014).

La National Lime Association resume que las propiedades físicas que el suelo obtiene luego de ser estabilizado con cal son:

- Una reducción en el índice de plasticidad, esto se debe a una disminución del límite líquido y a un aumento del límite plástico.
- Se reduce considerable el ligante del suelo que se tenía de manera natural, debido a la aglomeración de partículas.
- Se obtiene una mezcla más fácil de trabajar y fiable, esto se debe a la disminución del porcentaje de agua en los suelos (rotura fácil de grumos).
- La cal ayuda a que los suelos húmedos se sequen lo que ocasiona una aceleración en su compactación.
- Se reduce de manera significativa la susceptibilidad a la contracción y la susceptibilidad de hinchamiento.
- Se incrementa la resistencia a la compresión de la mezcla luego de pasar por el proceso de curado, teniendo un incremento de hasta un 40% en algunos casos.
- Se incrementa el valor de CBR por tanto la capacidad portante del suelo.
- La resistencia al esfuerzo de tracción también se ve afectada, teniendo un incremento.
- Se forman capas que impiden el paso del agua proveniente de las lluvias o el ascenso por capilaridad de aguas subterráneas.

Los suelos estabilizados con cal tienen buenos resultados cuando se presentan estos 2 casos; según el Ministerio de Transporte y Comunicaciones (2014)

- Si se incorpora cal en un porcentaje de 2% a 4% en función del peso del suelo a un material conformado por mezclas de grava y arcilla, principalmente cuando se utiliza como capa granular.
- Si el suelo tiene alto porcentaje de arcilla y será utilizado como capa de material granular, el porcentaje de cal necesario para estabilizar el suelo dependerá del uso que se le dé. Si la capa granular será utilizada como superficie de rodadura se estabilizará de 5% a 10% de cal en función de su peso, si se utilizará como capa inferior se estabilizará con un 1% a 3% de cal en función de su peso.

En la Figura N° 10 se muestra el procedimiento para estabilizar una subrasante arcillosa con cal.



Figura N° 10: Estabilización de Suelos con Cal

Fuente: Google Imágenes

2.1.2.6. *Estabilización de suelos con cemento*

La mezcla comúnmente llamada suelo-cemento se obtiene debido a la mezcla de suelo, de manera disgregada, con cemento, agua y otras sustancias que dependen de la eventualidad del problema, y luego se realiza una compactación y un curado de manera adecuada. De esta manera, el material de consistencia suelta se convierte en otro endurecido, con mucha resistencia si es que se compara con el suelo natural, pero en sí las partículas de suelo no están envueltas

por esta capa cementosa, si no están unidas con este grano por grano. Por ello, la tecnología del suelo-cemento posee una resistencia menor y un módulo de elasticidad mucho menor que el del concreto. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2014)

En la Tabla N° 5 se muestran los porcentajes de cemento requerido según el tipo de suelo.

Tabla N° 5 Rango de cemento requerido para la estabilización de suelo

Clasificación de suelos AASHTO	Rango usual de cemento requerido Porcentaje de peso de los suelos
A - 1 - a	3 – 5
A - 1 - b	5 – 8
A - 2	5 – 9
A - 3	7 – 11
A - 4	7 – 12
A - 5	8 – 13
A - 6	9 – 15
A - 7	10 – 16

Fuente: Federal Highway Administration (FHWA)

En la Figura N° 11, se muestra el proceso de estabilización de una subrasante arcillosa con cemento, utilizando para esto una motoniveladora.



Figura N° 11: Estabilización de suelos con cemento

Fuente: Google Imágenes

2.1.2.7. Suelos estabilizados con escoria

Actualmente, las escorias provenientes de acería o de otros hornos de fundición son empleadas en muchas partes del planeta, durante los procesos de fabricación y procesamiento de materiales para obtener el cemento, como agregados en la mezcla de concreto, como material estabilizante de capas de base y sub-base de los pavimentos, en la estabilización de capas de sub-rasantes, en la carpeta asfáltica, material el cual forma parte del ligante de material bituminoso directamente; incluso en la agricultura también ha sido aplicado, así como en el tratamiento de aguas residuales. Al emplearse este residuo en construcción de infraestructura vial se evita la explotación de nuevas canteras, reduciendo el impacto ambiental y no afectando al factor paisaje de la zona donde se explotan las canteras, que muchas veces ocasionan el cambio climático. Esto se produce porque no se requiere procesar los agregados, reduciendo así el consumo energético utilizado en dicho proceso y las emisiones de CO₂. (Choque 2016)

En los suelos mejorados con escoria y cal el porcentaje estimado en función del peso de cal está entre 1.5% y 3% y de la escoria entre 35% - 45% en función del volumen.

El uso de granos con tamaño máximo el cual se limita al de las arenas hace que el mantenimiento se realice de una manera más sencilla, sin desgastar prematuramente las partes de equipos como las motoniveladoras ni la aparición de malformaciones sobre la calzada. Además, el tamaño de los granos de un agregado cuando es mayor a un centímetro, al ser emitidos por la acción del tránsito pueden ocasionar problemas a los vehículos, así como a las personas. (Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2014)

2.1.2.8. *Estabilización con productos asfálticos*

Según el Manual de Carreteras: Suelos, geología, geotécnica y pavimentos la combinación de un suelo con un producto asfáltico puede tener como finalidad:

- Un aumento en la estabilidad por la característica de aglomeración del ligante que recubre las partículas del suelo.
- La impermeabilización del suelo, haciendo al suelo menos sensible a los cambios del contenido de humedad y por lo tanto más estable en condiciones adversas.

2.1.3. Pavimento

2.1.3.1. *Definición del pavimento*

Según el libro de Montejo (2002), el pavimento es una estructura constituida básicamente por capas horizontales superpuestas, las cuales están diseñadas y construidas con materiales de buena calidad y compactados adecuadamente para mantener su estabilidad y resistencia.

Por otro lado, Menéndez (2012), divide a los pavimentos en varios grupos, entre los que se encuentran: pavimentos rígidos, segmentados, semisegmentados y flexibles.

Entre las características que se debe tener en un pavimento para que pueda cumplir de manera adecuada sus funciones se encuentran:

Tiene que ser resistente a las cargas vehiculares que actuarán en toda su vida útil.

Tiene que ser resistente al intemperismo.

La textura superficial debe ir acorde a las velocidades de diseño, las cuales están normadas.

Regularidad superficial horizontal y vertical.

El drenaje deberá ser adecuado.

La durabilidad suficiente para poder tener la serviciabilidad necesaria durante su vida útil. (Montejo 2002)

2.1.3.2. *Definición de la subrasante*

El estado y la calidad de esta parte de la estructura del pavimento dependerán de gran manera del espesor de suelo capaz de resistir la influencia del paso de cargas dinámicas y de sus propiedades tanto físicas como mecánicas.

Como parámetro de evaluación de esta capa se tiene la capacidad de soporte (CBR) o la resistencia que tiene esta capa a la deformación que se da cuando un esfuerzo cortante actúa debido a las cargas del tránsito. Es necesario tener en cuenta la sensibilidad del suelo a la humedad, en lo que se refiere a resistencia, así como también las eventualidades que se pudieran presentar en las variaciones volumétricas debido al contenido de humedad o temperatura (hinchamiento – retracción).

Las variaciones volumétricas de un suelo de subrasante, del tipo expansivo como lo son en esta investigación, pueden tener consecuencias que se reflejan en grandes daños para las estructuras que estarán sobre estos. Por esta razón, cuando se lleve a cabo la construcción de algún pavimento en estos suelos, se deberá tomar las medidas necesarias para impedir los cambios de humedad del suelo, esto se logra mediante una impermeabilización. Otra forma de enfrentar este problema es mediante la estabilización, el cual será el método que se usará en esta investigación, puesto que en este tipo de suelos arcillosos los precedentes al utilizar cal como estabilizador han tenido resultados favorables. (Montejo 2002)

La subrasante es la superficie plana o con pendiente culminada después de un corte o relleno, sobre esta capa se coloca una estructura de rodadura el cual puede ser un pavimento o un afirmado.

La capacidad de soporte de una subrasante se mide mediante el ensayo de CBR.

2.1.3.3. Características de la subrasante

Una de las principales características de la subrasante es la capacidad de soporte que esta tiene a nivel natural, por eso es que la caracterización de la subrasante se hace a través del CBR que esta tiene. Del Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos podemos extraer la Tabla N°6 para una mayor comprensión:

Tabla N° 6 Categorías de subrasante

Categorías de Subrasante	CBR
S ₀ : Subrasante Inadecuada	CBR < 3%
S ₁ : Subrasante Pobre	De CBR ≥ 3% A CBR < 6%
S ₂ : Subrasante Regular	De CBR ≥ 6% A CBR < 10%
S ₃ : Subrasante Buena	De CBR ≥ 10% A CBR < 20%
S ₄ : Subrasante Muy Buena	De CBR ≥ 20% A CBR < 30%
S ₅ : Subrasante Excelente	CBR ≥ 30%

Fuente: (Ministerio de Transportes y Comunicaciones 2014)

2.1.3.4. Capacidad de soporte de la subrasante

En el mundo, se usa de manera común el ensayo de California Bearing Ratio (CBR) como un parámetro principal de medición de la resistencia de corte dinámico de un suelo, este valor sirve posteriormente para el cálculo del número estructural de carreteras. (Montejo 2002)

2.2. Normas Técnicas Peruanas

2.2.1. NTP 339.129 (Método de Ensayo para Límites de Atterberg)

Esta norma establece los lineamientos necesarios para realizar el ensayo de laboratorio de los límites de consistencia, indicando los objetivos del ensayo, el procedimiento y el cálculo de los parámetros los límites de consistencia, así como lo son el límite plástico, límite líquido, índice de plasticidad e índice de fluidez.

2.2.2. NTP 339.128: 1999 (Método de Ensayo para el Análisis Granulométrico)

Esta norma establece los lineamientos necesarios para realizar el ensayo de laboratorio del análisis granulométrico, indicando los objetivos del ensayo, el procedimiento y el cálculo de los parámetros del análisis granulométrico como lo son el coeficiente de uniformidad y el coeficiente de curvatura. Esta norma técnica fue revisada en el año 2014. (Instituto Nacional de Calidad 1999)

2.2.3. NTP 339.141 (Ensayo de Proctor Modificado)

Esta norma establece los lineamientos necesarios para realizar el ensayo de laboratorio del contenido de humedad óptimo para la compactación, indicando los objetivos del ensayo, el procedimiento y el cálculo de los parámetros del proctor modificado como lo es el contenido de humedad óptimo de compactación.

2.2.4. NTP 339.145: 1999 (Método de Ensayo de CBR)

Esta norma establece los lineamientos necesarios para realizar el ensayo de laboratorio del CBR, indicando los objetivos del ensayo, el procedimiento y el cálculo de los parámetros del ensayo de CBR como lo es la capacidad de soporte de un tipo determinado de suelo.

CAPÍTULO III: TRABAJO DE CAMPO

3.1. UBICACIÓN DEL MUESTREO

El suelo cohesivo será extraído de la carretera carrozable al Centro Poblado de Churin, distrito de San Juan de Jarpa, Provincia de Chupaca, Departamento de Junín. En la Figura N°12 se muestra una vista aérea de la carretera carrozable donde se extrajeron las muestras de suelo.



Figura N° 12: Lugar de extracción de muestras - San Juan de Jarpa

Fuente: Google Maps

3.2. CANTIDAD DE MUESTRAS SEGÚN NORMATIVA

La norma de Geología, suelos y pavimentos del MTC (2014) recomienda que para explorar la subrasante se debe realizar calicatas de 1.5 metros de profundidad como mínimo, y la cantidad de exploraciones depende del nivel de importancia de la carretera. Para el caso del presente estudio se tiene una carretera de bajo tránsito por lo consiguiente la norma recomienda 1 exploración de 1.5 metros de profundidad cada kilómetro.

La cantidad de ensayos CBR también están estipulados en la norma de Geología, suelos y pavimentos del MTC (2014) donde recomienda el número de ensayos CBR dependiendo del nivel de importancia de la vía, para una carretera de bajo tránsito se recomienda 1 ensayo CBR por cada 3 km de vía.

3.3. EXTRACCIÓN DE LAS MUESTRAS

3.3.1. Obtención de la escoria de cobre

La escoria de cobre utilizada para estabilizar el suelo cohesivo en este trabajo proviene de la acumulación de residuos de escoria de cobre que durante décadas ha dejado depositado la refinería DOE RUN en la ciudad de la Oroya, estos depósitos están apilados en la berma del margen izquierdo de la carretera central.

3.3.2. Obtención del suelo cohesivo

Con la finalidad de cumplir el primer objetivo de la investigación, se necesita conocer las características físicas del suelo o mejor dicho, de los materiales que conforman la subrasante del área de estudio. Por lo tanto como el presente trabajo tiene fines académicos se realizaron solamente 3 exploraciones de calicatas. En la Figura N°13 se muestra una vista del terreno donde se aprecia las propiedades físicas (color y textura) del suelo arcilloso.



Figura N° 13: Reconocimiento de campo - San Juan de Jarpa

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N°14, se muestra la caracterización de la primera calicata, así como las propiedades físicas del suelo (color y textura)



Figura N° 14: Primera calicata realizada - extracción de muestra de suelo

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N°15, se muestra la excavación de la segunda calicata y las propiedades físicas de la arcilla similares a la primera calicata.



Figura N° 15: Segunda calicata - extracción de muestra de suelo

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N°16, se muestra la excavación de la tercera calicata que se realizó en el talud de la carretera, se visualiza las mismas propiedades físicas del suelo arcilloso (color y textura) extraídos de la primera y segunda calicata.



Figura N° 16: Tercera calicata - extracción de muestra de suelo

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: ENSAYOS DE LABORATORIO

4.1. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN FÍSICA

4.1.1. Análisis Granulométrico

4.1.1.1. Definición:

Es la distribución de las partículas de un suelo dependiendo de su tamaño.

4.1.1.2. Normativa

Este ensayo estará realizado según la norma técnica peruana NTP 339.128.

4.1.1.3. Objetivo del Ensayo

La finalidad del ensayo es separar la fracción de gruesos y finos de la muestra ensayada.

4.1.1.4. Instrumentos y Equipos

El material y el equipo usado para este ensayo es el siguiente:

- Un mallas granulométricas (3", 2", 1", ¾", ½", 3/8", N°04, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200 y la Charola).
- Un cucharón.
- Una balanza con aproximación a 0.1gr.
- Unas charolas rectangulares de 0.4 x 0.6 m
- Una espátula y vidrio de reloj.
- Un partidor de muestras o cuarteador.
- La malla N°200, para el lavado del suelo que pasó la malla N°4.
- Un alambón de 5mm de diámetro, con punta redondeada.
- Un horno o estufa.
- Unas charolas de aluminio.
- Un vaso de aluminio.
- Agua.

- La muestra de suelo que se estudiará.

4.1.1.5. Procedimiento

El procedimiento que se debe de seguir es el descrito a continuación:

- En primer lugar, la muestra de suelo se debe someter a un secado natural (secado al sol), disgregado y cuarteado sobre una superficie. Luego se debe tener una muestra representativa y se anota el peso correspondiente.
- Segundo, se pasa la muestra representativa por una serie de mallas, las cuales estarán ordenadas de mayor a menor diámetro.
- Tercero, el material retenido en cada malla se va pesando y anotando en la columna de peso retenido.
- Cuarto, todo lo anterior debe de ser realizado hasta la malla N°04 y con el material que pasa esta malla; luego se obtiene una porción de suelo que sea representativa, para ello habrá que pasar las muestras las veces necesarias, hasta que se obtenga una muestra de entre 500 y 1000 grs.
- Quinto, la muestra anterior se pone a secar totalmente hasta que se enfríe y se recolecte una muestra de 200 grs., la que es vaciada hasta un vaso de aluminio, el que debe de ser llenado con agua; con esto realizado, se procede a realizar el lavado del suelo. Si el suelo todavía presenta grumos, debe dejarse saturar por 24 horas.
- Sexto, el lavado del suelo consiste en agitar el suelo utilizando el alambrcn con punta redondeada, haciendo figuras que formen un "ocho" durante 15 segundos.
- Séptimo, se vacía el líquido a la malla N°200, con el fin de eliminar los finos (material que pasa dicha malla), posteriormente se vierte más agua al vaso y se agita de la forma antes descrita.
- Octavo, cuando en la malla se acumule mucho material (arena), se reintegra al vaso, vaciando agua sobre el reverso de la malla, siempre cuidando que no se pierda material; esto debe de ser hecho hasta 5 veces que se vacíe agua con finos a la malla

N°200. Esta operación se repite las veces necesarias para que el agua salga limpia o casi limpia.

- Noveno, el suelo es secado al horno o a la estufa, se enfría naturalmente y después se pasa por las mallas N°8 a la N°200.
- Décimo, se procede a pesar el material retenido en cada malla.
- Décimo primero, se realizan los cálculos de: % retenido parcial, % retenido acumulado, % que pasa; luego de ello se dibuja la curva granulométrica.
- Décimo segundo, se calculan los % de grava, de arena y de finos, así como los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c).

4.1.1.6. Cálculos

Fórmula N°2 Porcentaje del peso retenido

$$\text{Porcentaje de Peso retenido} = \frac{W_r}{W_s} \times 100\%$$

Donde:

W_r = Peso retenido

W_s = Peso seco de la muestra

Fórmula N°3 Coeficiente de uniformidad

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

Donde:

C_u = Coeficiente de uniformidad

D_{10} = Diámetro por el que debajo del cual queda el 10% del peso total.

D_{60} = Diámetro por el que debajo del cual queda el 60% del peso total.

Fórmula N°4 Coeficiente de curvatura

$$C_u = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$$

Donde:

C_c = Coeficiente de curvatura

D_{10} = Diámetro por el que debajo queda el 10% del peso total.

D_{30} = Diámetro por el que debajo queda el 30% del peso total.

D_{60} = Diámetro por el que debajo queda el 60% del peso total.

Fórmula N°5 Cálculo de los D_{10} , D_{30} y D_{60}

$$D_x = \frac{(D_2 - D_1)}{\log\%_2 - \log\%_1} * \log\%_x - \log\%_1 + D_1$$

D_2 = Diámetro superior.

D_1 = Diámetro inferior.

$\%_2$ = Porcentaje que pasa por el diámetro superior.

$\%_1$ = Porcentaje que pasa por el diámetro inferior.

4.1.2. Límites de Atterberg

4.1.2.1. Definición:

Se han desarrollado muchos criterios para definir la plasticidad de los suelos, siendo el más conocido el de Atterberg, el cual indica que la plasticidad es una propiedad circunstancial y depende del contenido de agua.

Según el contenido de humedad, el suelo puede ser plástico o puede estar en cualquiera de los estados definidos anteriormente.

4.1.2.2. Normativa

La norma empleada es la NTP 339.129 y fue empleada para analizar las propiedades del suelo.

4.1.2.3. *Objetivo del Ensayo*

Determinar el límite líquido del suelo, para poder posteriormente utilizar estos valores y clasificarla según AASHTO.

4.1.2.4. *Instrumentos y Equipos*

El equipo y material usado para realizar el ensayo es el siguiente:

- Copa de Casagrande.
- Un ranurador laminar o ranurador curvo.
- Una cápsula de porcelana.
- Una espátula.
- Unas charolas de aluminio o vidrio de reloj.
- Malla N°40.
- Un horno con temperatura constante de 105°C.
- Una balanza con aproximación de 0.01 gramos.
- Un molde para contracción lineal.
- Un calibrador Vernier.
- Una placa de vidrio.
- Un alambre con un diámetro de 3.2 mm.
- Una piseta.
- Una franela.
- Agua.
- Papel absorbente.

4.1.2.5. *Procedimiento*

El procedimiento que se debe de seguir es el descrito a continuación:

- En primer lugar, el suelo debe pasarse por la malla N°40 y luego ser secado en el horno por 24 horas.
- Segundo, deben pesarse las taras, 4 en total.
- Tercero, para el límite líquido, el suelo es mezclado con agua destilada hasta que se obtenga una mezcla manejable, luego se coloca en la cápsula de porcelana y posteriormente en la cuchara de Casagrande de manera uniforme.

- Cuarto, se hace una ranura en la parte media del suelo, utilizando el ranurador, de manera perpendicular a la cuchara de Casagrande.
- Quinto, se da golpes en la copa con una frecuencia de 2 golpes por segundo, hasta que los taludes separados por el ranurados se unan hasta 13 mm. Los golpes son contados y se registran. Debe darse una condición: deben ser entre 4 y 40 golpes. Pueden ser en los siguientes intervalos: 30 y 40 para el primer contenido de humedad, 20 y 30 para el segundo. 10 y 20 para el tercero y finalmente 4 y 10. Para así definir mejor la curva de fluidez. Las muestras obtenidas se introducen al horno para determinar el contenido de humedad en cada ensayo.

4.1.2.6. Cálculos

Fórmula N° 6 Fórmula para obtener el contenido de humedad a 15, 25 y 35 golpes en el límite líquido.

$$W = \frac{W_w}{W_s} * 100\%$$

W_w = Peso de la muestra húmeda

W_s = Peso de la muestra seca

4.1.3. Clasificación de Suelos

Después de haber estudiado la plasticidad y granulometría de los suelos, se puede realizar la clasificación de estos, lo cual según la norma E.050: Suelos y cimentaciones, es una obligación dentro de un estudio de mecánica de suelos.

Podemos encontrar 2 tipos de clasificación que se usan en el país, la clasificación AASHTO y la clasificación SUCS. La primera es utilizada para el estudio de las carreteras o vías de comunicación, y la clasificación SUCS es utilizada para el diseño de cimentaciones. Como este proyecto es del tipo académico, se define las dos de manera general.

4.1.3.1. Clasificación SUCS:

Esta clasificación se denomina el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), y está basado en un método llamado Método de Aeropuertos. Se basa principalmente en la división de suelos y finos a través de la malla granulométrica N°200. Un suelo se considera grueso si más del 50% de este tienen partículas mayores a la de la malla N°200, y es fino si más del 50% tiene partículas menores a la de la malla N°200. (Juaréz Badillo y Rico Rodríguez 2012)

De manera general, podemos simbolizar los suelos de la siguiente manera:

Grava: G

Arena: S

Arcilla: C

Limos: M

De acuerdo al estado físico de cada suelo, o de una posible combinación de estos salen las siguientes notaciones:

GW y SW: Gravas y arenas bien graduadas.

GP y SP: Gravas y arenas pobremente graduadas.

GM y SM: Gravas y arenas limosas

GC y SC: Gravas y arenas arcillosas.

Y si son suelos finos, pueden tener también las siguientes notaciones:

CL y CH: Arcillas de baja y alta plasticidad respectivamente.

ML y MH: Limos de baja y alta plasticidad respectivamente.

OL y OH: Suelos orgánicos de baja y alta plasticidad respectivamente.

Pertenece a los limos también esta clasificación.

Esta clasificación se puede determinar utilizando el Figura N°17 llamado la Carta de Casagrande:

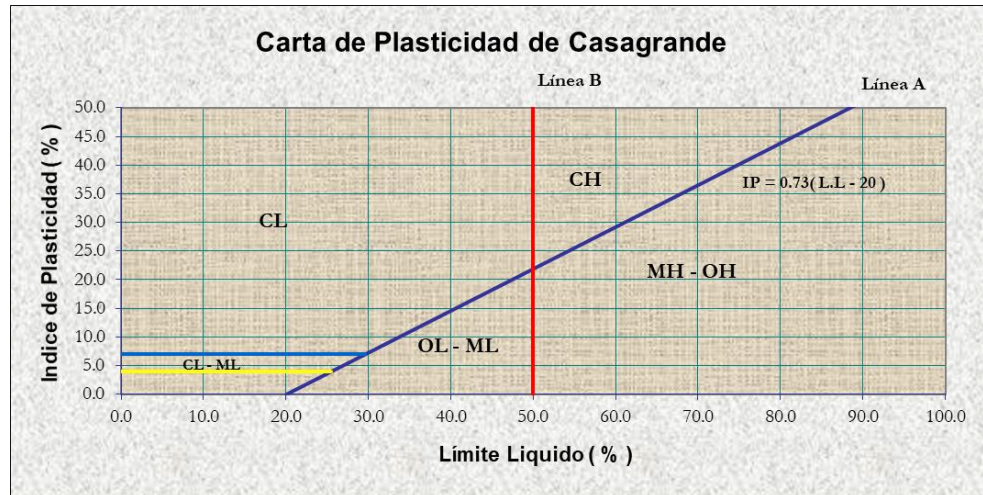


Figura N° 17: Carta de plasticidad de Casagrande

Fuente: Mecánica de suelos, Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 2005

Se visualiza que para la clasificación de un suelo por el sistema unificado de clasificación de suelos, es necesario conocer los límites de plasticidad y la granulometría.

4.1.3.2. Clasificación AASHTO:

Este tipo de clasificación, de la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales o por su siglas en inglés, AASHTO, separa a los suelos en 8 grupos: desde el A-1 hasta A-8, en base a la granulometría y sus límites de plasticidad. Los materiales de grano grueso se encuentran en el grupo A-1, A-2 y A-3, en el cual el 35% pasa por la malla N°200. Si más del 35% pasa por la malla granulométrica N°200 ya se considera con un material fino y se encuentran en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. Donde al igual que la clasificación SUCS, contienen limo y arcilla. Este tipo de clasificación de suelos se utiliza para caminos y carreteras, para la clasificación de la subrasante y la rasante. (Das 2001)

Esta clasificación se puede determinar utilizando la Tabla N°7 teniendo como valores de entrada la granulometría y los límites de consistencia.

Tabla N° 7 Clasificación AASHTO

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
	A-1		A-3 ^A	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7-5 A-7-6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...			B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. ^B
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

^A La colocación de A3 antes de A2 en el proceso de eliminación de izquierda a derecha no necesariamente indica superioridad de A3 sobre A2.

^B El índice de plasticidad del subgrupo A-7-5 es igual o menor que LL-30. El índice de plasticidad del subgrupo A-7-6 es mayor que LL-30.

Nota: IP=Índice de plasticidad; LL=Límite líquido; NP=No plástico; IG=Índice de grupo

Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica, Braja M. Das, 2001.

Para la presente investigación, se clasificará los suelos según AASHTO, debido a que el fin último de la presente investigación será estabilizar una subrasante.

4.2. ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

4.2.1. Ensayo de Proctor Modificado

Este ensayo es el de la N.T.P. 339.141: SUELOS. Método de ensayo para la compactación de suelos en laboratorio utilizando una energía modificada (2700 kN-m/m³ (56000 pie-lbf/pie³))

En este ensayo se determina el contenido de humedad de 4 muestras de suelo donde se obtienen diferentes contenidos de humedad, para luego hallar su densidad húmeda y así calcular la densidad seca. Posteriormente, se realiza la gráfica que relaciona a ambos parámetros, se obtiene una curva que pasar por los 4 puntos y en el punto más alto se determina la máxima densidad seca para un determinado porcentaje de humedad, que será el contenido óptimo de humedad.

4.2.2. Ensayo CBR

El CBR es un ensayo que se utiliza en ingeniería para medir la resistencia de un suelo al corte. CBR cuyas siglas en inglés son California Bearing Ratio se basa en la norma ASTM (por American Standards for Testing and Materials). Sirve como una medida de resistencia en el diseño de pavimentos.

La norma actual ASTM D 1883-07 define el CBR como un ensayo de carga que usa un pistón metálico, de 0.5 pulgadas cuadradas de área, para penetrar desde la superficie de un suelo compactado con la máxima densidad seca en un molde metálico a una velocidad constante de penetración.

El CBR mide el porcentaje entre una carga unitaria capaz de penetrar 0.1" y 0.2" de un patrón de suelo conformado por gravas.

Mediante este ensayo se calculará la capacidad de soporte de la subrasante, esto para determinar la capacidad estructural de la capa.

Se determina para especímenes de ensayo que posean un peso unitario similar y un contenido de humedad que se espera encontrar en el terreno. Esta última condición presenta su parte crítica cuando el material está saturado. Por esta razón, se determinó que los cuerpos deben estar sumergidos en agua durante 4 días con una sobre carga igual al peso del pavimento que actuará sobre el material.

Primero, se prepararán las muestras, las cuales deben cumplir ciertas condiciones: cuando más del 75% en peso de la muestra pase por el tamiz de 19.1mm, se utiliza para el ensayo dicho tamiz; mientras que cuando la fracción del tamiz mencionado anteriormente sea mayor en un 25% en peso, se separa el material del tamiz y se sustituye por una porción igual comprendida entre los tamices de 19.1mm y 4.75mm. Luego se toman unos 5 kg para el ensayo de CBR. Se determina la humedad de compactación óptima y el peso unitario mediante el proctor modificado para estudiar la variación de la relación de soporte con ambos valores. Se determina la humedad natural y se añade la cantidad faltante para obtener la humedad óptima.

Luego se compactará la muestra, mediante el proctor modificado pero utilizando la proporción de agua necesarias para que el suelo quede con la humedad y densidad que uno desee. Se elaboran 3 o 9 moldes por cada espécimen.

Luego, se coloca la muestra dentro de la placa perforada y sobre esta, los anillos necesarios para simular la sobrecarga. Se toma la primera lectura del hinchamiento. Luego se sumerge el tanque con la sobrecarga dejando libre el acceso al agua por la parte superior e inferior de la muestra. Se contiene así durante 4 días. Se mantienen el nivel de agua constante. Al finalizar la inmersión se vuelve a leer el deformímetro. Luego se saca el molde, se vierte el agua retenida y se deja escurrir durante quince minutos, luego se retira la sobrecarga y la placa perforada. Se pesa y se realiza el ensayo de penetración. Se aplica una carga igual al peso del pavimento aproximadamente pero no menor a 10 lb. Para evitar el empuje del suelo hacia arriba, dentro del agujero de las pesas se coloca el pistón para luego colocar la primera sobrecarga sobre la muestra. Se coloca el dial medidor para que mida la penetración y se aplica una carga de 50 N, para que el pistón se asiente. Luego las agujas se sitúan en cero para medir la carga y el control de la penetración.

Luego, se toman las medidas con una velocidad uniforme de 0.05 pulgadas por minuto. Y se anotan las cargas para las diferentes penetraciones.

Luego de obtener los resultados se dibuja la curva de presiones vs penetraciones y se observa el punto de inflexión. Si no presenta se toman los valores correspondientes a 0.1" y 0.2" de penetración. Si presenta punto de inflexión la tangente en ese punto cortará el eje de las abscisas y se toman como nuevo origen para las presiones de 0.1" y 0.2". Para calcular el CBR se calcula dividiendo esos valores entre los esfuerzos corregidos por referentes 1000 lb/in² y 1500 lb/in² respectivamente y se multiplican por 100. Para el suelo normalmente se toma el valor de 0.1" de penetración, pero cuando la relación de 0.2" es mayor, se repite el ensayo. Si resulta un valor similar se toma 0.2".

4.3. MÉTODO DE DIMENSIONAMIENTO DEL PAVIMENTO TÍPICO

Para el dimensionamiento típico de este pavimento utilizaremos el método de NAASRA. Este método es utilizado para el diseño de afirmados, y se presenta en una ecuación, la cual, relaciona el valor de la capacidad de soporte del suelo (CBR) y la carga que actúa en el afirmado. Esta fórmula también es expresada en número de los ejes equivalentes.

Fórmula N° 7 Ecuación básica para determinar el espesor de la capa granular.

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

e = Espesor de capa de afirmado en mm.

CBR = Valor de CBR de la subrasante.

N_{rep} = Número de repeticiones de EE para el carril de diseño.

Fórmula N° 8 Ecuación básica para determinar el espesor de la capa granular.

$$N_{rep \text{ de } EE_{8,2 \text{ tn}}} = \sum (EE_{\text{día-carril}} \times Fca \times 365)$$

Luego, tenemos la siguiente fórmula para determinar el EE día-carril.

Fórmula N° 9 Ecuación para determinar el EE día-carril

$$EE_{\text{día-carril}} = IMD_{pi} \times Fd \times Fc \times Fv_{pi} \times F_{pi}$$

- EE día-carril: Es el número de ejes equivalentes por cada tipo de vehículo pesado por día, para el carril de diseño. Resulta de la multiplicación del IMD por cada tipo de vehículo pesado, por el factor direccional, por el factor carril de diseño, por el factor vehículo pesado del tipo seleccionado y por el factor de presión de neumáticos. (Macedo Vásquez 2014)
- IMD_{pi} : el índice medio diario según el tipo de vehículo pesado.
- Fd: Factor direccional
- Fc: Factor de carril de diseño.

- Fvpi: Factor de vehículo pesado del tipo seleccionado.
- Fpi: Factor de presión de neumáticos.

4.4. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Finalmente, en esta parte se hará una comparación económica para determinar qué porcentaje de mezcla de arcilla con escoria de cobre nos da la menor capa de afirmado para por consiguiente determinar cuál es el más viable económicamente. Se realizará un estudio de costo – beneficio para este resultado, comparándose los diseños de un afirmado sobre un suelo sin estabilizar frente a las subrasantes estabilizadas con mezclas de 10, 20, 30 y 40 % de escoria de cobre con suelo cohesivo.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos mostrados en este capítulo se encuentran en el anexo B

5.1.1. Ensayos de Caracterización Física

5.1.1.1. Análisis Granulométrico

- Suelo Natural: En lo que respecta al análisis granulométrico, la muestra de suelo natural presenta 14.1% de arena y 85.9% de finos.
- Suelo Natural al 90% más 10% de escoria de cobre: En lo que respecta al análisis granulométrico, la muestra presenta 22.6% de arena y 77.4% de finos.
- Suelo Natural al 80% más 20% de escoria de cobre: En lo que respecta al análisis granulométrico, la muestra presenta 31.2% de arena y 68.8% de finos.
- Suelo Natural al 70% más 30% de escoria de cobre: En lo que respecta al análisis granulométrico, la muestra presenta 39.9% de arena y 60.1% de finos.
- Suelo Natural al 60% más 40% de escoria de cobre: En lo que respecta al análisis granulométrico, la muestra presenta 48.5% de arena y 51.5% de finos.
- Suelo Natural al 70% más 27% de escoria de cobre y 3% de cemento: En lo que respecta al análisis granulométrico, la muestra presenta 36.9% de arena y 63.1% de finos.

5.1.1.2. Límites de Atterberg

- Suelo Natural: En lo que respecta a los límites de consistencia, el límite líquido es de 29.4%, el límite plástico de 41.7% y el índice de plasticidad de 12.3%.
- Suelo Natural al 90% más 10% de escoria de cobre: En lo que respecta a los límites de consistencia, el límite líquido es de 36.9%, el límite plástico de 25.2% y el índice de plasticidad de 11.7%.

- Suelo Natural al 80% más 20% de escoria de cobre: En lo que respecta a los límites de consistencia, el límite líquido es de 35.4%, el límite plástico de 24.4% y el índice de plasticidad de 11%.
- Suelo Natural al 70% más 30% de escoria de cobre: En lo que respecta a los límites de consistencia, el límite líquido es de 34.7%, el límite plástico de 24.2% y el índice de plasticidad de 10.5%.
- Suelo Natural al 60% más 40% de escoria de cobre: En lo que respecta a los límites de consistencia, el límite líquido es de 35.4%, el límite plástico de 24.4% y el índice de plasticidad de 11%.
- Suelo Natural al 70% más 27% de escoria de cobre y 3% de cemento: En lo que respecta a los límites de consistencia, el límite líquido es de 38.1%, el límite plástico de 27.9% y el índice de plasticidad de 10.2%.

5.1.1.3. Clasificación de Suelos

- Suelo Natural: En lo que respecta a la clasificación del suelo, tenemos según SUCS ASTM D2487 un suelo tipo ML, y según AASHTO M145 (ASTMD382) un suelo tipo A-6 (7) lo cual indica que el tipo de suelo es limo de baja plasticidad.
- Suelo Natural al 90% más 10% de escoria de cobre: En lo que respecta a la clasificación del suelo, tenemos según SUCS ASTM D2487 un suelo tipo ML, y según AASHTO M145 (ASTMD382) un suelo tipo A-6 (9) lo cual indica que el tipo de suelo es limo de baja plasticidad.
- Suelo Natural al 80% más 20% de escoria de cobre: En lo que respecta a la clasificación del suelo, tenemos según SUCS ASTM D2487 un suelo tipo ML, y según AASHTO M145 (ASTMD382) un suelo tipo A-6 (7) lo cual indica que el tipo de suelo es limo de baja plasticidad.
- Suelo Natural al 70% más 30% de escoria de cobre: E En lo que respecta a la clasificación del suelo, tenemos según SUCS ASTM D2487 un suelo tipo ML, y según AASHTO

M145 (ASTMD382) un suelo tipo A-6 (5) lo cual indica que el tipo de suelo es limo de baja plasticidad.

- Suelo Natural al 60% más 40% de escoria de cobre: En lo que respecta a la clasificación del suelo, tenemos según SUCS ASTM D2487 un suelo tipo ML, y según AASHTO M145 (ASTMD382) un suelo tipo A-4 (3) lo cual indica que el tipo de suelo es limo de baja plasticidad.
- Suelo Natural al 70% más 27% de escoria de cobre y 3% de cemento: En lo que respecta a la clasificación del suelo, tenemos según SUCS ASTM D2487 un suelo tipo ML, y según AASHTO M145 (ASTMD382) un suelo tipo A-6 (7) lo cual indica que el tipo de suelo es limo de baja plasticidad.

5.1.1.4. Gravedad específica de sólidos

La gravedad específica de sólidos de las 5 mezclas se muestra en la Tabla N°8.

Tabla N° 8 Gravedad específica de suelos por Muestra

Muestra	Gravedad específica de Sólidos
Suelo Natural	2.69
90% SN + 10% Escoria de Cobre	2.75
80% SN + 20% Escoria de Cobre	2.78
70% SN + 30% Escoria de Cobre	2.87
60% SN + 40% Escoria de Cobre	2.93
70% SN + 27% Escoria de Cobre + 3% Cemento	2.87

Fuente: Elaboración propia

5.1.2. Ensayos de Caracterización Mecánica

5.1.2.1. Ensayo de Proctor Modificado

El óptimo contenido de humedad expresado en porcentaje de las 5 mezclas se muestra en la Tabla N°9.

Tabla N° 9 Óptimo Contenido de Humedad (%) por Muestra

Muestra	Óptimo Contenido de Humedad (%)
Suelo Natural	15.9
90% SN + 10% Escoria de Cobre	14.7
80% SN + 20% Escoria de Cobre	14.4
70% SN + 30% Escoria de Cobre	12.9
60% SN + 40% Escoria de Cobre	11.5
70% SN + 27% Escoria de Cobre + 3% Cemento	11

Fuente: Elaboración propia

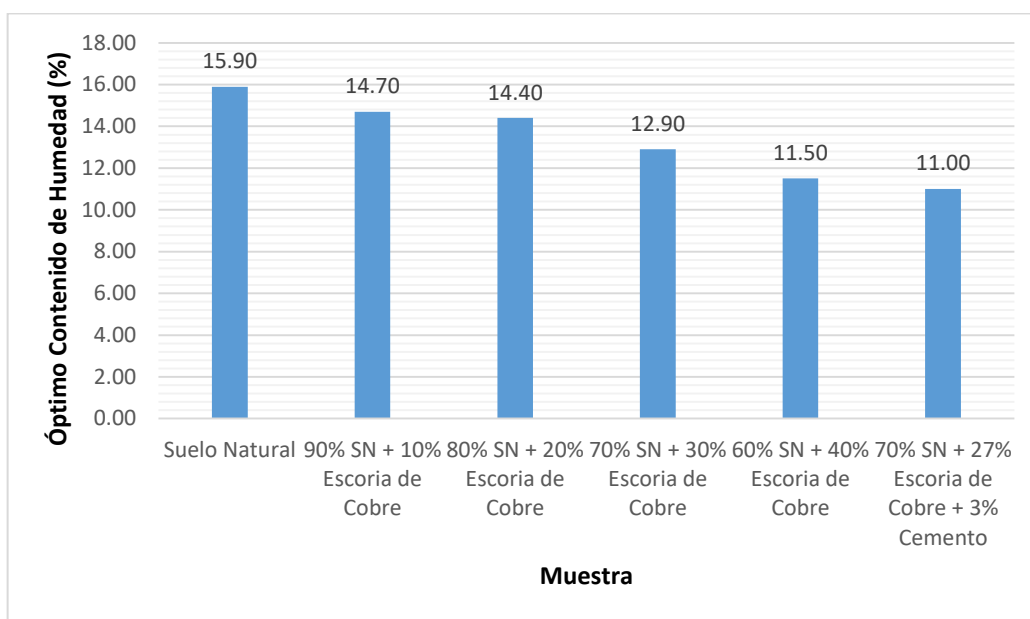


Figura N° 18: Óptimo Contenido de Humedad (%) por Muestra

Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar en el Figura N°18, el contenido de humedad óptima en el suelo disminuye conforme se va aumentando el contenido de escoria de cobre, llegando a tener un 11.5% para un contenido de escoria de cobre de 40%, y llegando a ser hasta 11% cuando se adiciona 3% de cemento a un 27% de escoria de cobre.

La máxima densidad seca expresada en g/cm³ de las 5 mezclas se muestra en la Tabla N°10.

Tabla N° 10 Máxima Densidad Seca (gr/cm³) por Muestra

Muestra	Máxima Densidad Seca (g/cm ³)
Suelo Natural	1.758
90% SN + 10% Escoria de Cobre	1.826
80% SN + 20% Escoria de Cobre	1.931
70% SN + 30% Escoria de Cobre	2.043
60% SN + 40% Escoria de Cobre	2.147
70% SN + 27% Escoria de Cobre + 3% Cemento	1.987

Fuente: Elaboración propia

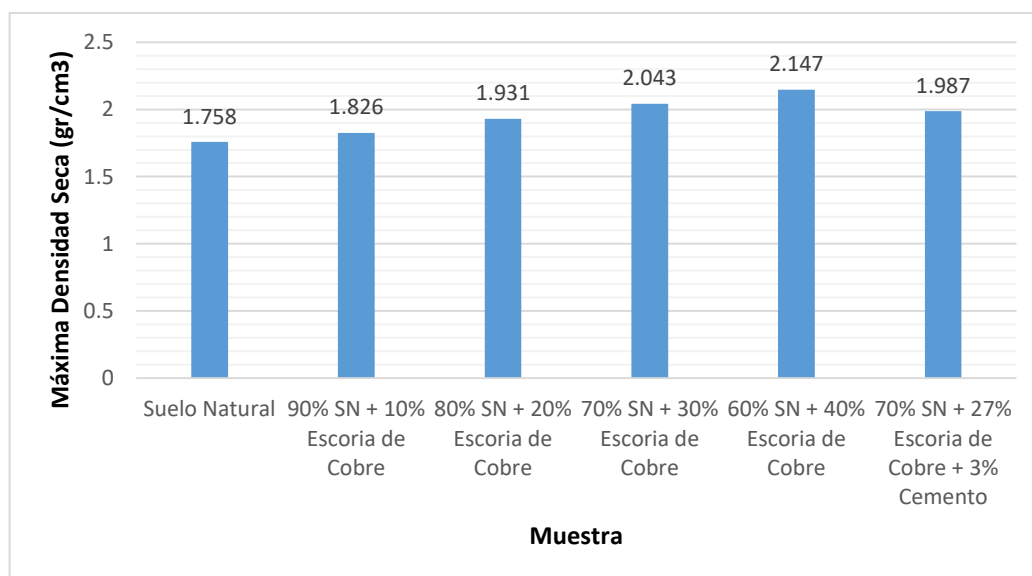


Figura N° 19: Máxima Densidad Seca (gr/cm³) por Muestra

Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar en el Figura N°19, la máxima densidad seca en el suelo aumenta conforme se va aumentando el contenido de escoria de cobre, llegando a tener 2.147 gr/cm³ para un contenido de escoria de cobre de 40%, y llegando a ser 1.987 gr/cm³ cuando se adiciona 3% de cemento a un 27% de escoria de cobre. Por lo que para esta propiedad, no es recomendable aumentar el 3% de cemento.

5.1.2.2. Ensayo CBR

El valor del CBR expresado en porcentaje de las 5 mezclas se muestra en la Tabla N°11.

Tabla N° 11 C.B.R. para el 95% de la M.D.S. (%) por Muestra

Muestra	C.B.R. para el 95% de la M.D.S. (%)
Suelo Natural	6.30
90% SN + 10% Escoria de Cobre	7.70
80% SN + 20% Escoria de Cobre	11.40
70% SN + 30% Escoria de Cobre	14.30
60% SN + 40% Escoria de Cobre	17.10
70% SN + 27% Escoria de Cobre + 3% Cemento	23.70

Fuente: Elaboración propia

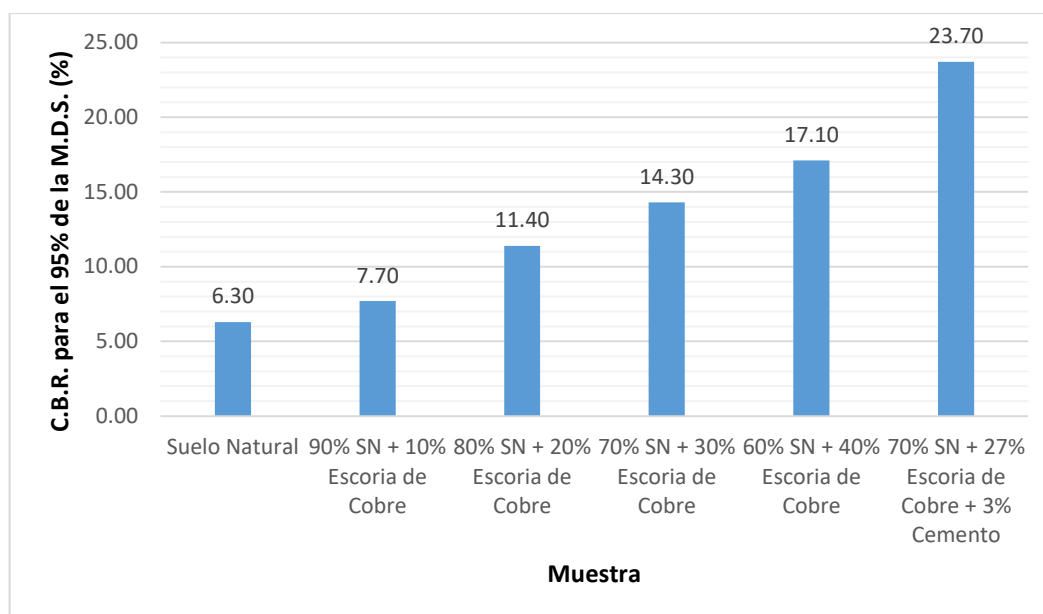


Figura N° 20: C.B.R. para el 95% de la M.D.S. (%) por Muestra

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en el Figura N°20, la capacidad de soporte del suelo (C.B.R.) para el 95% de la máxima densidad seca en el suelo aumenta conforme se va aumentando el contenido de escoria de cobre, llegando a tener un 17.10% para un contenido de escoria de cobre de

40%, y llegando a ser hasta 23.70 % cuando se adiciona 3% de cemento a un 27% de escoria de cobre.

Esto indica que el suelo mejora notablemente cuando se adiciona la escoria de cobre, a pesar de que el suelo natural tiene 6.30% de C.B.R., logra elevar su valor llegando a ser lo suficientemente bueno para su uso como subrasante, es notable la mejora y el efecto que tiene la escoria de cobre en la muestra.

La expansión expresada en porcentaje de las 5 mezclas se muestra en la Tabla N°12.

Tabla N° 12 Expansión (%) por Muestra

Muestra	Expansión (%)
Suelo Natural	3.9
90% SN + 10% Escoria de Cobre	3.3
80% SN + 20% Escoria de Cobre	2.8
70% SN + 30% Escoria de Cobre	2.3
60% SN + 40% Escoria de Cobre	2.1
70% SN + 27% Escoria de Cobre + 3% Cemento	0.6

Fuente: Elaboración propia

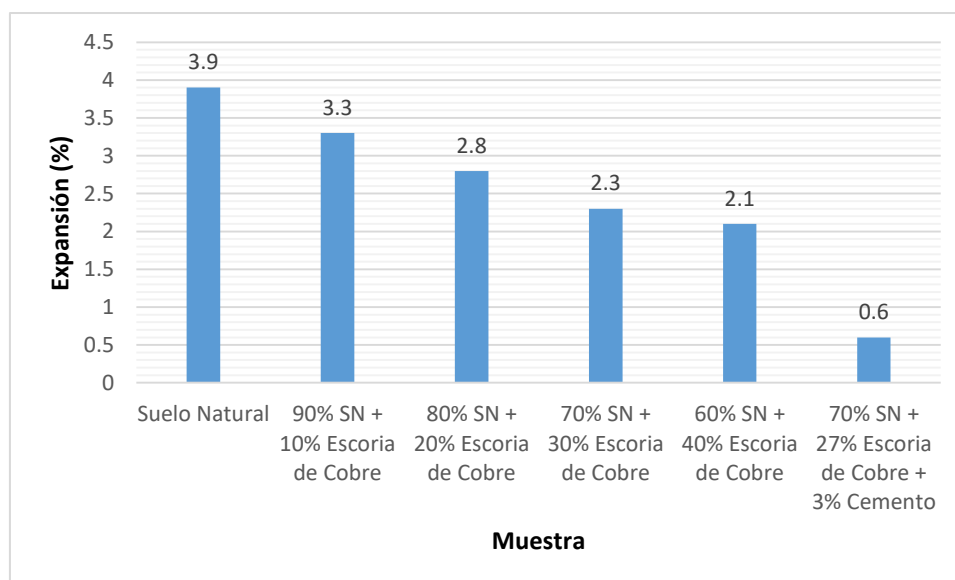


Figura N° 21: Expansión (%) por Muestra

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en el Figura N° 21, la expansión del suelo disminuye conforme se va aumentando el contenido de escoria de cobre, llegando a tener un 2.1% para un contenido de escoria de cobre de 40%, y llegando a ser hasta 0.6% cuando se adiciona 3% de cemento a un 27% de escoria de cobre.

5.2. DIMENSIONAMIENTO DEL PAVIMENTO TÍPICO

Se considera 20 buses diarios B2 y 30 camiones C2, una tasa de crecimiento del 3% y un diseño de 10 años; EE = 293,597.5 Utilizado el método NAASRA, ver Figura. N° 22 Grafico de Curvas para Determinar el Espesor de Capa de Revestimiento Granular.

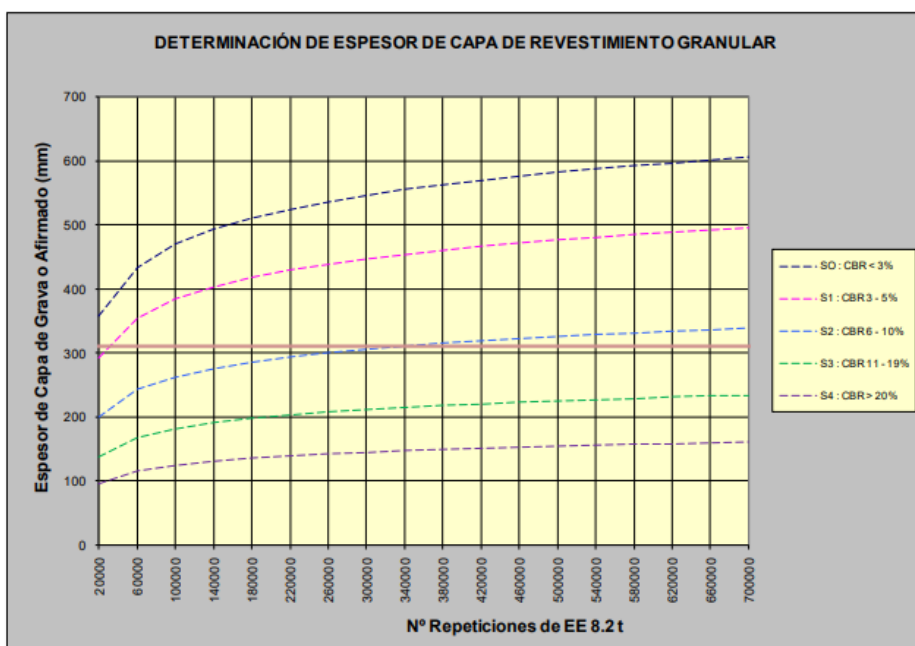


Figura N° 22: Gráfico para determinar el espesor de la capa de revestimiento.

Fuente: Manual de Diseño de carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito

La tabla N° 13 muestra el valor CBR para el 95% de la máxima densidad seca para las 5 muestras

Tabla N° 13 C.B.R. para el 95% de la M.D.S. (%) por Muestra

Muestra	C.B.R. para el 95% de la M.D.S. (%)
Suelo Natural	6.30
90% SN + 10% Escoria de Cobre	7.70
80% SN + 20% Escoria de Cobre	11.40
70% SN + 30% Escoria de Cobre	14.30
60% SN + 40% Escoria de Cobre	17.10
70% SN + 27% Escoria de Cobre + 3% Cemento	23.70

Fuente: Elaboración propia

Utilizando la fórmula que desarrolla la gráfica N°7 se calcula el espesor del afirmado.

Fórmula N° 10 Ecuación básica determinar es espesor de la capa granular.

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

e = Espesor de capa de afirmado en mm.

CBR = Valor de CBR de la subrasante.

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

Los resultados para espesores de afirmado para las 5 mezclas se muestran en la Tabla N°14

Tabla N° 14 Espesor (mm) por muestra

Muestra	C.B.R. para el 95% de la M.D.S. (%)	N (años)	N 18	Espesor (mm)
Suelo Natural	6.3	10	294,000	296
90% SN + 10% Escoria de Cobre	7.7	10	294,000	263
80% SN + 20% Escoria de Cobre	11.4	10	294,000	206
70% SN + 30% Escoria de Cobre	14.3	10	294,000	178
60% SN + 40% Escoria de Cobre	17.1	10	294,000	150
70% SN + 27% Escoria de Cobre + 3% Cemento	23.7	10	294,000	131

Fuente: Elaboración propia

5.3. EVALUACIÓN ECONÓMICA

La escoria de cobre es un material que es desechado por la refinería de la Oroya y ha sido depositado desde el inicio de sus operaciones hasta el día de hoy convirtiéndolo en un pasivo ambiental, por lo que no cuesta. En algunas zonas del departamento de Junín se encuentra material arcilloso, generalmente en trochas carrozables que unen diferentes pueblos este es el caso de la carretera que une el centro poblado de Shicuy con la carretera Cañete-Yauyos.

Longitud total de la vía: 5 km

Ancho de plataforma: 5.5 m.

Distancia total de Oroya hacia Shicuy : 150 km.

Cantera de préstamo de afirmado: 5 Km.

Depósito de material excedente: Ubicada a 5 Km.

La primera alternativa es colocar un afirmado sin estabilizar la subrasante, solo se hará un escarificado de 15 cm y compactado al terreno natural antes de colocar la capa de afirmado.

En la Tabla N°15 se muestra el APU de la partida preparación de terreno y en la Tabla N°16 el APU de colocación de afirmado, ambos han sido utilizados para el cálculo del costo de la primera alternativa.

Tabla N° 15 APU Preparación de terreno

Partida	PREPARACIÓN DE TERRENO							
Rendimiento	m3/DIA	MO. 750.0000	EQ. 750.0000	Costo unitario directo por : m3			6.44	
Código	Descripción	Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.	
Mano de Obra								
0147010001	CAPATAZ		hh	1.0000	0.0107	25.15	0.27	
0147010004	PEON		hh	3.0000	0.0320	15.29	0.49	
0.76								
Equipos								
337010001	HERRAMIENTAS MANUALES		%MO		5.0000	0.76	0.04	
349030046	RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOP 101-135 HP		hm	1.0000	0.0107	135.08	1.44	
349090001	MOTONVELADORA 145 - 150 HP		hm	1.0000	0.0107	187.97	2.01	
3.48								
Sub partidas								
9.30101E+11	AGUA PARA LA OBRA		m3		0.1200	18.31	2.20	
2.20								

Partida	AGUA PARA LA OBRA							
Rendimiento	m3/DIA	MO. 79.0000	EQ. 79.0000	Costo unitario directo por : m3			18.31	
Código	Descripción	Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$/.	Parcial \$/.	
Mano de Obra								
0147010004	PEON		hh	1.0000	0.1013	15.29	1.55	
1.55								
Equipos								
348120003	CAMIÓN CISTERNA 3000 GAL		hm	1.0000	0.1013	165.56	16.77	
16.77								

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 16 APU Colocación de afirmado

Partida	COLOCACIÓN DE AFIRMADO			Costo unitario directo por : m3				70.30
Rendimiento	m3/DIA	MO. 424.0000	EQ. 424.0000					
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.		
Mano de Obra								
0147010001	CAPATAZ	hh	1.0000	0.0189	25.15	0.47		
0147010004	PEON	hh	4.0000	0.0755	15.29	1.15		
							1.63	
Equipos								
337010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	1.63	0.08		
349030046	RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOP 101-135 HP	hm	1.0000	0.0189	135.08	2.55		
349090001	MOTONIVELADORA 145 - 150 HP	hm	1.0000	0.0189	187.97	3.55		
							6.18	
Sub partidas								
9.30101E+11	AGUA PARA LA OBRA	m3		0.1200	18.31	2.20		
9.30102E+11	MATERIAL GRANULAR	m3		1.2000	50.25	60.30		
							62.50	

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla N°17 se muestra el APU de la partida eliminación de material excedente con volquete y cargador hasta 10 km, el DME se considera que está ubicado a 5 Km de la progresiva de inicio de la carretera.

Tabla N° 17 . APU de eliminación de material excedente

Partida	02.01.03.001	ELIMINACION DE MATERIAL EXCEDENTE C/VOLQUETE Y CARGADOR HASTA 10 KM			Costo unitario directo por : m3				12.09
Rendimiento	m3/DIA	MO. 315.0000	EQ. 315.0000						
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.			
Mano de Obra									
0147010001	CAPATAZ	hh	0.1000	0.0025	25.15	0.06			
0147010003	OFICIAL	hh	1.0000	0.0254	16.99	0.43			
0147010004	PEON	hh	2.0000	0.0508	15.29	0.78			
							1.27		
Equipos									
0337010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	1.27	0.04			
0348100005	VOLQUETE 6x4 400 HP 15 m3	hm	1.0000	0.0254	254.12	6.45			
0349100008	CARGADOR FRONTAL S/LLANTAS 260-300 HP	hm	0.5000	0.0127	340.53	4.32			
							10.82		

Fuente: Elaboración propia

Una vez establecido el análisis de precio unitario se establece el costo de la alternativa 1. En la Tabla N°18 se muestra el costo total de elegirse la primera alternativa.

Tabla N° 18 Costo de la primera alternativa

Ítem	Cantidad	Precio Parcial	Total
Suelo Natural	m3	S/.	S/.
Preparación (0.15 m)	4,125	6.44	26,565.00
Colocación de afirmado (0.30 m)	8,250	70.3	579,975.00
Total			606,540.00

Fuente: Elaboración propia

La segunda alternativa es mejorar la subrasante utilizando escoria de cobre en un 10%, el procedimiento para ello es remover 15 cm de suelo, mezclar este suelo con la escoria de cobre y reponerlo conservando la misma cota. En la Tabla N°19 se muestra el APU de la partida conformación de subrasante con 10% de escoria, considerando para este caso la eliminación del 10% de terreno natural que será reemplazado por la escoria de cobre.

Tabla N° 19 APU de conformación de subrasante con 10% escoria

Partida	CONFORMACIÓN DE SUBRASANTE MEJORADA 10% ESCORIA						21.29
Rendimiento	m3/DIA	MO. 400.0000	EQ. 400.0000	Costo unitario directo por : m3			
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
	Mano de Obra						
0147010001	CAPATAZ	hh	1.0000	0.0200	25.15	0.50	
0147010004	PEON	hh	4.0000	0.0800	15.29	1.22	1.73
	Equipos						
337010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	1.73	0.09	
349040034	TRACTOR SOBRE ORUGAS DE 190 HP	HM	1.0000	0.0200	315.96	6.32	
349030046	RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOP 101-135 HP	hm	1.0000	0.0200	135.08	2.70	
349090001	MOTONIVELADORA 145 - 150 HP	hm	1.0000	0.0200	187.97	3.76	12.87
	Sub partidas						
9.30101E+11	AGUA PARA LA OBRA	m3		0.1200	18.31	2.20	
9.30101E+11	TRANSPORTE DE ESCORIA DE COBRE	m3		0.1000	45.00	4.50	6.70

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla N°20 se muestra el costo total que se genera si se utiliza la segunda alternativa

Tabla N° 20 Costo de la segunda alternativa

Ítem	Cantidad	Precio Parcial	Total
Suelo Natural	m3	S/.	S/.
Conformación de subrasante mejorada (0.15 m)	4,125.00	21.29	87,821.25
Colocación de afirmado (0.26 m)	7,150.00	70.30	502,645.00
Eliminación material excedente	412.50	12.09	4,987.13
Total			595,453.38

Fuente: Elaboración propia

La tercera alternativa es mejorar la subrasante utilizando escoria de cobre en un 20%, el procedimiento para ello es remover 15 cm de suelo, mezclar este suelo con la escoria de cobre y reponerlo conservando la misma cota, y se coloca una capa de 20 cm de afirmado. Considerando para este caso la eliminación del 20% de terreno natural que será reemplazado por la escoria de cobre.

En la Tabla N°21 se muestra el APU de la partida conformación de la subrasante con 20% de escoria.

Tabla N° 21 APU de conformación de subrasante con 20% escoria

Partida	CONFORMACIÓN DE SUBRASANTE MEJORADA 20% ESCORIA				Costo unitario directo por : m3			25.79
Rendimiento	m3/DIA	MO. 400.0000	EQ. 400.0000					
Código	Descripción Recurso			Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
		Mano de Obra						
0147010001	CAPATAZ			hh	1.0000	0.0200	25.15	0.50
0147010004	PEON			hh	4.0000	0.0800	15.29	1.22
								1.73
		Equipos						
337010001	HERRAMIENTAS MANUALES			%MO		5.0000	1.73	0.09
349040034	TRACTOR SOBRE ORUGAS DE 190 HP			HM	1.0000	0.0200	315.96	6.32
349030046	RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOP 101-135 HP			hm	1.0000	0.0200	135.08	2.70
349090001	MOTONIVELADORA 145 - 150 HP			hm	1.0000	0.0200	187.97	3.76
								12.87
		Sub partidas						
9.30101E+11	AGUA PARA LA OBRA			m3		0.1200	18.31	2.20
9.30101E+11	TRANSPORTE DE ESCORIA DE COBRE			m3		0.2000	45.00	9.00
								11.20

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla N°22 se muestra el costo total que se genera si se utiliza la tercera alternativa

Tabla N° 22 Costo de la tercera alternativa

Ítem	Cantidad	Precio Parcial	Total
Suelo Natural	m3	S/.	S/.
Conformación de subrasante mejorada (0.15 m)	4,125.00	25.79	106,383.75
Colocación de afirmado (0.20 m)	5,500.00	70.30	386,650.00
Eliminación material excedente	742.50	12.09	8,976.83
Total			502,010.58

Fuente: Elaboración propia

La cuarta alternativa es mejorar la subrasante utilizando escoria de cobre en un 30%, el procedimiento para ello es remover 15 cm de suelo, mezclar este suelo con la escoria de cobre y reponerlo conservando la misma cota, y se coloca una capa de 18 cm de afirmado. Considerando para este caso la eliminación del 30% de terreno natural que será reemplazado por la escoria de cobre.

En la Tabla N°23 se muestra el APU de la partida conformación de la subrasante con 30% de escoria.

Tabla N° 23 APU de conformación de subrasante con 30 % de escoria

Partida	CONFORMACIÓN DE SUBRASANTE MEJORADA 30% ESCORIA						30.29
Rendimiento	m3/DIA	MO. 400.0000	EQ. 400.0000	Costo unitario directo por : m3			
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
0147010001	CAPATAZ	hh	1.0000	0.0200	25.15	0.50	
0147010004	PEON	hh	4.0000	0.0800	15.29	1.22	1.73
Equipos							
337010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	1.73	0.09	
349040034	TRACTOR SOBRE ORUGAS DE 190 HP	HM	1.0000	0.0200	315.96	6.32	
349030046	RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOP 101-135 HP	hm	1.0000	0.0200	135.08	2.70	
349090001	MOTONIVELADORA 145 - 150 HP	hm	1.0000	0.0200	187.97	3.76	12.87
Sub partidas							
9.30101E+11	AGUA PARA LA OBRA	m3		0.1200	18.31	2.20	
9.30101E+11	TRANSPORTE DE ESCORIA DE COBRE	m3		0.3000	45.00	13.50	15.70

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla N°24 se muestra el costo total que se genera si se utiliza la cuarta alternativa.

Tabla N° 24 Costo de la cuarta alternativa

Ítem	Cantidad	Precio Parcial	Total
Suelo Natural	m3	S/.	S/.
Conformación de subrasante mejorada (0.15 m)	4,125.00	30.29	124,946.25
Colocación de afirmado (0.18 m)	4,950.00	70.30	347,985.00
Eliminación material excedente	1,113.75	12.09	13,465.24
Total			486,396.49

Fuente: Elaboración propia

La quinta alternativa es mejorar la subrasante utilizando escoria de cobre en un 40%, el procedimiento para ello es remover 15 cm de suelo, mezclar este suelo con la escoria de cobre y reponerlo conservando la misma cota, y se coloca una capa de 15 cm de afirmado. Considerando para este caso la eliminación del 40% de terreno natural que será reemplazado por la escoria de cobre.

En la Tabla N°25 se muestra el APU de la partida conformación de la subrasante con 40% de escoria.

Tabla N° 25 APU de conformación de subrasante con 40 % de escoria

Partida	CONFORMACIÓN DE SUBRASANTE MEJORADA 40% ESCORIA				Costo unitario directo por : m3	34.79
Rendimiento	m3/DIA	MO. 400.0000	EQ. 400.0000			
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.
	Mano de Obra					
0147010001	CAPATAZ	hh	1.0000	0.0200	25.15	0.50
0147010004	PEON	hh	4.0000	0.0800	15.29	1.22
	1.73					
	Equipos					
337010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	1.73	0.09
349040034	TRACTOR SOBRE ORUGAS DE 190 HP	HM	1.0000	0.0200	315.96	6.32
349030046	RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOP 101-135 HP	hm	1.0000	0.0200	135.08	2.70
349090001	MOTONVELADORA 145 - 150 HP	hm	1.0000	0.0200	187.97	3.76
	12.87					
	Sub partidas					
9.30101E+11	AGUA PARA LA OBRA	m3		0.1200	18.31	2.20
9.30101E+11	TRANSPORTE DE ESCORIA DE COBRE	m3		0.4000	45.00	18.00
	20.20					

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla N°26 se muestra el costo total que se genera si se utiliza la quinta alternativa.

Tabla N° 26 Costo de la quinta alternativa

Ítem	Cantidad	Precio Parcial	Total
Suelo Natural	m3	S/.	S/.
Conformación de subrasante mejorada (0.15 m)	4,125.00	34.79	143,508.75
Colocación de afirmado (0.15 m)	4,125.00	70.30	289,987.50
Eliminación material excedente	1,402.50	12.09	16,959.23
Total			450,452.48

Fuente: Elaboración propia

La sexta alternativa es mejorar la subrasante utilizando escoria de cobre en un 27% y cemento en 3%, el procedimiento para ello es remover 15 cm de suelo, mezclar este suelo con la escoria de cobre y cemento, luego reponerlo conservando la misma cota, y sobre ella una capa de 13 cm de afirmado.

En la Tabla N°27 se muestra el APU de la partida conformación de la subrasante con 27% de escoria y 3% de cemento.

Tabla N° 27 APU conformación de subrasante 27 % escoria y 3% cemento

Partida	CONFORMACIÓN DE SUBRASANTE MEJORADA + CEMENTO					Costo unitario directo por : m3	86.18
Rendimiento	m3/DIA	MO. 400.0000	EQ. 400.0000				
Código	Descripción Recurso	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio S/.	Parcial S/.	
Mano de Obra							
0147010001	CAPATAZ	hh	1.0000	0.0200	25.15	0.50	
0147010004	PEON	hh	4.0000	0.0800	15.29	1.22	1.73
Equipos							
337010001	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	1.73	0.09	
349040034	TRACTOR SOBRE ORUGAS DE 190 HP	HM	1.0000	0.0200	315.96	6.32	
349030046	RODILLO LISO VIBRATORIO AUTOP 101-135 HP	hm	1.0000	0.0200	135.08	2.70	
349090001	MOTONIVELADORA 145 - 150 HP	hm	1.0000	0.0200	187.97	3.76	12.87
Sub partidas							
9.30101E+11	AGUA PARA LA OBRA	m3		0.1200	18.31	2.20	
	CEMENTO PORTLAND TIPO I	kg		95.4000	0.60	57.24	
9.30101E+11	TRANSPORTE DE ESCORIA DE COBRE	m3		0.2700	45.00	12.15	71.59

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla N°28 se muestra el costo total que se genera si se utiliza la sexta alternativa.

Tabla N° 28 Costo de sexta alternativa

Ítem	Cantidad	Precio Parcial	Total
Suelo Natural	m3	S/.	S/.
Conformación de subrasante mejorada - Cemento (0.15 m)	4,125.00	86.18	355,492.50
Colocación de afirmado (0.13 m)	3,575.00	70.30	251,322.50
Eliminación material excedente	1,113.75	12.09	13,465.24
Total			620,280.24

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla N°29 se muestra el resumen de los costos de las seis alternativas.

Tabla N° 29 Resumen de costos

Muestra	Costo S/.
Suelo Natural	606,540.00
90% SN + 10% Escoria de Cobre	595,453.38
80% SN + 20% Escoria de Cobre	502,010.58
70% SN + 30% Escoria de Cobre	486,396.49
60% SN + 40% Escoria de Cobre	450,452.48
70% SN + 27% Escoria de Cobre + 3% Cemento	620,280.24

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Los resultados de los ensayos de CBR arrojan que se incrementa en proporción al aumento de la escoria de cobre en las mezclas, por ello se puede concluir que es viable su uso como estabilizador del suelo cohesivo y se puede utilizar para mejorar la subrasante.

La utilización de la escoria de cobre como estabilizador de los suelos cohesivos aumenta las propiedades de resistencia al corte y cohesión en suelos cohesivos, como se ha demostrado en los ensayos de laboratorio arrojando los siguientes resultados:

- La estabilización con escoria de cobre aumenta el porcentaje de arena de la mezcla debido a que sus partículas son de mayor diámetro que los finos del suelo arcilloso.
- Reduce la expansión de los suelos cohesivos de 3.9 % hasta 2.1% cuando se agrega 40% de escoria de cobre.
- El grado de compactación según los ensayos de CBR mejora al adicionar escoria de cobre.
- La adición de escoria de cobre en las muestras de suelo cohesivo disminuye en general los efectos de expansión, y óptimo contenido humedad en las muestras ensayadas.
- Diseñar un pavimento a nivel de afirmado con suelo natural no es recomendable, puesto que es una subrasante pobre, con un valor de CBR de 6% no apto para soportar solicitaciones de cargas, por ese motivo su estabilización es necesaria.
- Se ha logrado convertir un suelo que no es apto como subrasante a un suelo estabilizado con escoria de cobre apto, con 17 % CBR que puede soportar solicitaciones de cargas mayores.
- El suelo natural cohesivo presenta un CBR de 6.3 % que según el MTC es una subrasante pobre; al utilizar escoria de cobre se logra estabilizar y llegar hasta 17 % utilizando una mezcla de suelo y 40% de escoria de cobre, convirtiéndola en una subrasante buena, esta nueva mezcla reduce el espesor de afirmado de 30 cm a 15 cm reduciendo de esta manera los gastos de construcción.

- Al adicionar cemento en 3%, el CBR aumenta hasta 23.7% utilizando solamente 27% de escoria de cobre, reduciendo la expansión del suelo de 3.9% a 0.6%, en el caso de suelos cohesivos expansivos es una combinación ideal para mitigar dichos efectos, sin embargo esta mezcla eleva los costos de construcción y será utilizada siempre y cuando se demuestre que un suelo es expansivo.
- Los minerales de la escoria de cobre (óxido de sílice y de aluminio) tienen una gran afinidad con la arcilla cuando se estabiliza con cemento, ya que en la fragua del cemento, se libera el suficiente calor de hidratación para que exista una reacción química entre los minerales de la escoria de cobre y la arcilla, el producto de esta reacción es un suelo con mayor capacidad de soporte, esto se verificó al elevarse el valor de CBR de 6.3% a 23.7% utilizando 3% de cemento, 27% escoria de cobre y 70% suelo natural.
- La combinación ideal para la construcción de un pavimento a nivel de afirmado es de 40% escoria de cobre y 60% suelo natural, ya que representa menores gastos en su construcción.

RECOMENDACIONES

Se recomienda investigar las diferentes proporciones de cemento que disminuyan el costo de construcción de un pavimento a nivel de afirmado.

Se recomienda investigar la adición de cal a la mezcla para probar si disminuye la expansión, e incrementa el CBR al igual que el cemento.

La escoria de cobre ha resultado bastante útil para el suelo cohesivo presente en la carretera de acceso al centro poblado de Shicuy, es recomendable su estudio en suelos arcillosos provenientes de otros lugares del Perú.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angulo, Rommel. *Estabilización de subrasantes con cal*. Piura: Universidad de Piura, 2012.
- Borja Suárez, Manuel. *Metodología de la Investigación para Ingenieros*. Chiclayo: Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, 2012.
- Caamaño, Iván Alberto. *Mejoramiento de un suelo blando de subrasante mediante la adición de cascarilla de arroz y su efecto en el módulo resiliente*. Bogotá D.C.: Universidad Militar Nueva Granada, 2016.
- Ccoillo, Illary. *Comportamiento de la subrasante de suelos con adición de escoria en pavimentos flexibles de la Universidad Agraria la Molina – 2016*. Lima: Universidad César Vallejo, 2018.
- Centro de estudios y experimentación de obras públicas. *Escorias de acería de horno de arco eléctrico*. Ficha Técnica, Ministerio de medio ambiente, medio rural y marino, 2011.
- Choque, Ruben Dario. *Viabilidad para el uso de la escoria de acería eléctrica como agregado en mezcla asfáltica en la ciudad de Chimbote*. Huancavelica: Universidad Nacional de Huancavelica, 2016.
- Cusato, Antonio, y Cinthya Pastor. *Lecciones del Mantenimiento de Carreteras en el Perú, 1992 - 2007*. Lima: AFIN, 2008.
- Das, Braja M. *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. México: Editorial Thomson Learning, 2001.
- Hernandez, R., C. Fernandez, y P. Baptista. *Metodología de la investigación*. México: McGrawHill, 2010.
- Instituto Nacional de Calidad. *Norma Técnica Peruana 339.128 - Análisis Granulométrico*. Lima: INACAL, 1999.
- Juaréz Badillo, Eulalio, y Alfonso Rico Rodríguez. *Mecánica de Suelos*. 3ra. México: Limusa, 2012.
- Leon, Dennys Michaelangelo, y Elmer Adán Peña. *Estabilización de la sub rasante mediante el uso de escoria de hornos eléctricos en la pavimentación del jr. bolognesi del pp. jj dos de mayo - Chimbote*. Nuevo Chimbote: Universidad Nacional del Santa, 2017.
- Macedo Vásquez, Frank Manuel. *Diseño estructural del pavimento flexible, en el mejoramiento del camino vecinal Rioja-POsic, utilizando el métró NAASRA, tramo del km. 00+000 al km. 6+090, distrito y provincia de rioja, región de San Martín*. Informe de Tesis, Tarapoto: Universidad Nacional de San Martín, 2014.
- Melendrés, Eder Flavio. *Estabilización química con cal viva para carreteras con suelos arcillosos*. Piura: Universidad Nacional de Piura, 2016.

- Menéndez Acurio, José Rafael. *Ingeniería de Pavimentos: Materiales, Diseño y Conservación*. Lima: Instituto de Construcción y Gerencia, 2012.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. *Manual de Carreteras: Suelos, geología, geotécnica y pavimentos*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014.
- Miranda, Ricardo Javier. *Deteriores en pavimentos rígidos y flexibles*. Valdivia: Universidad Austral de Chile, 2010.
- Montejo, Alfonso. *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Bogotá: Universidad Católica de Colombia, 2002.
- Nazer, A., O. Pavez, F. Rojas, y C. Aguilar. *Una revisión de los usos de la escoria de cobre*. Viña del Mar: IBEROMET XI, 2010.
- Pérez, Carolina Alejandra. *Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como subrasante mejorada*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, 2014.
- Perez, Yaichi Esteban Andrés. *Utilización de la escoria de cobre de Codelco ventanas como agregado pétreo para tratamientos superficiales asfálticos simples en la región de Valparaíso*. Valparaíso: Universidad Técnico Federico Santa María, 2017.
- Ramírez Arellanes, Samuel. *Propiedades mecánicas y microestructura de concreto conteniendo mucílago de nopal como aditivo natural*. Tesis de Maestría, Oaxaca: Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional Unidad Oaxaca, 2008.
- Rico, Alfonso, y Hermillo Del Castillo. *La ingeniería de suelos en vías terrestres: Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas*. México: Limusa, 2005.
- Rojas, Hialmar Ivan, John Henry Barrera, y Carlos Mauricio Piracon. *Análisis comparativo de la estabilización de una base granular, a través de dos elementos químicos como el multienzimático Perma Zyme 11X, y cemento de un suelo de Bogotá D.C.* Bogotá D.C.: Universidad de la Salle, 2007.
- Rondón, Hugo Alexander, y Fredy Alberto Reyes. *Pavimentos: Materiales, construcción y diseño*. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2015.
- Sepúlveda, C. *Utilización de escorias de fundición para la producción de compuestos de hierro*. Santiago: Tesis Universidad de Chile, Dpto. de Ingeniería Química y Biotecnología, 2006.
- Tejada, Gualberto. *Sustitución de los agregados por escoria de cobre en la elaboración de concreto*. Lima: Ciencia & Desarrollo, 2008.
- Vizán, S., G. Huerta, R. Llera, y R. Luiña. *Valoración tecno-ambiental de las escorias de acería Ld mediante análisis dinámico de ciclo de vida*. Madrid: Área de Proyectos de Ingeniería – Universidad de Oviedo, 2010.

SUMARIO DE ANEXOS

ANEXO A: FICHA TÉCNICA DE ESCORIA DE COBRE

ANEXO B: REGISTRO DE ENSAYOS DE LABORATORIO


- **Ensayos suelo natural.**
- **Ensayos suelo natural + 10% escoria de cobre.**
- **Ensayos suelo natural + 20% escoria de cobre.**
- **Ensayos suelo natural + 30% escoria de cobre.**
- **Ensayos suelo natural + 40% escoria de cobre.**

ANEXO A:
FICHA TÉCNICA DE LA ESCORIA DE COBRE



SILICATO DE HIERRO (ESCORIA DE COBRE)

MINERAL SINTETICO INERTE PROCEDENTE DE LA FUNDICION DEL COBRE.

	Características Físicas (ISO11126-3:1993).		Características Químicas.		
	Color	Negro			
	Grano	Angular			
	Densidad Aparente	3.3-3.9 Kg/dm ³ .	Máx	Mín	
	Dureza	6-7 Escala de Mohs	Hierro	(%Fe2O3)	50	21
		Silice	(%SiO ₂)	35	21
		Zinc	(%ZnO)	15	0,2
		Aluminio	(%Al ₂ O ₃)	15	2
		Calcio	(%CaO)	8	1
		Cobre	(%CuO)	2	0,4

Conductividad y Cloruros Norma ASTM D 4940:2010

Cloruros > 25ppm

Conductividad > 150 microsiemens/cm

Granulometría según Norma ISO 11127-2:1993

Fabricamos de forma codificada tres tipos de granulometrías denominadas M-8, M-25 y M-60. Otras granulometrías según solicitud

M-8 (0,2mm-2,8mm)

M-25 (0,2mm-1,4mm)

M-60 (0,2mm-0,5mm)



LUZ mm	Maximo
>3,15	0%
>2,80	10%
0,20 – 2,80	100%
5%	

LUZ mm	Maximo
>1,40	10%
0,50 – 1,40	100%
0,20 – 2,80	15%
5%	

LUZ mm	Maximo
>0,50	10%
0,20 – 0,50	100%
5%	

Chorroado : Con Chorro de arena para limpieza de acero y piedra / superficies de hormigón, para la eliminación de la cascarilla de laminación, óxido, pintura antigua, suciedad, etc. Adecuado para grados de limpieza SA-3, SA-2½ y SA-2.

Granulometría :

M-8: Abrasivo indicado para conseguir altas cotas de rugosidad y en decapado de superficies que se encuentren en un estado de alta corrosión ó tratadas con productos de alto nivel de anclaje.

M-25: Indicado para tratamiento en Aceros Nuevos, hormigones rugosidades media, alto rendimiento y bajo consumo.

M-60: Rugosidades bajas, decapado de primeras capas de pinturas, tratamiento de maderas, textil.

Aplicaciones y usos en Casos Internacionales:

El silicato de hierro como material de construcción, juega un importante papel en la construcción hidráulica moderna, para asegurar los terraplenes de lechos de río, canales, dársenas portuarias, y malecones como protección contra los impactos de olas y turbulencias del tráfico marítimo, debido a su elevado peso en comparación con otros tipos de piedra, ofrece considerables ventajas.

Buques cada vez más grandes y su navegación, causan repetidamente la erosión en las partes inferiores de puertos, canales, zonas de compuerta y ríos que pueden remediarse o incluso evitarse por el uso del silicato de hierro como piedra de construcción hidráulica consiguiendo la mezcla óptima.

El uso en construcción de pistas, horticultura y jardinería, desarrollo urbano y como aditivo al cemento. Lo hace idóneo por su disponibilidad y constante calidad a la intemperie, alta resistencia a largo plazo, cumple con todos los requisitos de aplicación de conservación de los recursos naturales.

El Silicato de Hierro es una escoria de alta calidad, y como piedra en material de construcción es extremadamente denso, es un mineral duro con propiedades tecnológicas especiales, tales como: alta densidad aparente, alta resistencia, rugosidad de la superficie óptima, estabilidad completa de volumen, de muy baja absorción de agua, muy buena resistencia a las heladas, y alta resistencia a la intemperie.

El silicato de hierro es un material granulado amorfo, que se produce después de enfriamiento repentino con chorro de agua, comparable con una roca magmática como el basalto o arena lavada de 0-4 mm.

Presentación :

BIG BAG de 1.500 KG.

Paleta de 1.444 KG. En sacos de 30 kg.

Precios: Dependerá del pedido total y el pedido mínimo será de 1.500 KG o Paleta

Transporte : Se ofertará una vez fijado el punto de destino y total del pedido

ANEXO B:
REGISTRÓ DE ENSAYOS DE LABORATORIO



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

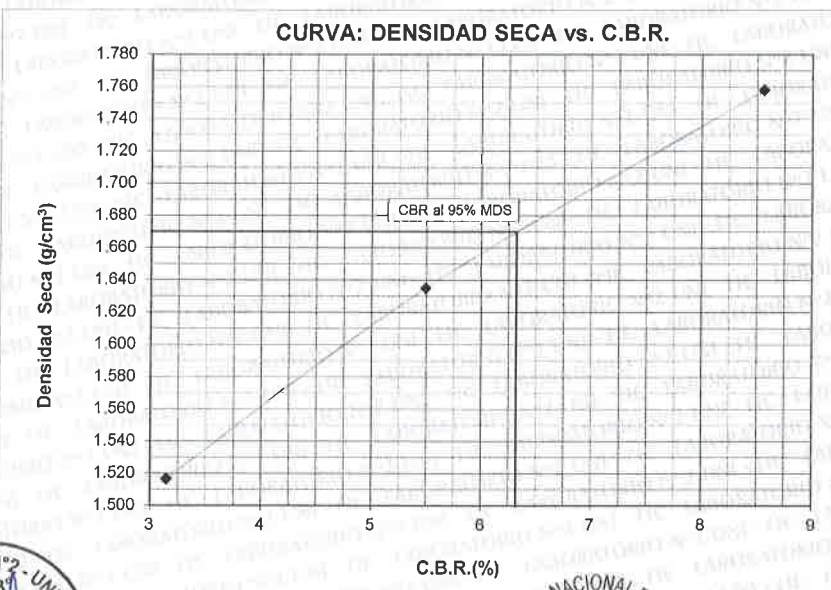
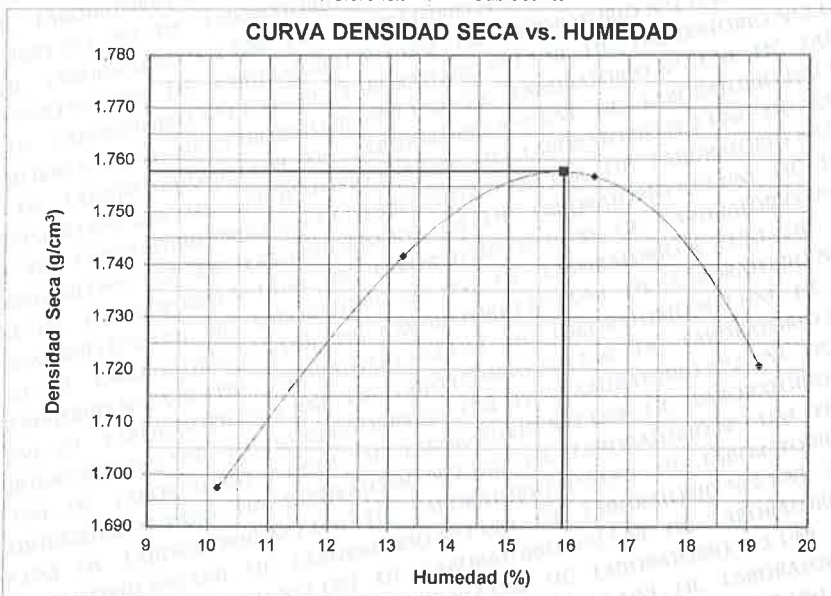
INFORME N° S18 - 960-1

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS UTILIZANDO ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUB RASANTE MEJORADA
UBICACIÓN :
FECHA : 03 DE DICIEMBRE 2018

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

Table with 2 columns: Property and Value. Rows include: Máxima Densidad Seca (g/cm³) : 1.758, Optimo Contenido de Humedad (%) : 15.9, CBR al 100% de la MDS (%) : 8.6, CBR al 95% de la MDS (%) : 6.3

Muestra : Natural
Referencia : Subrasante





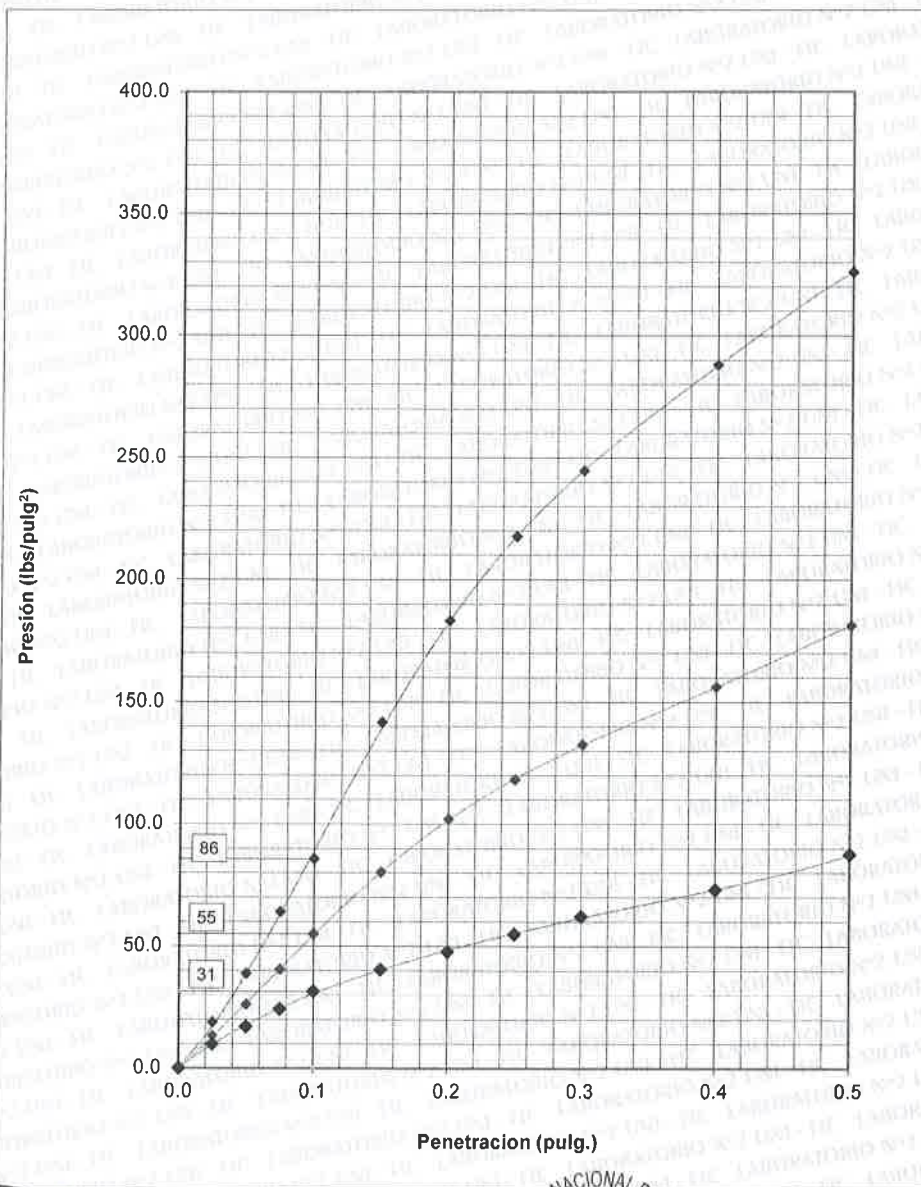
Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S18 - 960-1

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS UTILIZANDO ESCORIA DE COBRE
PARA SU USO COMO SUB RASANTE MEJORADA
UBICACIÓN : -
FECHA : 03 DE DICIEMBRE 2018

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

Muestra : Natural
Referencia : Subrasante





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

INFORME N° S18 - 960-1

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS UTILIZANDO ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUB RASANTE MEJORADA
UBICACIÓN :
FECHA : 03 DE DICIEMBRE 2018

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Natural
Referencia : Subrasante

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

a).- Ensayo Preliminar de Compactación

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557

Máxima Densidad Seca (g/cm³) : 1.758
Optimo Contenido de Humedad (%) : 15.9

b).- Compactación de moldes

Table with 4 columns: MOLDE N°, I, II, III and 5 rows: N° de capas, Numero de golpes/capa, Densidad Seca (g/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. (%)

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. : 8.6 %
C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. : 6.3 %

d).- Expansión(%) : 3.9

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

Ejecutado por : Téc. R. Puchuri P.
Revisado por : Ing. D. Basurto R.



Handwritten signature of Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS

Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI





UNI - FIC - Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

Código

SGC - RG - 02

**ENSAYOS DE LÍMITES DE CONSISTENCIA
ASTM D4318 - ASTM D427**

Versión

1

Fecha

13 / 08 / 2018

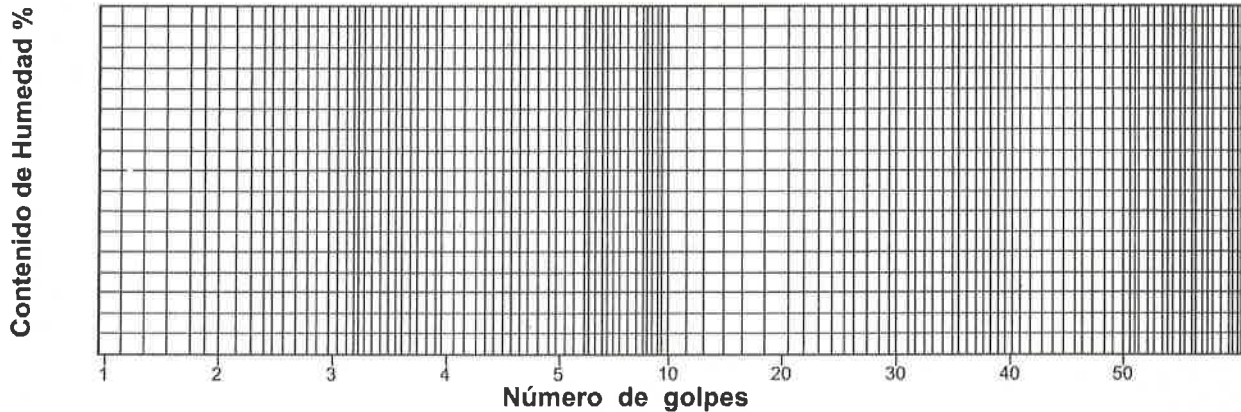
Técnico: Yonatan Malco Torres Mora Informe N°: Suelo Natural
 Calicata: Estabilización de Suelos Cohesivos utilizando Fecha:
 Muestra N°: Escoria de Cobre para su uso como subsanante Mejorada Profundidad:

		LÍMITE PLÁSTICO		LÍMITE LIQUIDO			
Prueba N°							
Frasco N°		CG	7	2	220	R-6	#P
N° de golpes, N				32	27	22	16
Rango N				25-35	20-30	15-25	
1	Masa del suelo húmedo + frasco (g)	26.16	24.54	39.78	37.80	33.25	37.72
2	Masa del suelo seco + frasco (g)	23.39	22.21	33.54	31.49	27.84	30.09
3	Masa del agua (1-2) (g)						
4	Masa del frasco (g)	13.93	14.30	18.07	16.20	15.00	12.28
5	Masa del suelo seco (2-4) (g)						
6	Contenido de humedad ((3/5) x 100) (%)	29.28	29.46	40.34	41.27	42.13	43.16

LÍMITE PLÁSTICO (%): **29.37**

LÍMITE LIQUIDO (%): **41.7**

DIAGRAMA DE FLUIDEZ



LÍMITE DE CONTRACCIÓN

1	Cápsula de contracción N°		
2	Masa de cápsula de contracción + masa de suelo húmedo (g)		
3	Masa de cápsula de contracción + masa de suelo seco (g)		
4	Masa del agua contenida (2-3) (g)		
5	Masa cápsula de contracción (g)		
6	Masa del suelo seco, Mo (3-5) (g)		
7	Humedad del suelo, ω ((4/6)x100) (%)		
8	Volumen de la cápsula de contracción o del suelo húmedo, V (cm³)		
9	Volumen de la pastilla de suelo seco, Vo (cm³)		
10	Variación del volumen por secado, ΔV = (V-Vo) (8-9) (cm³)		
11	Variación de humedad, Δω = $\frac{(V-Vo)\rho_w}{Mo} \times 100$ (10) x 100 / 6 (%)		
12	Relación de contracción, R = $\frac{Mo}{(Vo \times \rho_w)}$ 6 / (9 x ρw)		
13	Limite de contracción, ω - Δω (7-11) (%)		



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

INFORME N° S18 - 1009-1

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE
PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : -
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Suelo Natural

PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS ASTM D 854

PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE SÓLIDOS : 2.69

Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución : Téc. R. Puchuri P.

Revisión : Ing. D. Basurto R. / B.R.P.



Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI



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

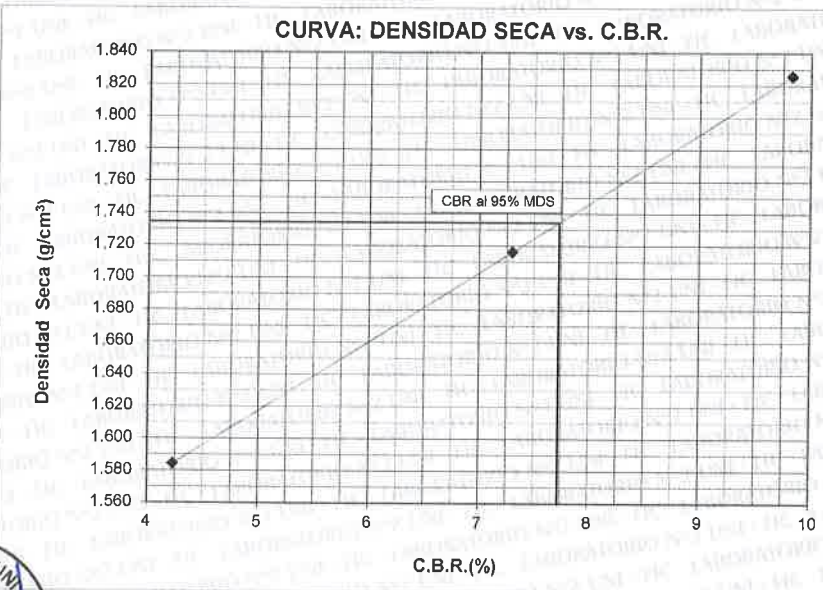
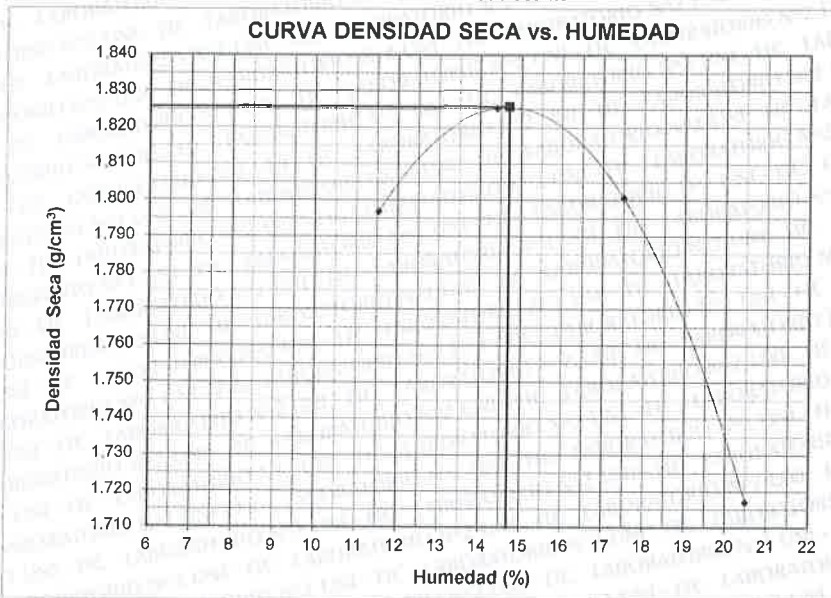
INFORME N° S18 - 960-2

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS UTILIZANDO ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUB RASANTE MEJORADA
UBICACIÓN :
FECHA : 03 DE DICIEMBRE 2018

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

Table with 2 columns: Property and Value. Properties include Máxima Densidad Seca (g/cm³), Optimo Contenido de Humedad (%), CBR al 100% de la MDS (%), and CBR al 95% de la MDS (%).

Muestra : Natural + 10% Escoria de Cobre
Referencia : Subrasante





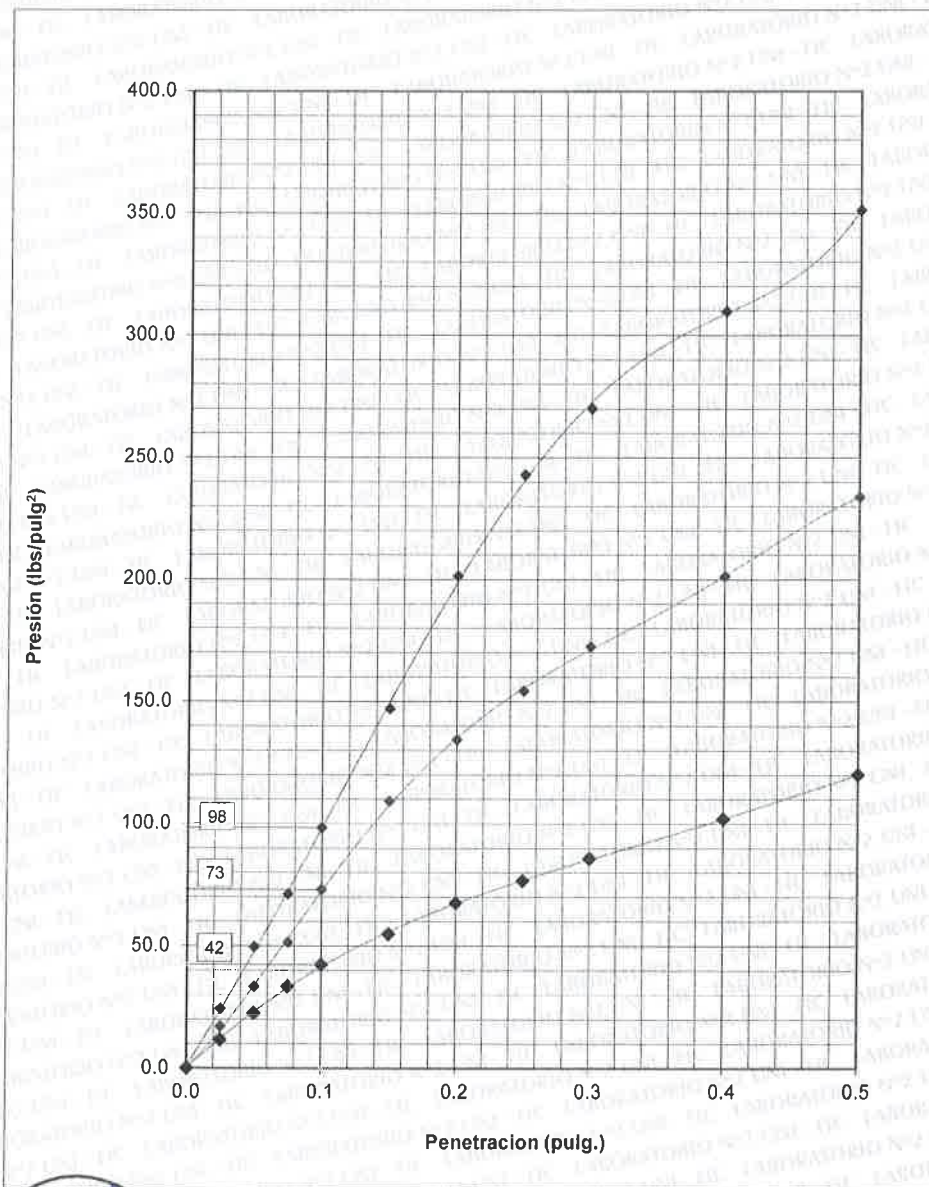
Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S18 - 960-2

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS UTILIZANDO ESCORIA DE COBRE
PARA SU USO COMO SUB RASANTE MEJORADA
UBICACIÓN : -
FECHA : 03 DE DICIEMBRE 2018

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

Muestra : Natural + 10% Escoria de Cobre
Referencia : Subrasante





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

INFORME N° S18 - 960-2

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS UTILIZANDO ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUB RASANTE MEJORADA
UBICACIÓN : -
FECHA : 03 DE DICIEMBRE 2018

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : Natural + 10% Escoria de Cobre
Referencia : Subrasante

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

a).- Ensayo Preliminar de Compactación

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557

Máxima Densidad Seca (g/cm³) : 1.826
Optimo Contenido de Humedad (%) : 14.7

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 (g/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. : 9.8 %
C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. : 7.7 %

d).- Expansión(%) : 3.3

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

Ejecutado por : Téc. R. Puchuri P.
Revisado por : Ing. D. Basurto R.



Handwritten signature of Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS

Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por



Engineering
Technology
Accreditation
Commission



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

INFORME N° S18 - 1009-2-1

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN :-
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : 90% de Suelo Natural + 10% de Escoria de Cobre

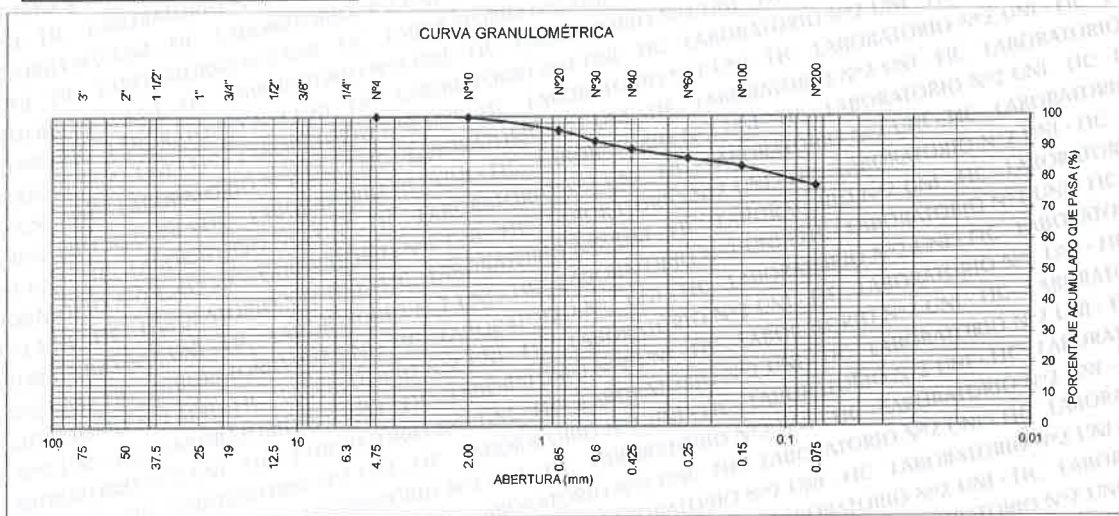
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

Table with 5 columns: Tamiz, Abertura (mm), (%) Parcial Retenido, (%) Acumulado Retenido, Pasa. Rows include various sieve sizes from 3" down to FONDO.

Summary table: % Grava : ---, % Arena : 22.6, % Finos : 77.4

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318: Límite Líquido (%): 36.9, Límite Plástico (%): 25.2, Índice Plástico (%): 11.7

Clasificación SUCS ASTM D2487 : ML
Clasificación AASHTO M 145 (ASTM D3282) : A-6(9)



Nota: La muestra fue remitida e identificada por el Solicitante
Ejecutado por: Téc. R. Puchuri P.
Revisado por: Ing. D. Basurto R. / B.R.P.



Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI





Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S18 - 1009-2-2

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : -
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : 90% de Suelo Natural +
10% de Escoria de Cobre


PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS ASTM D 854

PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE SÓLIDOS : 2.75

Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución : Téc. R. Puchuri P.
Revisión : Ing. D. Basurto R. / B.R.P.




Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI



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

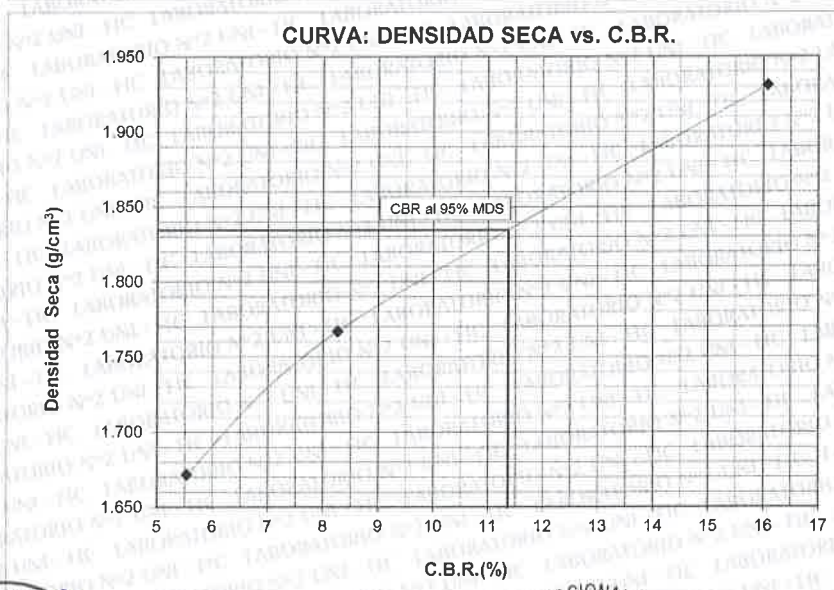
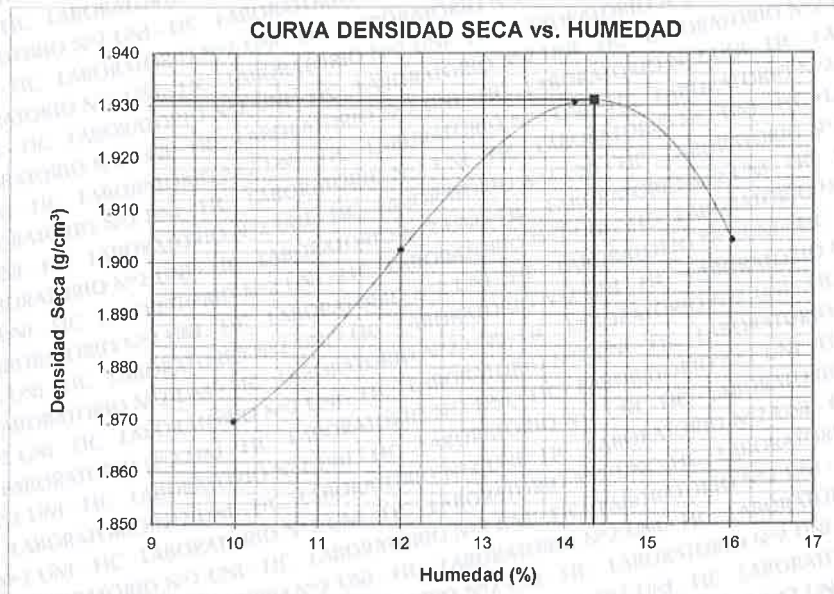
INFORME N° S18 - 1009-3-3

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN :
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

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

Table with 2 columns: Property and Value. Properties include Máxima Densidad Seca (g/cm³), Optimo Contenido de Humedad (%), CBR al 100% de la MDS (%), and CBR al 95% de la MDS (%).

Muestra : 80% de Suelo Natural + 20% de Escoria de Cobre





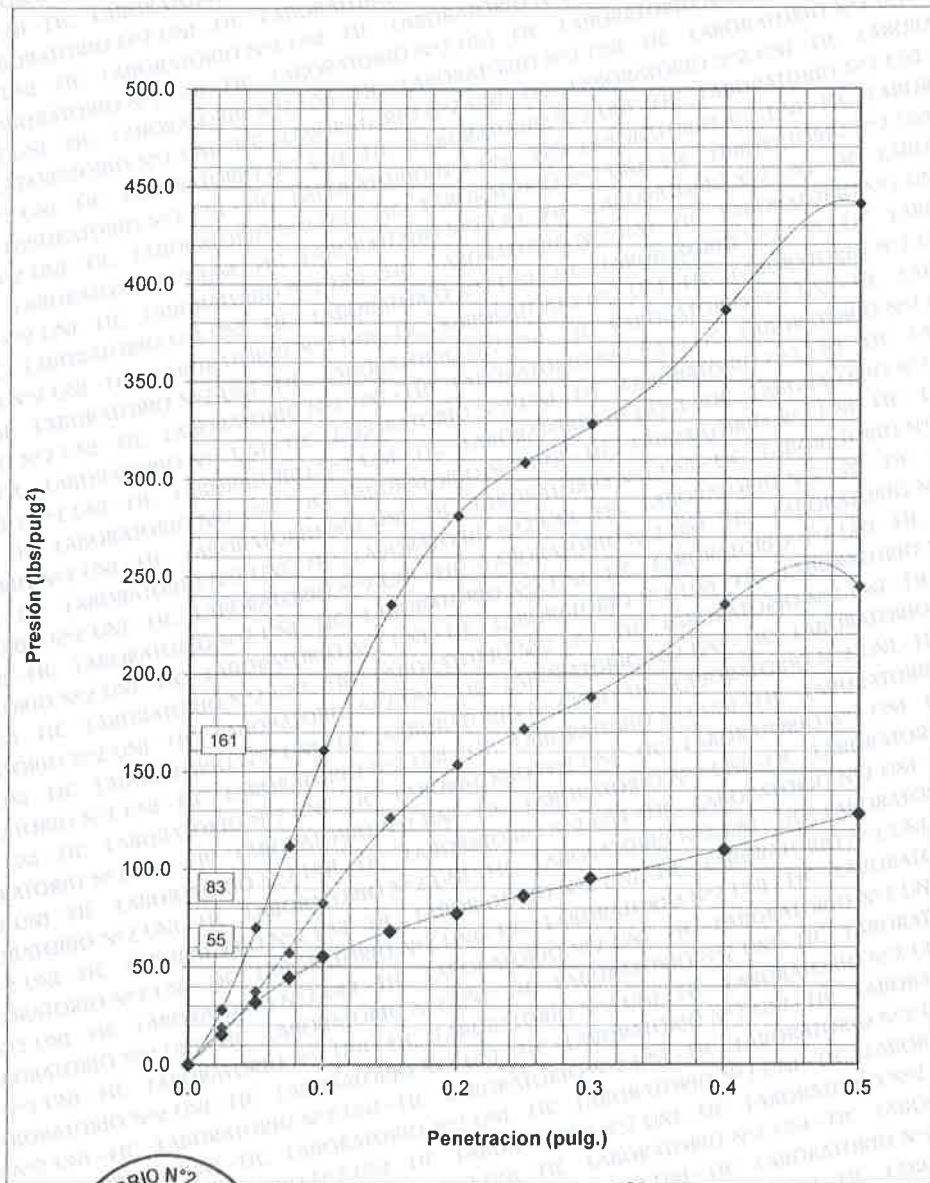
Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S18 - 1009-3-3

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : -
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

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

Muestra : 80% de Suelo Natural + 20% de Escoria de Cobre





Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S18 - 1009-3-3

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
 PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
 UBICACIÓN : -
 FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : 80% de Suelo Natural +
 20% de Escoria de Cobre

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

a).- Ensayo Preliminar de Compactación

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557

Máxima Densidad Seca (g/cm^3) : 1.931
 Optimo Contenido de Humedad (%) : 14.4

b).- Compactación de moldes

MOLDE N°	I	II	III
N° de capas	5	5	5
Numero de golpes/capa	56	25	10
Densidad Seca (g/cm^3)	1.931	1.767	1.672
Contenido de Humedad	14.4	14.4	14.4

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	161	1000	16.1
II	0.1	83	1000	8.3
III	0.1	55	1000	5.5

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. : 16.1 %

C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. : 11.4 %

d).- Expansión(%) : 2.8

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

Ejecutado por : Téc. R. Puchuri P.

Revisado por : Ing. D. Basurto R. / B.R.P.



Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
 Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
 Facultad de Ingeniería Civil - UNI

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por



Engineering
 Technology
 Accreditation
 Commission



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

INFORME N° S18 - 1009-3-1

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN :-
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : 80% de Suelo Natural + 20% de Escoria de Cobre

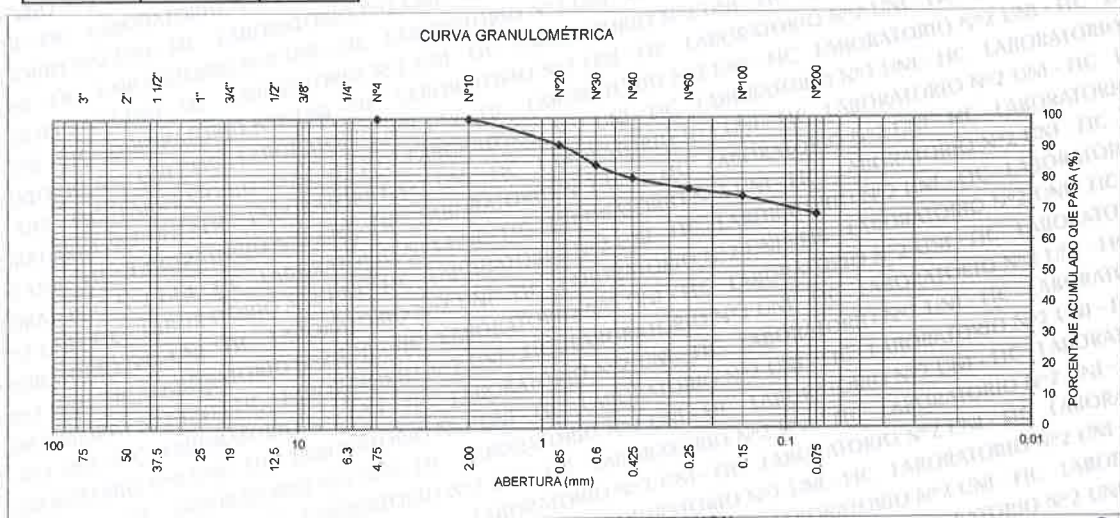
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

Table with 5 columns: Tamiz, Abertura (mm), (%) Parcial Retenido, (%) Acumulado Retenido, Pasa. Rows include various sieve sizes from 3" down to FONDO.

Summary table: % Grava : ----, % Arena : 31.2, % Finos : 68.8

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318: Límite Líquido (%): 35.4, Límite Plástico (%): 24.4, Índice Plástico (%): 11.0

Clasificación SUCS ASTM D2487 : ML
Clasificación AASHTO M 145 (ASTM D3282) : A-6(7)



Nota: La muestra fue remitida e identificada por el Solicitante
Ejecutado por: Téc. R. Puchuri P.
Revisado por: Ing. D. Basurto R. / B.R.P.



Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI





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

INFORME N° S18 - 1009-3-2

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE
PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : -
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : 80% de Suelo Natural +
20% de Escoria de Cobre


PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS ASTM D 854

PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SÓLIDOS : 2.78

Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución : Téc. R. Puchuri P.
Revisión : Ing. D. Basurto R. / B.R.P.




MSc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI



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

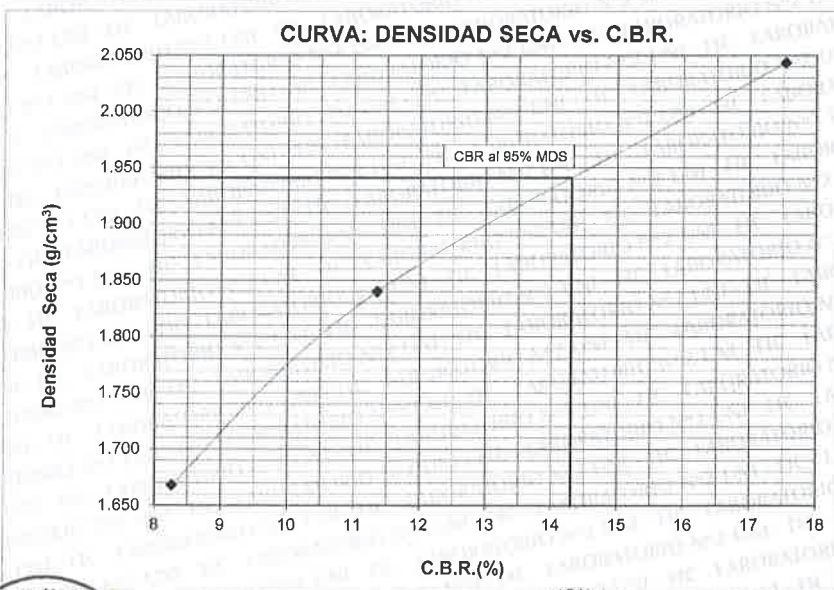
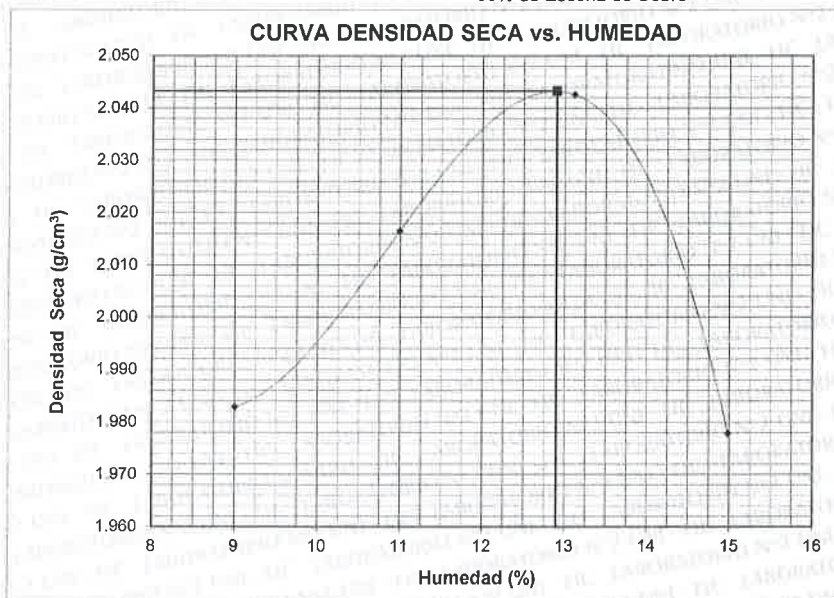
INFORME N° S18 - 1009-4-3

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN :
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

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

Table with 2 columns: Property and Value. Properties include Máxima Densidad Seca (g/cm³), Óptimo Contenido de Humedad (%), CBR al 100% de la MDS (%), and CBR al 95% de la MDS (%).

Muestra : 70% de Suelo Natural + 30% de Escoria de Cobre





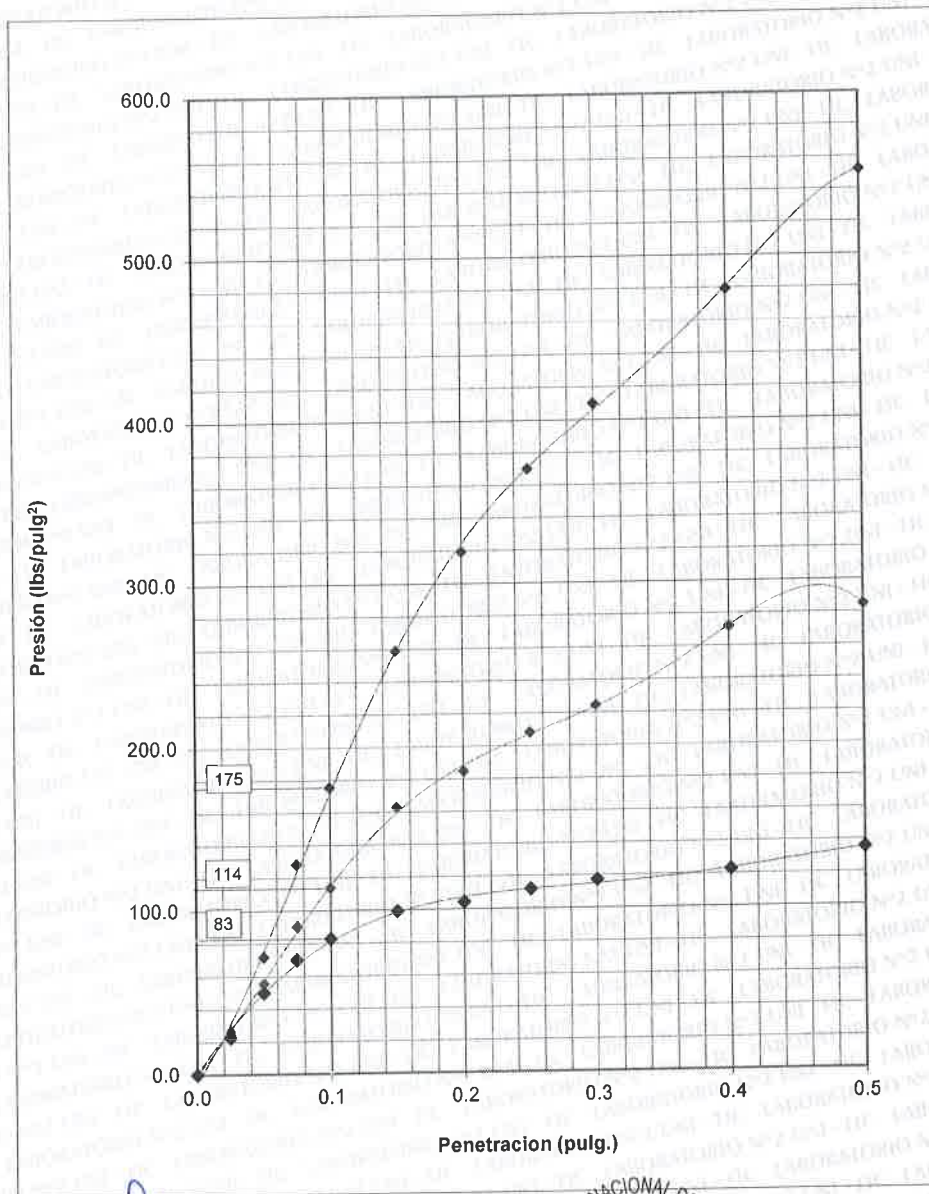
Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S18 - 1009-4-3

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : -
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

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

Muestra : 70% de Suelo Natural + 30% de Escoria de Cobre





Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S18 - 1009-4-3

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
 PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
 UBICACIÓN : -
 FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : 70% de Suelo Natural +
 30% de Escoria de Cobre

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

a).- Ensayo Preliminar de Compactación

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557

Máxima Densidad Seca (g/cm^3) : 2.043
 Optimo Contenido de Humedad (%) : 12.9

b).- Compactación de moldes

MOLDE N°	I	II	III
N° de capas	5	5	5
Numero de golpes/capa	56	25	10
Densidad Seca (g/cm^3)	2.043	1.840	1.668
Contenido de Humedad	12.9	12.8	12.8

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	175	1000	17.5
II	0.1	114	1000	11.4
III	0.1	83	1000	8.3

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. : 17.5 %

C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. : 14.3 %

d).- Expansión(%) : 2.3

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

Ejecutado por : Téc. R. Puchuri P.
 Revisado por : Ing. D. Basurto R. / B.R.P.



Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
 (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
 Facultad de Ingeniería Civil - UNI



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

INFORME N° S18 - 1009-4-1

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN :-
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : 70% de Suelo Natural + 30% de Escoria de Cobre

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

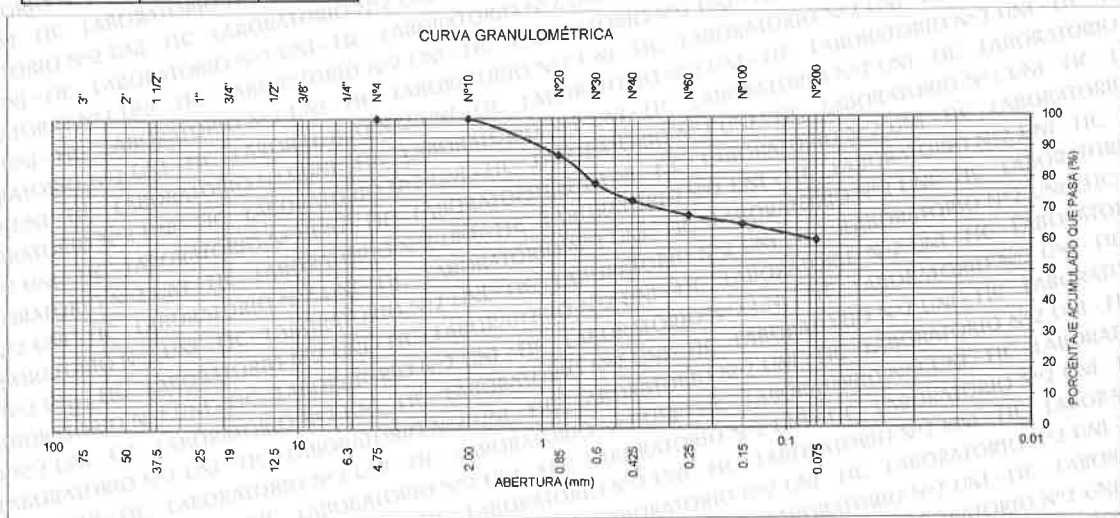
Table with 5 columns: Tamiz, Abertura (mm), (%) Parcial Retenido, (%) Acumulado Retenido, (%) Acumulado Pasa. Rows include various sieve sizes from 3" down to FONDO.

Summary table: % Grava : ----, % Arena : 39.9, % Finos : 60.1

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318: Límite Líquido (%): 34.7, Límite Plástico (%): 24.2, Índice Plástico (%): 10.5

Clasificación SUCS ASTM D2487 : ML

Clasificación AASHTO M 145 (ASTM D3282) : A-6(5)



Nota: La muestra fue remitida e identificada por el Solicitante
Ejecutado por: Téc. R. Puchuri P.
Revisado por: Ing. D. Basurto R. / B.R.P.



Handwritten signature of LUISA E. SHUAN LUCAS

Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por



Engineering Technology Accreditation Commission



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

INFORME N° S18 - 1009-4-2

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE
PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : -
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : 70% de Suelo Natural +
30% de Escoria de Cobre

PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS ASTM D 854

PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE SÓLIDOS : 2.87

Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución : Téc. R. Puchuri P.
Revisión : Ing. D. Basurto R. / B.R.P.



Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI





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

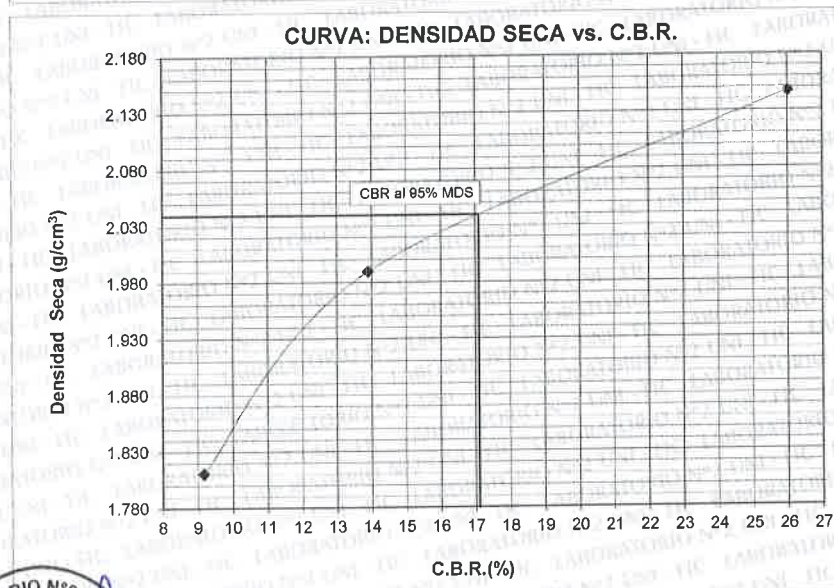
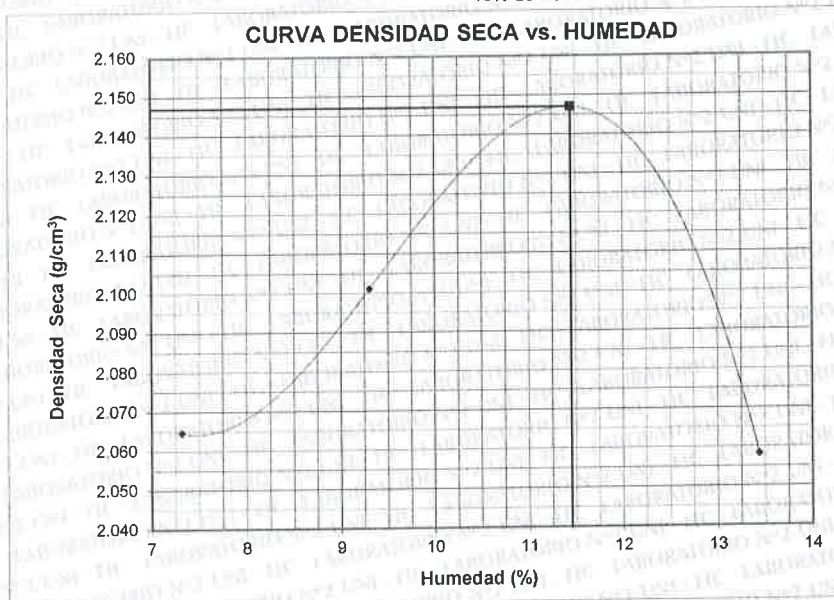
INFORME N° S18 - 1009-5-3

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN :
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

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

Table with 2 columns: Property and Value. Properties include Máxima Densidad Seca (g/cm³), Optimo Contenido de Humedad (%), CBR al 100% de la MDS (%), and CBR al 95% de la MDS (%).

Muestra : 60% de Suelo Natural + 40% de Escoria de Cobre





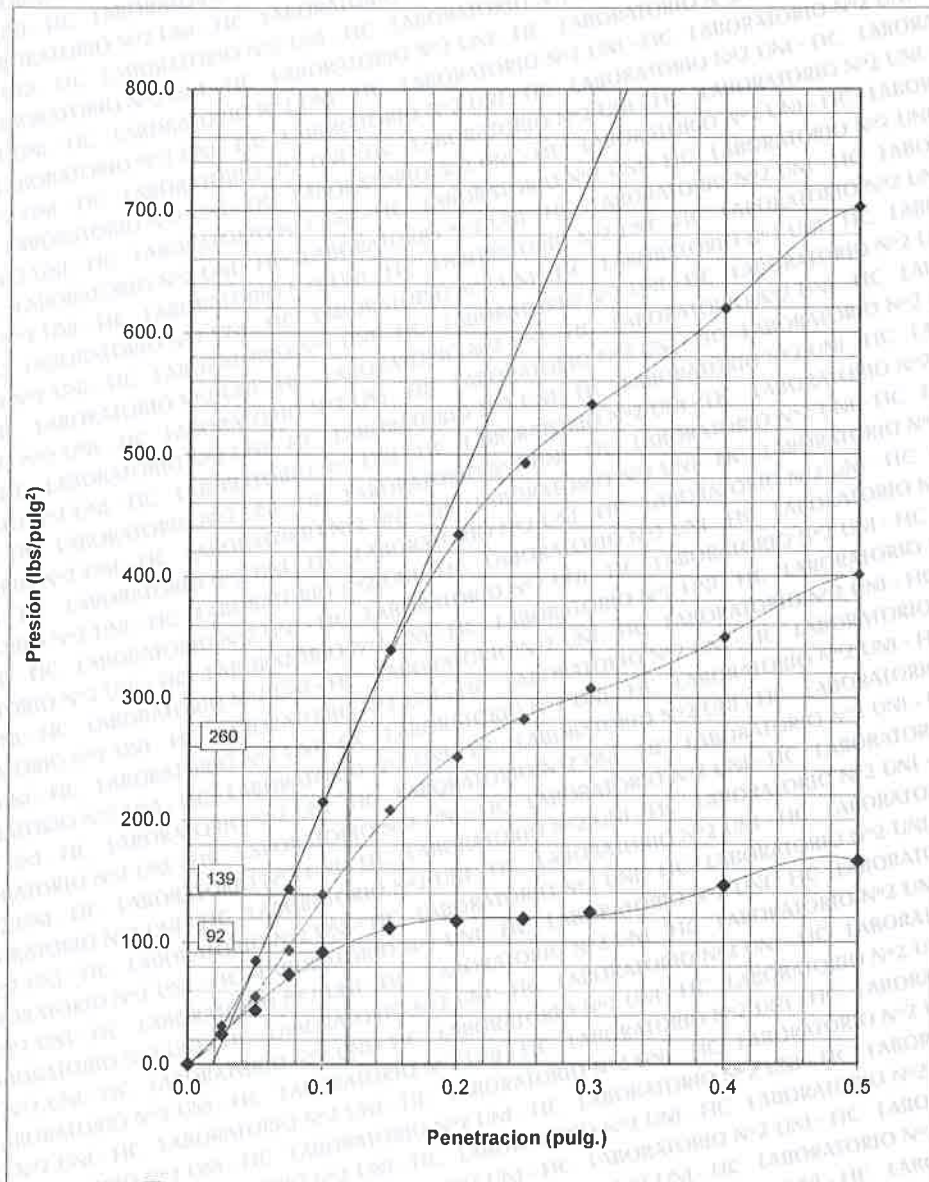
Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S18 - 1009-5-3

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN :
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

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

Muestra : 60% de Suelo Natural + 40% de Escoria de Cobre





Facultad de Ingeniería Civil

Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S18 - 1009-5-3

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
 PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
 UBICACIÓN : -
 FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : 60% de Suelo Natural +
 40% de Escoria de Cobre

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

a).- Ensayo Preliminar de Compactación

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557

Máxima Densidad Seca (g/cm^3) : 2.147
 Óptimo Contenido de Humedad (%) : 11.5

b).- Compactación de moldes

MOLDE N°	I	II	III
N° de capas	5	5	5
Numero de golpes/capa	56	25	10
Densidad Seca (g/cm^3)	2.147	1.989	1.811
Contenido de Humedad	11.5	11.5	11.5

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	260	1000	26.0
II	0.1	139	1000	13.9
III	0.1	92	1000	9.2

C.B.R. Para el 100% de la M.D.S. : 26.0 %
 C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. : 17.1 %

d).- Expansión(%) : 2.1

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

Ejecutado por : Téc. R. Puchuri P.
 Revisado por : Ing. D. Basurto R. / B.R.P.



Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
 Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
 Facultad de Ingeniería Civil - UNI

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por



Engineering
 Technology
 Accreditation
 Commission



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

INFORME N° S18 - 1009-5-1

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : -
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : 60% de Suelo Natural + 40% de Escoria de Cobre

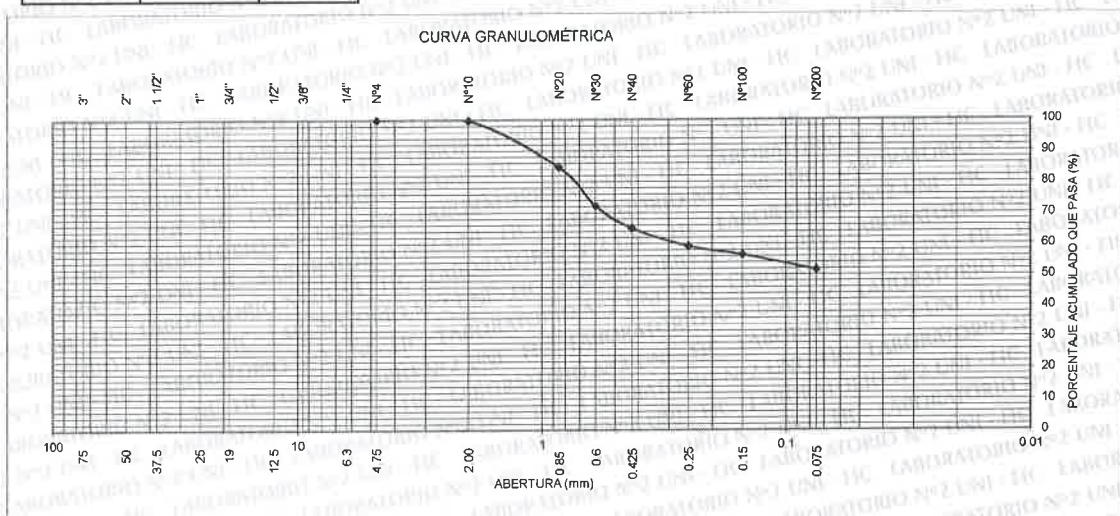
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

Table with 5 columns: Tamiz, Abertura (mm), (%) Parcial Retenido, (%) Acumulado Retenido, Pasa. Rows include various sieve sizes from 3" down to FONDO.

Summary table: % Grava : ---, % Arena : 48.5, % Finos : 51.5

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318: Limite Líquido (%) : 33.6, Limite Plástico (%) : 23.9, Indice Plástico (%) : 9.7

Clasificación SUCS ASTM D2487 : ML
Clasificación AASHTO M 145 (ASTM D3282) : A-4(3)



Nota: La muestra fue remitida e identificada por el Solicitante
Ejecutado por: Téc. R. Puchuri P
Revisado por: Ing. D. Basurto R. / B.R.P.



Handwritten signature of Luisa E. Shuan Lucas

Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por



Engineering Technology Accreditation Commission



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

INFORME N° S18 - 1009-5-2

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : -
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : 60% de Suelo Natural +
40% de Escoria de Cobre

PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS ASTM D 854

PESO ESPECÍFICO RELATIVO DE SÓLIDOS : 2.93

Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución : Téc. R. Puchuri P.
Revisión : Ing. D. Basurto R. / B.R.P.



Handwritten signature of Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI





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

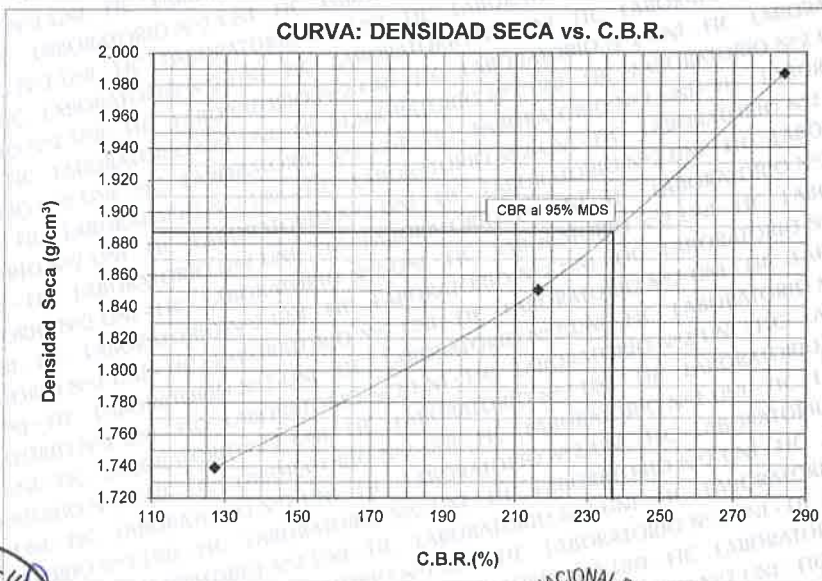
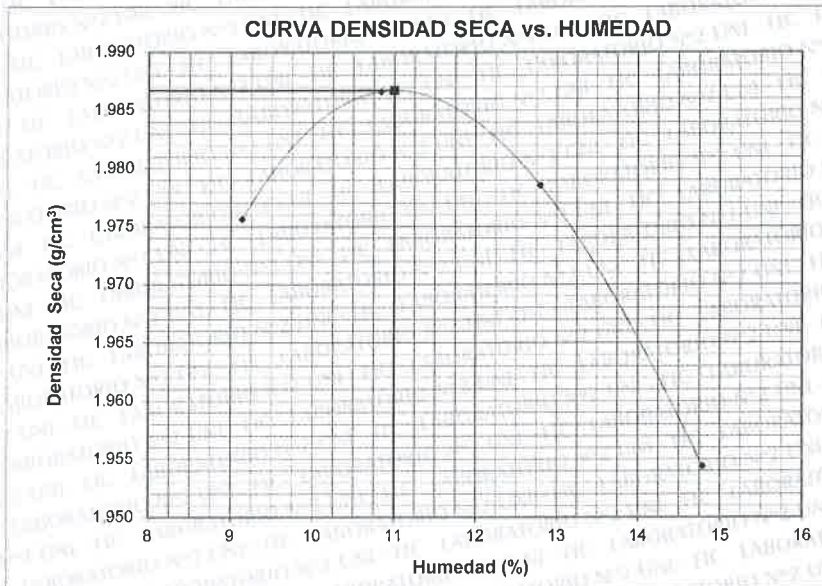
INFORME N° S18 - 1009-6-3

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN :
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

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

Table with 2 columns: Property and Value. Rows include: Máxima Densidad Seca (g/cm³) : 1.987, Optimo Contenido de Humedad (%) : 11.0, CBR al 100% de la MDS (%) : 283.9, CBR al 95% de la MDS (%) : 237.0

Muestra : 70% de Suelo Natural + 27% de Escoria de Cobre + 3% de Cemento





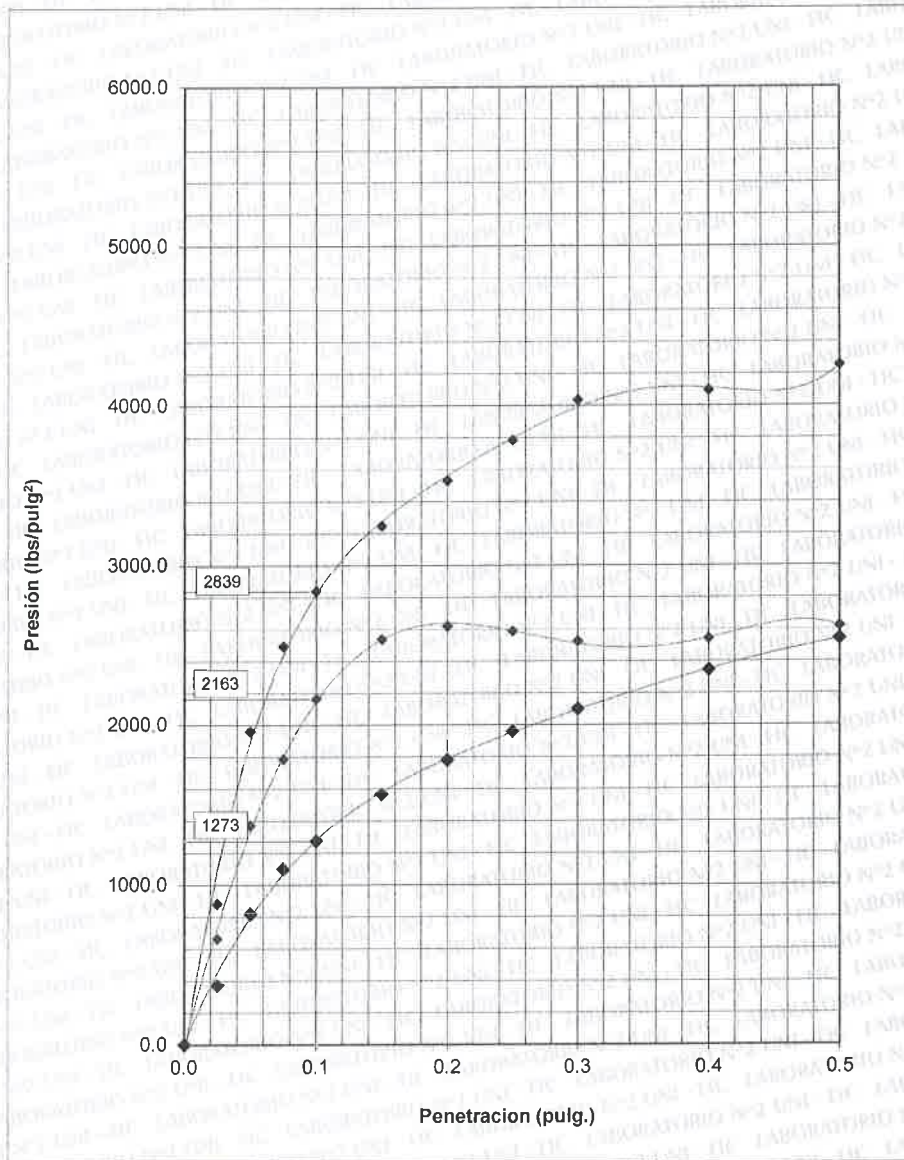
Facultad de Ingeniería Civil
Laboratorio N°2 - Mecánica de Suelos

INFORME N° S18 - 1009-6-3

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : -
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

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

Muestra : 70% de Suelo Natural +
27% de Escoria de Cobre +
3% de Cemento





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

INFORME N° S18 - 1009-6-3

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : -
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : 70% de Suelo Natural +
27% de Escoria de Cobre +
3% de Cemento

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

a).- Ensayo Preliminar de Compactación

Ensayo Proctor Modificado ASTM D1557

Máxima Densidad Seca (g/cm³) : 1.987
Optimo Contenido de Humedad (%) : 11.0

b).- Compactación de moldes

Table with 4 columns: MOLDE N°, I, II, III. Rows include: N° de capas, Numero de golpes/capa, Densidad Seca (g/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. : 283.9 %
C.B.R. Para el 95% de la M.D.S. : 237.0 %

d).- Expansión(%) : 0.6

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

Ejecutado por : Téc. R. Puchuri P.
Revisado por : Ing. D. Basurto R. / B.R.P.



Handwritten signature of Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS

Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por



Engineering
Technology
Accreditation
Commission



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

INFORME N° S18 - 1009-6-1

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA
UBICACIÓN :
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : 70% de Suelo Natural +
27% de Escoria de Cobre +
3% de Cemento

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO - ASTM D422

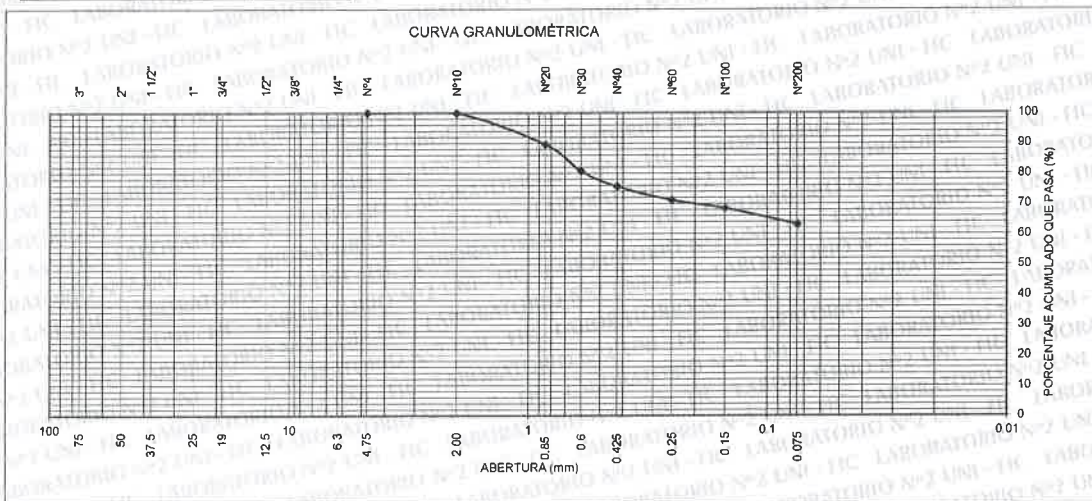
Table with 5 columns: Tamiz, Abertura (mm), (%), Parcial Retenido, (%), Acumulado Retenido, Pasa. Rows include various sieve sizes from 3" down to FONDO.

Summary table: % Grava : ---, % Arena : 36.9, % Finos : 63.1

LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM D4318: Limite Líquido (%): 38.1, Limite Plástico (%): 27.9, Índice Plástico (%): 10.2

Clasificación SUCS ASTM D2487 : ML

Clasificación AASHTO M 145 (ASTM D3282) : A-4(5)



Nota: La muestra fue remitida e identificada por el Solicitante
Ejecutado por: Téc. R. Puchuri P.
Revisado por: Ing. D. Basurto R. / B.R.P.



Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI

Carrera de Ingeniería Civil Acreditada por



Engineering Technology Accreditation Commission



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

INFORME N° S18 - 1009-6-2

SOLICITANTE : YONATAN MALCO TORRES MORA
PROYECTO : "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS COHESIVOS CON ESCORIA DE COBRE PARA SU USO COMO SUBRASANTE MEJORADA"
UBICACIÓN : -
FECHA : 28 DE DICIEMBRE 2018

REPORTE DE ENSAYOS DE LABORATORIO

Muestra : 70% de Suelo Natural +
27% de Escoria de Cobre +
3% de Cemento

PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SOLIDOS ASTM D 854


PESO ESPECIFICO RELATIVO DE SÓLIDOS : 2.87

Nota. Muestra remitida e identificada por el Solicitante

Ejecución : Téc. R. Puchuri P.

Revisión : Ing. D. Basurto R. / B.R.P.




Msc. Ing. LUISA E. SHUAN LUCAS
Jefa (e) Laboratorio N°2-Mecánica de Suelos
Facultad de Ingeniería Civil - UNI



UNI - FIC - Laboratorio N° 2 - Mecánica de Suelos

Código

SGC - RG - 08

ENSAYO RELACIÓN HUMEDAD - DENSIDAD (PROCTÓR MODIFICADO)
(ASTM D 1557)

Versión

0

Fecha

30 - 11 - 17

Técnico: Informe N°:

Fecha: Canteras:

Ubicación: Muestra: Prof.(m):

Compactación

Prueba N°	1	2	3	4	5
N° de Capas					
N° de Golpes por Capa					
Peso del Molde+Suelo Compacto (gr)	5964	5908	5754	5888	
Peso de Molde (gr)	4133				
Peso Suelo Compacto (gr)					
Volumen del Molde (cm³)	939.9				
Densidad Húmeda (gr/cm³)					
Densidad Seca (gr/cm³)					

Método A B C

	Pesos (gr)	% Ret.	% Acum.
Malla 3"			
Malla 3" - 3/4"			
Malla 3/4" - 3/8"			
Malla 3/8" - N° 4			
Malla N° 4 -			

MDS gr/cm³

OCH %

Humedad

Prueba N°	1	2	3	4	5
Tara N°	T2-98	1014	T2-98	T2-8	
Tara + Suelo Húmedo (gr)	566.5	419.3	178	274.7	
Tara + Suelo Seco (gr)	429.6	360.4	175.2	262.1	
Peso del Agua (gr)					
Peso de Tara (gr)	139.5	135.7	139.6	161.9	
Peso Suelo Seco (gr)					
Contenido de Humedad (%)	23.2	26.2			

4 6 8 10

Fracción Gruesa

Gravedad Específica

Peso Mat. s.s.s. (aire) (gr) :

Peso Mat. s.s.s. (agua) (gr) :

Peso Seco (gr) :

P.e Bulk :

Contenido Humedad

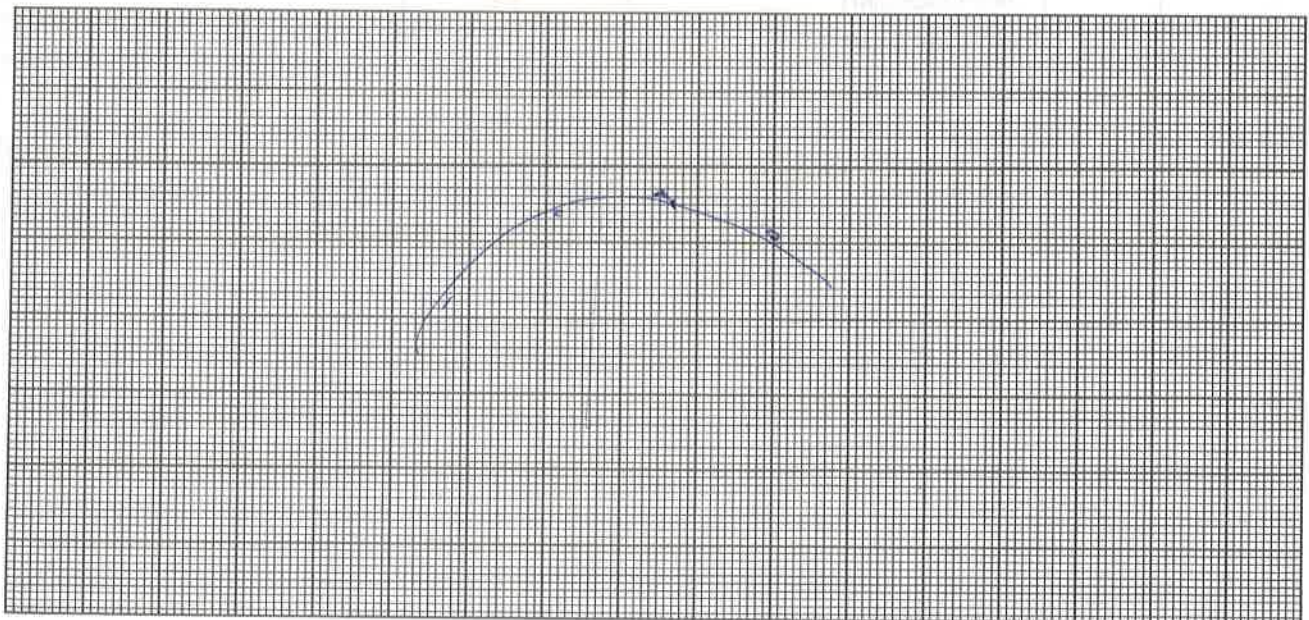
Peso Húmedo + tara (gr) :

Peso Seco + Tara (gr) :

Peso Tara (gr) :

Contenido Humedad% :

Densidad Seca (gr/cm³)



Contenido Humedad (%)