

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES
FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERIA CIVIL**



PROYECTO DE GRADO

**“ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS
COMBINADOS CON CASCARA DE ARROZ Y CAL”**

TUTOR:

MSc. Ing. Víctor Eduardo Bermejo Franco.
Ing. María Del Carmen Cenzano Serrano.

POSTULANTE:

Univ. Guido Uluri Mamani

La Paz - Bolivia.
Febrero 2022.



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

Agradecimientos:

Quiero agradecer a mis tutores, por su colaboración y confianza que tuvieron hacia a mí y también en el asesoramiento en el desarrollo de la presente tesis.

A todos los colaboradores del laboratorio IEM quienes me brindaron su apoyo de las instalaciones del laboratorio y transmitiéndome los conocimientos para el correcto desarrollo de los ensayos necesarios para la presente tesis.

Agradecer a mi familia por apoyarme en cada momento y con sus consejos de tramo en mi vida

Dedicatoria:

Dedico esta tesis a toda mi familia, a mi madre Lucía Mamani, mi padre Miguel Uluri, hermanos Janneth, Maruja, Vladimir, Ruddy y a todas las personas que siempre confiaron en mí y a los que me apoyaron incondicionalmente en mi formación profesional para realizar esta presente investigación.

RESUMEN

ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS COMBINADOS CON CASCARA DE ARROZ Y CAL

En el presente proyecto de investigación, se buscó lograr de manera experimental una mejora de las características físicas y mecánicas de un suelo blando arcilloso, además la finalidad de la evaluación del efecto de la ceniza de cascara de arroz en el comportamiento mecánico de la subrasante del suelo, es decir, busca la evaluación del efecto que tiene el uso de la ceniza de cascara de arroz en la resistencia mecánica del suelo mediante la adición de ceniza de cascara de arroz, con el fin de generar una capa de soporte más estable para la conformación de una estructura de pavimento, evaluando su comportamiento a través de ensayos de clasificación y de resistencia como parámetros de índices del suelo.

La investigación inició con el estudio de las muestras las cuales fueron obtenidas del departamento de La Paz – Campus Universitario Cota Cota. Los ensayos se realizaron en el laboratorio del Instituto de Ensayo de Materiales (IEM). Se procedió a realizar las mezclas suelo con ceniza de cáscara de arroz y cal en diferentes porcentajes para evaluar su comportamiento mecánico como estabilizador primario.

Los resultados obtenidos muestran una mejora debido a la presencia de ceniza de cáscara de arroz. Las combinaciones de suelo arcilloso, ceniza de cáscara de arroz y cal lograron mayores ventajas que las combinaciones de suelo arcilloso y ceniza de cáscara de arroz. Se logró incrementar el valor de soporte de california (CBR) de un valor de 0.073 hasta 5.50, lo cual incremento en un 5.427 realizando combinaciones de suelo arcilloso y ceniza de cáscara de arroz, teniendo la mezcla un 20% de ceniza de cáscara de arroz.

Además, como parte de la metodología propuesta el uso de la ceniza de cascara de arroz, disminuirá los costos de mejoramiento del suelo ya que es un material que se encuentra en abundancia en los departamentos de La Paz y Santa Cruz, y los costos para la adquisición del material son mínimos, con el tipo de mejora propuesto, la subrasante del suelo mejora notablemente ya que este aumenta la capacidad de soporte de california (CBR).

Los resultados muestran que el uso de la ceniza de cascara de arroz permite el aumento de la resistencia del suelo.

La investigación concluye que el uso de la ceniza de cáscara de arroz como material para la estabilización de suelos arcillosos en obras de viales promete buenos resultados.

Guido Uluri Mamani
C.I. 9212387 L.P.

R.U. 1673931

Correo: uluriguido@gmail.com
Cel: 73245957

ABSTRACT

STABILIZATION OF CLAY SOILS COMBINED WITH RICE HUSK AND LIME

In this research project, we sought to experimentally achieve an improvement in the physical and mechanical characteristics of a soft clay soil, in addition to the purpose of evaluating the effect of rice husk ash on the mechanical behavior of the subgrade of the soil, that is, it seeks the evaluation of the effect that the use of rice husk ash has on the mechanical resistance of the soil through the addition of rice husk ash, in order to generate a more stable support layer for the soil. conformation of a pavement structure, evaluating its behavior through classification and resistance tests as soil index parameters.

The investigation began with the study of the samples which were obtained from the department of La Paz - Cota Cota University Campus. The tests were carried out in the laboratory of the Materials Testing Institute (IEM). Soil mixtures were made with rice husk ash and lime in different percentages to evaluate its mechanical behavior as a primary stabilizer.

The results obtained show an improvement due to the presence of rice husk ash. The combinations of clay soil, rice husk ash and lime achieved greater advantages than the combinations of clay soil and rice husk ash. It was possible to increase the support value of California (CBR) from a value of 0.073 to 5.50, which increased by 5.427 by making combinations of clay soil and rice husk ash, with the mixture having 20% rice husk ash. .

In addition, as part of the proposed methodology, the use of rice husk ash will reduce the costs of soil improvement, since it is a material that is found in abundance in the departments of La Paz and Santa Cruz, and the costs for the acquisition of the material are minimal, with the type of improvement proposed, the subgrade of the soil improves notably since it increases the bearing capacity of california (CBR).

The results show that the use of rice husk ash allows the increase of soil resistance. The research concludes that the use of rice husk ash as a material for the stabilization of clay soils in road works promises good results.



2022-TTES-126-D-2

**DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS**
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-402/2022
La Paz, 16 de Marzo del 2022

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **10 de Marzo del 2022**, por **GUIDO ULURI MAMANI** con C.I. N° **9212387 LP**, con número de trámite **DA 135/2022**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: "**ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS COMBINADOS CON CASCARA DE ARROZ Y CAL**", cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el "*Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración*".

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece "*Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión*". En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: "*la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios*".

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: "*...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial*".

**"2022 AÑO DE LA REVOLUCIÓN CULTURAL PARA LA DESPATRIARCALIZACIÓN:
POR UNA VIDA LIBRE DE VIOLENCIA CONTRA LAS MUJERES"**



Oficina Central - La Paz
Av. Mootes, No 515,
entre Av. Uruguay y
C. Batallón Illimani,
Telf.: 2195200 - 2195276
2195251 fax: 2195200

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijano,
N° 29, Edif. Bicentenario,
Telf.: 3121752 - 72043936

Oficina - Cochabamba
Calle Chuquiaca, N° 665,
Piso 2, entre Antezana y Larza
zona Central - Noroeste,
Telf.: 4161403 - 72043937

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. Multicentro El Ceibo
Ilda. Piso 2, Of. 58,
zona 16 de Julio,
Telf.: 2141001 - 72043939

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 7, N° 366
casí est. Urriologuilla,
zona Parque Bolívar,
Telf.: 72009873

Oficina - Tarija
Calle Ingavi, N° 385
entre Santa Cruz
y Méndez, zona
La Pampa,
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre,
N° 5837, entre Ayacucho
y Junín, Galería Central,
Of. 14 (Ex Banco Fie),
Telf.: 67201888

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. AM. Salinas N° 242,
Primer Piso, Of. 17.



Que, el artículo 4, inciso e) de la ley 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: "... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

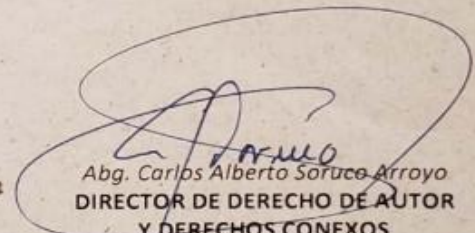
POR TANTO

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: **"ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS COMBINADOS CON CASCARA DE ARROZ Y CAL"**, a favor del autor y titular: **GUIDO ULURI MAMANI**, con C.I. N° 9212387 LP, bajo el seudónimo **GUIDO**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.



Abg. Carlos Alberto Soruco Arroyo
**DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS**
SERVICIO NACIONAL DE PROPIEDAD INTELECTUAL



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, No 515,
entre Av. Uruguay y
C. Batallón Illimani,
Telf.: 215200 - 215276
215251 fax: 215200

CASA/ffc
c.c. Arch.

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijarro,
N° 29, Edif. Bicentenario,
Telf.: 3121252 - 21062936

Oficina - Cochabamba
Calle Chuquisaca, N° 649,
Piso 2, entre Arberama y Lanza
zona Central - Noreste,
Telf.: 6141403 - 21062937

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. MultiCentro El Ceibo
Uda. Piso 3, Of. 58,
zona 16 de Julio,
Telf.: 2141001 - 21062929

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 7, N° 366
cas. esq. Urutogochia,
zona Parque Bolívar,
Telf.: 21005873

Oficina - Tarija
Calle Ingavi, N° 385
entre Santa Cruz
y Miranda, zona
La Pampa,
Telf.: 22095288

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre,
N° 5875, entre Agacacho
y Jarrín, Galería Central,
Of. 14 (Ex Banco Fie),
Telf.: 62201288



Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Weenceslao Albo y San Alberto,
Edif. AM, Salinas N° 262,
Primer Piso, Of. 17.

INDICE DE CONTENIDOS

viii

CAPÍTULO I INTRODUCCION	1
1.1. Título.	1
1.2. Justificación General.	1
1.3. Fines.....	2
1.4. Estado del Arte.	3
1.5. Objetivo General.....	5
1.6. Objetivos Específicos.....	5
1.7. Alcance.....	6
CAPÍTULO II MARCO TEORICO.....	7
2.1. Suelo Arcilloso.....	7
2.1.1. Definición.....	7
2.1.2. Clasificación de las Arcillas.....	8
2.1.3. Características físicas y químicas.....	9
2.2. Cascara de Arroz.....	12
2.2.1. Definición.....	12
2.2.2. Proceso de obtención.....	13
2.2.3. Características de la cascara de arroz.....	16
2.3. Ceniza de Cascara de Arroz.....	17
2.3.1. Quema de la Cascara de Arroz.....	17
2.3.2. Características de la ceniza de cascara de arroz.....	17
2.3.3. Propiedades de la Ceniza de Cascara de Arroz.....	18
2.3.4. Etapas de la quema de la cascara de arroz.....	21
2.3.5. Métodos de Elaboración de la quema de la cascara de arroz.....	24
2.4. La Cal.....	29
2.5. Sub-Rasante.....	32
2.6. Valor Soporte de California (CBR) ASTM D – 1883.....	34
2.7. Estabilización del Suelo.....	35
2.7.1. Concepto de Estabilización.....	35
2.7.2. Métodos de Estabilización.....	37
2.7.3. Propiedades afectadas con la estabilización.....	58
CAPÍTULO III MARCO PRÁCTICO Y METODOLOGIA.....	62
3.2. Método General.....	62
3.3. Método Aplicado.....	62
3.4. Localización y Ubicación de la Muestra.....	62
3.5. Metodología.....	64
3.6. Ensayos en Suelo Natural.....	67
3.6.1. Ensayos Físicos.....	67
3.7. Ensayo suelo cal y CCA.....	81
3.8. Resultados.....	89
CAPÍTULO IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	92
4.1. Conclusiones.....	92
4.2. Recomendaciones.....	94
4.3. Bibliografía.....	95
ANEXO A.....	97

LISTA DE TABLAS

x

Tabla 1. Composición química de la cascara de arroz.	17
Tabla 2. Composición química.	19
Tabla 3. Características físicas de la cáscara de arroz.	19
Tabla 4: Propiedades de la cascara de arroz.	20
Tabla 5 : Composición química de la ceniza de cascara de arroz.	21
Tabla 6. Efecto de las condiciones de combustión que presenta la ceniza de cáscara de arroz.	25
Tabla 7: Parámetros generales para uso de suelos.	32
Tabla 8: Características generales para uso de suelos.	33
Tabla 9. Rango de uso de cemento de acuerdo al tipo de suelo.	47
Tabla 10. Contenido de humedad del suelo de cota cota.	69
Tabla 11. Resultado al análisis del agregado grueso.	71
Tabla 12. Resultado al análisis del agregado fino.	71
Tabla 13. Resultado de las características de la granulometría.	71
Tabla 14. Resultado de límites de consistencia.	72
Tabla 15. Gravedad Específica a la temperatura de 20° C.	74
Tabla 16. Sistema de clasificación SUCS.	75
Tabla 17. Procedimiento la clasificación de suelo método de la AASHTO.	76
Tabla 18. Expansión del suelo.	79
Tabla 19. Valores de CBR.	80
Tabla 20. Nivel de contenido de materia Orgánica.	81
Tabla 21. Expansión del suelo con 3% de CCA.	84
Tabla 22. Valores de CBR para un contenido de 3% de CCA.	85
Tabla 23. Expansión del suelo con 10% de CCA.	85
Tabla 24. Valores de CBR para un contenido de 10% de CCA.	86
Tabla 25. Expansión del suelo con 15% de CCA.	86
Tabla 26. Valores de CBR para un contenido de 15% de CCA.	87
Tabla 27. Expansión del suelo con 20% de CCA.	87
Tabla 28. Valores de CBR para un contenido de 20% de CCA.	88
Tabla 29. Expansión del suelo con 25% de CCA.	88
Tabla 30. Valores de CBR para un contenido de 25% de CCA.	89
Tabla 31. Compactacion a diferentes % CCA.	89
Tabla 32. C.B.R. a diferentes %CCA.	91
Tabla 33. Valores de compactacion para contenidos de 3%, 10%, 15%, 20% y 25% de CCA.	93

LISTA DE FIGURAS

xi

Figura 1. Disposición Tetraédrica.....	7
Figura 2. Disposición Hexagonal.....	8
Figura 3. Disposición de una lámina aluminica.	8
Figura 4. Limpieza del arroz, residuo, la cascara de arroz.	12
Figura 5. Flujograma de obtención del arroz.	13
Figura 6. Cascara de arroz en estado natural.	22
Figura 7. Cascara de arroz parcialmente quemada.....	22
Figura 8. Ceniza reactiva color gris oscura a blanca.	23
Figura 9. Ceniza de cascara de arroz después de la combustión controlada con un cierto porcentaje de carbono recidual.	23
Figura 10. Horno de ladrillo para la calcinación de cáscara de arroz.	26
Figura 11. Calcinador de lecho fluido para cáscara de arroz.....	28
Figura 12. Partes de la sub-rasante.	33
Figura 13. Esquema de métodos de estabilización.	37
Figura 14. Selección del porcentaje óptimo de cal método de Eades y Gri.	44
Figura 15. Abaco para diseño de tratamiento de los suelos con cal a partir del índice de plasticidad y granulometría.	45
Figura 16. Característica de la ceniza de arroz en ignición.	52
Figura 17. Relación índice de actividad puzolánica y el tamaño de partícula.	54
Figura 18. Ubicación del lugar de la muestra a estudio.....	63
Figura 19. Extracción del Suelo.	63
Figura 20. Muestra para contenido de Humedad.	68
Figura 21. Ensayo de contenido de humedad.	68
Figura 22. Juego de Tamices serie gruesa y fina.	70
Figura 23. Máquina de Casagrande.	72
Figura 24. Ensayo de Peso Específico.....	74
Figura 25. Curva de compactación Suelo Natural.	78
Figura 26. Molde para la compactación.	79
Figura 27. Curva humedad-densidad seca-CBR.	80
Figura 28. Curva de compactación para 5% de cal, 3% CCA y 92% de suelo.	82
Figura 29. Curva de compactación para 5% de cal, 10% de CCA y 85% de suelo.	82
Figura 30. Curva de compactación para 5% de cal, 15% de CCA y 80% de suelo.	82
Figura 31. Curva de compactación para 5% de cal, 20% CCA y 75% de suelo.	83
Figura 32. Curva de compactación para 5% de cal, 25% de CCA y 70% de suelo.	84
Figura 33. Curva humedad-densidad seca-CBR, para 3% de CCA.	85
Figura 34. Curva humedad-densidad seca-CBR, para 10% de CCA.	86
Figura 35. Curva humedad-densidad seca-CBR, para 15% de CCA.	87
Figura 36. Curva humedad-densidad seca-CBR, para 20% de CCA.	88
Figura 37. Curva humedad-densidad seca-CBR, para 25% de CCA.	89

CAPÍTULO I

INTRODUCCION

1.1. Título.

ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS COMBINADOS CON CASCARA DE ARROZ y CAL.

1.2. Justificación General.

Debido a que los suelos arcillosos tienen baja capacidad de soporte y mala calidad debido a esas características casi no siempre cumplen con los requerimientos necesarios para ser empleados en proyectos viales.

Se necesita plantear nuevas alternativas que permitan el uso del suelo arcilloso para la construcción de proyectos viales. Una de las mejores soluciones es la estabilización, con la finalidad de mejorar las características mecánicas propias del material.

El funcionamiento a largo plazo de cualquier proyecto de construcción depende de la calidad de los suelos de subrasante, no todos los suelos son aptos para resistir una determinada carga. Los suelos inestables pueden crear problemas significativos en las estructuras civiles y pavimentos. Debe buscarse soluciones o alternativas que mejoren la propiedad del suelo a utilizar y que no encarezcan el costo de la obra a construirse, la mejor solución es la estabilización de suelos. Diversos países como la India, Uruguay, Nigeria y el Perú han realizado investigaciones acerca de las cenizas de cascara de arroz que puede ser usado como agente estabilizador ya que mejora las propiedades de suelos arcillosos.

Con el diseño y técnicas de construcción apropiados, el tratamiento con cenizas de cascara de arroz (granos compuestos básicamente por silicatos y aluminios) y la cal que transforma químicamente los suelos inestables en suelos estables para la construcción.

1.3. Fines.

Realizar la dosificación optima de Ceniza de cascara de arroz y Cal que se debe aplicar a suelos arcillosos para su estabilización, cumpliendo las normas y especificaciones técnicas necesarias para proyectos de ingeniería civil.

Preservar el cuidado del medio ambiente al utilizar el material natural (cascara de arroz) para su utilización, por el deterioro de nuestro planeta por la contaminación de la atmosfera y la no planeación de las industrias cementeras ha impulsado a utilizar en menor proporción la cal como un estabilizante junto con la ceniza de cascara de arroz.

Adición de la ceniza de cascara de arroz y la cal al suelo en mezcla produciéndose unos componentes cementantes en el suelo, lo cual produce un suelo físico-mecánicamente estable.

Hoy en día, existen múltiples usos que se pueden dar a la Puzolana (la ceniza de cascara de arroz es una puzolana artificial la cual también se la puede utilizar con la adición del cemento portland), si bien dentro de todos ellos destaca la fabricación de cemento Portland puzolánico. Las puzolanas pueden ser remplazadas de 15 a 40 por ciento del portland por ceniza de cascara de arroz, y hasta un 55 por ciento si es cemento puzolánico, sin reducir significativamente la resistencia.

1.4. Estado del Arte.

En los últimos años se han tenido diversas experiencias de estabilización de suelos usando residuos agrícolas o industriales, con la finalidad de reusarlos como agentes estabilizadores para mejorar las propiedades de los suelos, de tal forma que se pueda plantear una solución que tenga beneficios económicos y ambientales.

El motivo por cual varios países empezaron a utilizar la ceniza de cascara de arroz como un agente estabilizante, para mejorar sus suelos. Como, por ejemplo: La India, Uruguay, Nigeria y el Perú.

- Estabilización de suelos arcillosos con ceniza de cascara de arroz para el mejoramiento de subrasante, Lima – Perú. La tesis consistió en el desarrollo de un método alternativo para la estabilización de suelos arcillosos usando un residuo agrícola como la ceniza de cáscara de arroz para su utilización a nivel de subrasante en suelo de baja capacidad de soporte. La investigación inició con el estudio de las muestras las cuales fueron obtenidas del departamento de San Martín. Se procedió a realizar las mezclas suelo con ceniza de cáscara de arroz en diferentes porcentajes para evaluar su comportamiento geotécnico como estabilizador primario. Además, se realizaron combinaciones de suelo arcilloso, ceniza de cáscara de arroz y cal para poder incrementar las mejoras de sus propiedades y poder conocer si las cenizas de cáscara de arroz funcionan como agente estabilizador secundario.

- Los resultados obtenidos muestran una mejora debido la presencia de ceniza de cáscara de arroz. Las combinaciones de suelo arcilloso, ceniza de cáscara de arroz y cal lograron mayores ventajas que las combinaciones de suelo arcilloso y ceniza de cáscara de arroz. Se logró incrementar el valor de soporte de california (CBR) de un valor de 5% hasta 19,4% realizando combinaciones de suelo arcilloso y ceniza de cáscara de arroz, teniendo la mezcla un 20% de ceniza de cáscara de arroz. No obstante, el incremento del valor de soporte de california (CBR) para las combinaciones de suelo arcilloso, ceniza de cáscara de arroz y cal lograron incrementar de 5% hasta 38,5% con un 20% de contenido de ceniza de cáscara de arroz.
- Leonardo Behak y Washington Peres Núñez (2008) realizaron una investigación de un suelo arenoso proveniente de Montevideo, Uruguay, estabilizándolo con ceniza de cáscara de arroz y cal para el uso en pavimentos. La ceniza de cáscara de arroz utilizada en la investigación presentaba un color negro, debido a que la temperatura de quema no es controlada. Para las humedades óptimas de compactación, el valor de CBR del suelo fue 9% y el de la mezcla suelo más 20% de ceniza de cáscara de arroz más 10% de Cal fue de 25%, es decir, se observó un aumento de 2,8 veces en el CBR de la mezcla con relación al del suelo.
- Musa Alhassan (2008) investigó el uso de ceniza de cáscara de arroz para un suelo de Maikunkela en Nigeria, el cual de acuerdo a una

clasificación AASHTO, se trataba de un A-7-6 (20) y para la clasificación SUCS era de un suelo arcilloso altamente plástico. El desempeño del suelo junto a las cenizas mostró una disminución en la máxima densidad seca y un aumento en el óptimo contenido de humedad. Adicionalmente mejoró el CBR y la resistencia a la compresión no confinada, donde se observó que estas mejoras eran cuando se aplicaban entre un 6 a 8% de ceniza de cáscara de arroz. El resultado del valor de CBR se incrementó en condiciones saturadas de un valor de 5.5% hasta un 15% y para condiciones seca se logró un incremento de 8,5% hasta 18,5%.

- Dr. Brooks (2009) realizó una investigación en Estados Unidos de un suelo expansivo estabilizándolo con una mezcla de ceniza de cáscara de arroz y ceniza volante en un esfuerzo de adaptarlo como material de construcción. De acuerdo a su investigación la combinación óptima para obtener el mayor CBR debía contener un 12% de ceniza de cáscara con ceniza volante 25%, logrando incrementar el CBR de 1,5 a 10 y la resistencia a la compresión no confinada aumentando en un 97%.

1.5. Objetivo General.

Realizar el análisis comparativo de la estabilización de suelos arcillosos combinados con ceniza de cascara de arroz y cal para su empleo a sub rasante.

1.6. Objetivos Específicos.

- Determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo arcilloso en estado natural.

- Analizar el comportamiento del suelo arcilloso con diferentes porcentajes de adición de ceniza de cascara de arroz, manteniendo un porcentaje constante de cal del 5%.
- Determinar la dosificación óptima con diferentes porcentajes de ceniza de cascara de arroz, manteniendo un porcentaje constante de cal del 5%, mediante ensayos de CBR.
- Realizar el análisis comparativo de las propiedades físico-mecánicas del suelo arcillo natural y el suelo arcilloso combinado con diferentes porcentajes ceniza de cascara de arroz, manteniendo un porcentaje constante de cal del 5%.

1.7. Alcance.

Determinar las ventajas de estabilizar suelos arcillosos con ceniza de cascara de arroz y cal, debido a la dosificación óptima encontrada.

- Determinar las propiedades físico-mecánicas del suelo estabilizado.
- Tener un aprovechamiento óptimo de los suelos de Cota Cota que no cuenta con las propiedades físico-mecánicas para el empleo de obras viales.
- Preservar el cuidado del medio ambiente, la cascara de arroz es un desecho del proceso de pelado cuya producción se hace presente en las grandes productoras de arroz y representa una fuente de contaminación ambiental y genera problemas sociales por el almacenamiento inadecuado, por lo que actualmente es considerado como un material de desecho.

CAPÍTULO II MARCO TEORICO

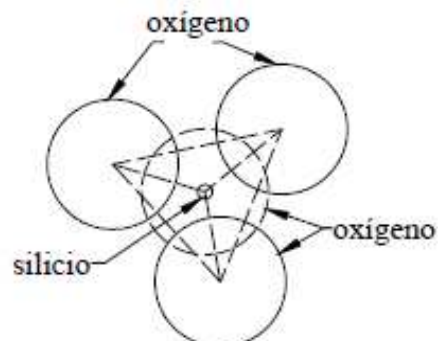
2.1. Suelo Arcilloso.

2.1.1. Definición.

El suelo arcilloso es aquel en el que predomina la arcilla sobre otras partículas de otros tamaños. La arcilla es un conjunto de partículas minerales muy pequeñas, de menos de 0,001 mm. de diámetro, en contraposición a otras partículas más grandes como son el limo y la arena, por orden de tamaño, de menor a mayor. La arcilla se define como aquel sedimento o depósito mineral constituido principalmente de silicato de aluminos hidratados y se caracteriza por adquirir plasticidad cuando es mezclada con el agua.

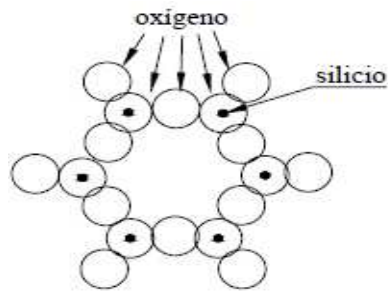
Los átomos de las arcillas están dispuestos en formas de láminas. Existen dos variedades de dicha disposición: la silícica y la alúmina. La lámina silícica formada por un átomo de silicio y tres átomos de oxígeno formando un tetraedro (como se aprecia en la figura 1), estos átomos se agrupan en formas hexagonales, repitiéndose indefinidamente constituyendo una red laminar (como se aprecia en la figura 2).

Figura 1. Disposición Tetraédrica



Fuente: internet

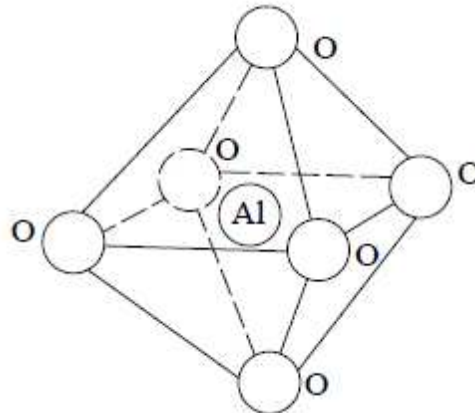
Figura 2. Disposición Hexagonal



Fuente: internet

Para la lámina aluminica, formada por un átomo de aluminio, enlazada con seis átomos de oxígeno formando un octaedro (como se aprecia en la figura 3). Estos se agrupan a través de un átomo de oxígeno constituyendo una reticular laminar.

Figura 3. Disposición de una lámina aluminica.



Fuente: internet.

2.1.2. Clasificación de las Arcillas.

Las características de las formas cristalinas son el factor más influyente sobre las propiedades físicas de una arcilla, los principales minerales son:

- **Caolinitas**: Estas arcillas son muy estables debido a la estructura inexpandible. Se forman por superposición indefinida de láminas aluminicas

y silícicas, la unión entre partículas es muy fuerte de tal modo que se opone al ingreso de moléculas de agua entre ellas.

• Illitas: La arcilla presenta cierta fricción interna. Se forman por las superposiciones indefinidas de una lámina aluminica entre dos silícicas, en su constitución interna se forman grumos de material que ocasionan una reducción del área expuesta al agua, lo que limita su propiedad de expandirse.

• Montmorillonitas: La arcilla posee una estructura similar a la de las ilíticas, sin embargo, la unión es mucho más débil, por lo que resulta ser inestable, especialmente ante la presencia de agua. Las moléculas de aguas se insertan con facilidad en la estructura de la arcilla, lo que ocasiona un aumento en el volumen de los cristales que se traduce en una expansión del suelo.

2.1.3. *Características físicas y químicas.*

Las características más importantes de las arcillas radican en sus propiedades físico-químicas, las cuales dependen principalmente de:

- Su tamaño de partículas
- Su morfología laminar
- Sustituciones isomórficas, el cual origina la aparición de cargas en las láminas y presencia de cationes ligados en el espacio interlaminar.

A continuación, se explicará algunas propiedades principales que poseen las arcillas:

a) Plasticidad

La plasticidad es la principal característica de los suelos arcillosos. La propiedad es causada por el agua que forma una envoltura sobre las partículas laminares generando un efecto lubricante, esto puede causar un deslizamiento cuando haya esfuerzos generados por una carga. Propiedad que depende de la morfología laminar y tamaño de partícula. La plasticidad puede ser cuantificada mediante los límites de Atterberg.

b) Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las montmorillonitas. El grado de hidratación está relacionado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

El hinchamiento es originado por la absorción del agua, el cual ingresa en los espacios interlaminares separando las láminas. Cuando el agua penetra y las láminas se separan, se originan fuerzas electrostáticas de repulsión entre las láminas, lo que contribuye al proceso de hinchamiento llegando a separar completamente unas láminas de otras.

c) Superficie específica.

Las arcillas poseen una elevada superficie específica. La cual se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna de las partículas por unidad de masa.

d) Tixotropía.

Es el fenómeno que consiste en la pérdida de resistencia al ser amasado y su recuperación con el tiempo. Las arcillas tixotrópicas llegan a convertirse en líquido cuando son amasadas. No obstante, cuando se les deja en reposo recuperará su cohesión. Este fenómeno se da cuando el contenido de agua del suelo arcilloso está cerca de su límite líquido y en el caso que el contenido de agua se encuentre en su límite plástico no existirá posibilidad de comportamiento tixotrópico.

e) Capacidad de absorción.

La propiedad de algunas arcillas está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad), la absorción de moléculas se almacena en los espacios interlaminares de las arcillas. La absorción (se trata de procesos físicos como la retención por capilaridad) difícilmente se da en forma aislada con la adsorción (se da por la interacción del tipo químico entre el adsorbente, como la arcilla, y el líquido adsorbido, denominado adsorbato).

f) Capacidad de intercambio catiónico.

Es un fenómeno reversible y se define como la capacidad de cambiar iones fijados en la superficie exterior de los cristales, en los espacios interlaminares u otros espacios interiores de las arcillas por otros que se encuentran en soluciones acuosas envolventes.

Debido a esta característica, las propiedades mecánicas pueden variar al modificar la cantidad de cationes ligados, generando una variación en espesores de película superficial, el cual se ve reflejado en las propiedades de plasticidad y resistencia del suelo.

La capacidad de intercambio catiónico crece con el grado de acidez, es decir, si el pH es menor, la actividad de intercambio catiónico será mayor. A su vez, también genera un aumento en la velocidad y concentración de la solución que circula a través del suelo.

2.2. Cascara de Arroz.

2.2.1. Definición.

La cáscara de arroz, también denominada pajilla, se obtiene del proceso de pelado, en el cual la cáscara se separa del grano haciendo pasar el arroz entre rodillos, luego de una operación previa de limpieza, como se observa en la figura 4.

Figura 4. Limpieza del arroz, residuo, la cascara de arroz.



Fuente: Elaboración propia, Peladora de arroz, Caranavi.

La cáscara de arroz posee una superficie áspera y abrasiva, es muy resistente a la degradación natural y debido a su bajo contenido de proteínas no es apropiada para forraje de animales, hechos que dificulta su aprovechamiento económico.

2.2.2. Proceso de obtención.

En el proceso, se remueve el grano cosechado y seco, las cáscaras, tegumentos para producir arroz pulido o blanco con un mínimo de grano quebrado y de impureza final. El proceso pasa por las siguientes etapas como se muestra en la figura 5.

Figura 5. Flujograma de obtención del arroz.



Fuente: Elaboración Propia

➤ Recepción

El arroz llega de los lugares de cultivo donde se produce el arroz, en sacos de yute de 50kg.

➤ Inspección

Se procede a realizar el control de humedad y el porcentaje de impureza.

➤ Secado

El secado es un proceso importante que requiere de un tiempo. Cuando el secado es lento, provoca la aparición de microorganismo por el contenido de humedad y por el otro lado cuando el secado es muy rápido se corre el riesgo que el grano de arroz sufra daños por el excesivo calor. El secado se puede realizar en el campo, pero no es conveniente ya que los granos sufren resquebraduras o agrietamientos, lo que trae en el proceso de pilado un alto porcentaje de “ñelen” o granos quebrados. Es más conveniente el secado artificial con aire caliente. Las máquinas secadoras generan calor proveniente de un horno a combustión, la cantidad de calor depende de la humedad del arroz.

➤ Almacenaje.

Para el almacenaje del arroz debemos mantenerlo en condiciones de temperatura (17°C a 18°C) y humedad (Humedad relativa entre 65% a

70%) recomendadas. Esto preverá la degradación del grano y lograr un periodo de almacenamiento más largo.

➤ Descascarado (en peladora).

Pasado por un proceso de limpieza previo, el arroz en cáscara sin impurezas es llevado mediante elevadores a la máquina peladora. La peladora da lugar a: arroz con cáscara, sin cáscara, a medio descascarar, cáscara, granos partidos.

➤ Separación.

El proceso se separa el grano en 3 grupos: paddy (arroz con cáscara), paddy con grano morenos y grano descascarado moreno. El primero regresa al proceso de descascarado y el tercero pasa a la pulidora.

➤ Blanqueado y pulido.

En el proceso de pulido se remueve el arroz moreno de los tegumentos (capa fina grasos de color gris plata a veces rojo), el embrión del arroz y partículas de harina que quedan adheridas al grano, para darle un aspecto liso y brillante.

➤ Clasificación de producto terminado.

El proceso sirve para separar y seleccionar los granos quebrados de los granos enteros los cuales pasan por ciertas etapas, una vez seleccionadas quedando listo para el respectivo almacenaje y posteriormente su venta.

➤ Ensacado y almacenaje.

El arroz pelado ya lista para su distribución, la cual se comercializa en yutes de 50kg. La capacidad dependerá del comerciante o el productor.

2.2.3. *Características de la cascara de arroz.*

Las cáscaras de arroz varían de acuerdo a la especie, su longitud se encuentra en un rango de 5 a 11 mm, es una estructura ondulada y apariencia superficial irregular.

La cáscara de arroz es de consistencia quebradiza, abrasiva y su color varía del pardo rojizo a la púrpura oscura. Su densidad es baja, por lo cual al apilarse ocupa grandes espacios. El peso específico es de 125 kg/ m³. Su estructura presenta un volumen poroso del 54%, cavidades que permanecerán cerradas en tanto no se someta a un proceso de combustión. Presenta un coeficiente de conductividad térmica (0.0330 W/m k) permitiendo ser usado como aislante térmico. Por el alto contenido de sílice (20%) la ceniza de cáscara de arroz es de muy baja biodegradabilidad en condiciones de ambiente natural.

Las propiedades químicas de la cáscara de arroz dependen mucho del tipo de arroz del cual procedan. A continuación, se muestra la Tabla 1, donde se aprecia los componentes de la cáscara de arroz de un estudio realizado por Varón.¹

¹ C. J. (2005).

Tabla 1. Composición química de la cascara de arroz.

CASCARA DE ARROZ	
COMPONENTES	%
Carbono	39.1
Hidrogeno	5.2
Nitrógeno	0.6
Oxigeno	37.2
Azufre	0.7
Cenizas	17.8

Fuente Varon C.J. (20050)

2.3. Ceniza de Cascara de Arroz.

2.3.1. Quema de la Cascara de Arroz.

La quema de la cascara de arroz nos da, el residuo de calcinación de cascara de arroz; para hacerla altamente puzolánica es necesario tener el control en la quema de la misma. La temperatura no debe pasar de 700 grados centígrados, si no la sílice se cristaliza y pierde su grado de reactividad. Sin embargo, solo la sílice amorfa (no cristalina) posee estas propiedades, razón por que la temperatura y duración de la combustión son importantes en la producción de la ceniza de cascara de arroz (RHA).

2.3.2. Características de la ceniza de cascara de arroz.

Actividad puzolánica: la actividad puzolánica o propiedad puzolánica consiste en la capacidad de la adición para combinarse con el hidróxido de calcio producido durante la hidratación del Clinker de cemento Portland,

formando compuestos que son también cementantes. Aquí radica una de sus principales características: una adición (o puzolana) necesita de la presencia del hidróxido de calcio (es decir de Clinker de cemento hidratado), para desarrollar sus propiedades cementantes; por sí sola no puede desarrollar esa actividad puzolánica o lo hará a unas velocidades irrelevantes desde el punto de vista práctico.

La mayoría tienen como característica tener un alto de contenido de sílice (SiO_2) y una estructura interna vítrea amorfa (cristales en desorden, en contraste con la cristalina donde los cristales se encuentran en orden), como también estar finalmente molidos, lo que les confiere una superficie específica.

2.3.3. *Propiedades de la Ceniza de Cascara de Arroz.*

La cascara de arroz ha demostrado tener la potencialidad máxima por las siguientes razones:

- Es disponible en grandes cantidades en varias partes del mundo.
- Cuando la cascara de arroz es quemada produce bastante ceniza (una tonelada por cinco de cascara de arroz).
- Típicamente contiene un 90 por ciento de sílice que hace que sea una excelente puzolana. La composición química promedio de la cascara de arroz se muestra en la tabla 2.²

² MEHTA P.K.

Tabla 2. Composición química.

Componente	Formula	Composición (en porcentaje)
Celulosa: Polímero de Glucosa	$C_5H_{10}O_5$	50
Lignina: Polímero de Fenol	$C_7H_{10}O_3$	30
Sílice: Componente primario de la ceniza	SiO_2	20

Fuente: Mehta, P.K.

La lignina y la celulosa presentes en la cáscara de arroz pueden ser eliminadas por combustión controlada. El alto contenido de ceniza y lignina presente en la cáscara la descalifica para hacer productos de celulosa.

Se cree que la sílice en la cáscara de arroz existe en forma opalina (una forma amorfa e hidratada de sílice). Aparentemente la sílice es tomada del suelo y es transportada a la planta de arroz como ácido mono silícico, el cual llega a concentrarse en la cáscara por evaporación y finalmente polimeriza a la forma de membrana sílico-celulosa. Las características físicas de la cáscara de arroz se presentan en la tabla 3.

Tabla 3. Características físicas de la cáscara de arroz.

Características	g/cm^3
Densidad Real	0.870
Densidad Global sin compactar	0.108
Densidad Global compactado	0.143

Fuente: GONZALES DE LA COTERA, M. VÁSQUEZ Rosaura, *Las cenizas de cáscara de arroz, adición puzolánica en cemento y concreto*. p. 4.

Aproximadamente la constitución de la ceniza de cáscara de arroz es un 20% en peso de la cáscara de la cual fue quemada (Juliano, 1985).

Cuando las cáscaras de arroz son quemadas en hornos las cenizas contienen un gran porcentaje de sílice superior a 90% y cuando son quemadas en pampa o a campo abierto las cenizas estarán compuestas mayormente por sílice cristalina menos reactiva (tales como cristobalita y tridimita) las cuales tienen que ser llevados a tamaños pequeños para que puedan mejorar su actividad puzolánica. Las cenizas de cáscara de arroz además de tener sílice presentan impurezas las cuales son: calcio, potasio, magnesio, hierro, fósforo, y boro. Para la producción de las cenizas de cáscara de arroz se deberá tratar la cáscara de arroz, ya que debe ser calcinada a temperaturas adecuadas para poder formar sílices amorfas los cuales son más reactivos. Las características físicas principales de la ceniza de cáscara de arroz son mostradas en la tabla 4, los cuales fueron tomadas en base a la investigación³.

Tabla 4: Propiedades de la cascara de arroz.

Propiedades	Valor
Densidad (kg/m^3)	2265
Masa unitaria compactada (kg/m^3)	452
Masa unitaria suelta (kg/m^3)	181
Superficie específica (m^2/kg)	2000

Fuente: "Peña Sterling & Zambrano García, 2001"

³ Peña S y Zambrano G. (2001).

Con respecto a las características químicas de la ceniza de cáscara de arroz contiene un 90 por ciento de sílice, lo que hace que sea una excelente puzolana⁴. indica que la ceniza está compuesta entre 90 a 96% de sílice. La composición química de la ceniza de cáscara de arroz es mostrada en la tabla 5⁵.

Tabla 5 : Composición química de la ceniza de cascara de arroz.

Ceniza de Cascara de Arroz		
Componente		%
Ceniza de Sílice (SiO_2)		94.1
Oxido de Calcio	(CaO)	0.55
Oxido de Magnesio	(MgO)	0.95
Oxido de Potasio	(K_2O)	2.1
Oxido de Sodio (Na_2O)		0.11
Sulfato		0.06
Cloro		0.05
Oxido de Titanio	(TiO_2)	0.05
Oxido de Aluminio	(Al_2O_3)	0.12
Otros Componentes		1.82

Fuente: Jiménez Montero & Egeuz Alava (2001)

2.3.4. *Etapas de la quema de la cascara de arroz.*

La cascara de arroz en forma natural como se observa en la figura 6, luego de la combustión puede tener como resultado, cenizas totalmente quemada, puede ser gris, morada o blanca, dependiendo de las impurezas presentes y las condiciones de combustión.

⁴ La investigación de Juliano (1985)

⁵ Jiménez Montero & Egeuz Alava (2001).

Figura 6. Cascara de arroz en estado natural.



Fuente: Elaboración propia

En la quema al aire libre o en ambientes de combustión no controlada, las cenizas se mantendrán en su mayoría no reactivas debido a la composición mineralógica desfavorable.

La ceniza de cascara de arroz parcialmente quemada contiene carbono, y por lo tanto es negra. Si se utiliza en grandes cantidades, se puede convertir concreto casi negro, como se observa en la figura 7.

Figura 7. Cascara de arroz parcialmente quemada.



Fuente: Elaboración propia

La ceniza reactiva es de color gris oscura a blanca, como se observa en la figura 8, dependiendo del carbón residual en ella, que no tiene efecto negativo si es menor de 10 por ciento, como se observa en la figura 9.

Figura 8. Ceniza reactiva color gris oscura a blanca.



Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Ceniza de cascara de arroz después de la combustión controlada con un cierto porcentaje de carbono residual.



Fuente: Elaboración propia

Para mejorar su reactividad, la ceniza puede ser pulverizada en un molino de bolas por aproximadamente una hora, o más si contiene sílice

cristalina. La ceniza puede reemplazar hasta 30 por ciento del cemento en un concreto.

Alternativamente, puede ser mezclada con 30 a 50 por ciento de cal hidratada para ser empleada como cemento en morteros, enlucidos y concreto en masa.

2.3.5. *Métodos de Elaboración de la quema de la cascara de arroz.*

Los diferentes estudios experimentales han mostrado que cuando la temperatura de calcinación de la cáscara de arroz es baja y la duración de la exposición a temperatura se mantiene en un tiempo relativamente corto, la sílice en las cenizas retenidas muestra un carácter amorfo, como se muestra en la tabla 6.

Además, los materiales que contienen partículas de sílice en la fase no cristalina, no se consideran un peligro para la salud. Con el aumento de la temperatura de combustión y tiempo, la sílice en RHA se transforma en formas cristalinas, como la cristobalita y tridimita. La ceniza que consiste principalmente de sílice cristalina muestra mucha menos actividad puzolánica, y también se considera peligroso para la salud humana. Los parámetros de la quema se muestran en la tabla 6.

La ceniza de cascara de arroz puede ser obtenida a través de diferentes técnicas de calcinación, las cuales son:

- Calcinación a campo abierto (o en pilas).
- Calcinación en hornos (circulares o cuadrados).
- Calcinación en lecho fluido.

A continuación, se describe brevemente cada una de las técnicas de calcinación señaladas:

Tabla 6. Efecto de las condiciones de combustión que presenta la ceniza de cáscara de arroz.

Temperatura de combustión	Tiempo de Combustión	Propiedades de entorno	Propiedades de la ceniza	
			Cristalización	Área superficial m ² /s
500 - 600	1 min	moderadamente oxidante	no cristalina	122
500 - 600	30 min	moderadamente oxidante	no cristalina	97
500 - 600	2 hr	moderadamente oxidante	no cristalina	76
700 - 800	15 min - 1hr	moderadamente oxidante	no cristalina	100
700 - 800	15 min - 1hr	altamente oxidante	parcialmente cristalina	6-oct
> 800	> 1 h	altamente oxidante	cristalina	< 5

Fuente: Mehta, P.K.

➤ Calcinación a campo abierto (o en pilas)

La calcinación a campo abierto se realiza en recintos circulares de ladrillo de hasta 16 metros de diámetro, con pilas de 2,5 metros de altura. La cáscara calcinada es extraída cada cierto tiempo obteniéndose una ceniza de color blanco a blanco-negro.

Durante la técnica de calcinación la temperatura no puede ser controlada. Asimismo, debido a la alta temperatura alcanzada y a la formación resultante de estructuras silíceas altamente cristalinas (cristobalita y

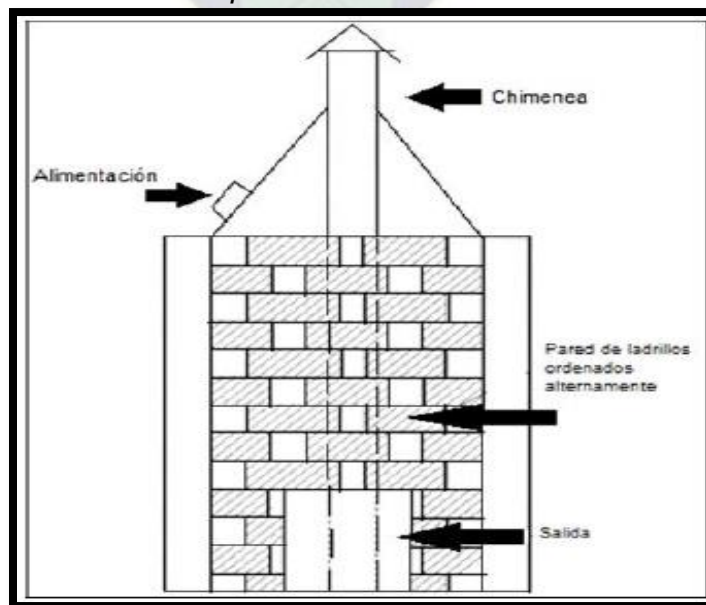
tridimita), la calcinación a campo abierto es asociada con puzolanas de bajo índice de reactividad.

➤ Calcinación en hornos (circulares o cuadrados)

Técnica ha sido utilizada en plantas piloto e industriales en la India, Pakistán y Nepal. Los hornos tienen paredes de ladrillos los cuales se disponen alternadamente de tal manera que se permita el acceso del aire hacia el interior. La chimenea se extiende hasta la base del horno y está elaborada con una malla fina de alambre que permite que el aire fluya y evita el ingreso de ceniza.

Asimismo, las paredes interiores están revestidas con una malla de alambre con la finalidad de retener la cáscara, la cual se carga por la cubierta del horno y se descarga por la base, como se muestra en la figura 10.

Figura 10. Horno de ladrillo para la calcinación de cáscara de arroz.



Fuente: Página de Internet

Técnica de calcinación produce una ceniza de color blanco, altamente activa, de naturaleza amorfa y con presencia minoritaria de cuarzo cristalino.

➤ Calcinación en lecho fluido

La cámara de combustión es de acero inoxidable y para el lecho fluidizado (partículas no combustibles) se emplea arena con tamaño de partícula de 297 a 590 micras. El aire es suministrado a través de un plato perforado ubicado en la base de la cámara de combustión.

El lecho fluido es precalentado a 500 grados centígrados por medio de un dispositivo eléctrico y posteriormente se inicia la alimentación de la cáscara a través de un alimentador de tornillo.

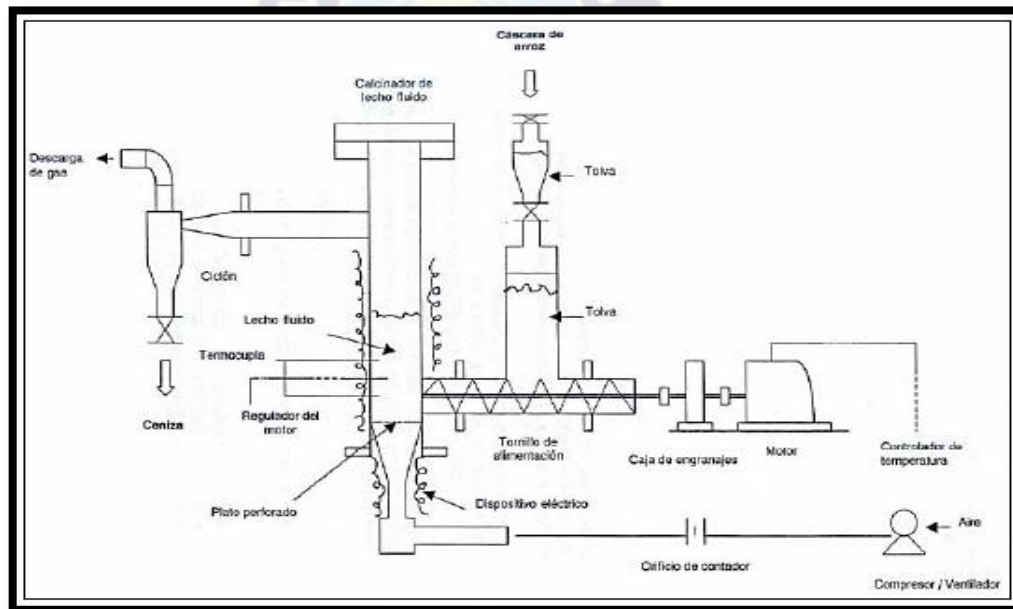
Una vez obtenida la ceniza cesa el calentamiento por medio del dispositivo eléctrico. La temperatura de combustión que es monitoreada en el lecho fluido se controla mediante la velocidad de alimentación de la cáscara de arroz.

El suministro de aire se fija a una velocidad de 15 centímetros sobre segundo. El tiempo de retención de la ceniza en la cámara de combustión es de sólo unos pocos segundos y posteriormente ésta es colectada a través de un ciclón, en la figura 11, se muestra el esquema de un horno de lecho fluido.

La calcinación controlada de la cáscara de arroz por el medio calcinador proporciona una ceniza consistente en sílice amorfa con un alto contenido

de SiO₂ y una elevada área superficial. La actividad puzolánica de la ceniza es excelente y proporciona una buena resistencia a la compresión. Por otra parte, la cáscara de arroz representa una fuente valiosa de energía. El valor energético de la cáscara de arroz es aproximadamente 14 Mega Jouls sobre kilogramo lo cual significa que una tonelada de cáscara de arroz es equivalente a 0,5 toneladas de carbón o 0,35 toneladas de petróleo.

Figura 11. Calcinador de lecho fluido para cáscara de arroz.



Fuente: Página de Internet

La sílice en las cenizas de cáscara de arroz puede ser amorfa o cristalina, dependiendo de la forma en que se quema y se enfría. Si la ceniza se forma en la quema al aire libre o en ambientes de combustión no controlada, mantendrá una gran proporción de sílice reactiva en forma de cristobalita y tridimita, y requeriría una molienda fina para desarrollar la actividad

puzolánica⁶. Los estudios han demostrado que la quema de cáscara de arroz a 600 grados centígrados produce una ceniza con la composición óptima de material puzolánico (Mazlum y Uyan, 1992). Mehta (1986) estima que cada tonelada de cáscara de arroz produce 40 kilogramos de ceniza de cáscara de arroz

2.4. La Cal.

La cal (también llamada cal viva), es una sustancia alcalina constituida por calcio (CaO), de color blanco o blanco grisáceo, que al contacto del agua se hidrata o apaga, con desprendimiento de calor, y mezclada con arena forma una argamasa o mortero de cal.

Se obtiene como resultado de la calcinación de las rocas calizas o dolomías. La cal se ha usado desde la más remota antigüedad como conglomerante en la construcción, también para pintar muros y fachadas de los edificios construidos con adobes o tapial.

La cal es un elemento caustico, blando en estado puro, que proviene de la calcinación de la piedra caliza. La cal común es el óxido de calcio CaO (también conocido como cal viva) y es un material muy utilizado en construcción. Como producto comercial, normalmente contiene también oxido de magnesio, oxido de silicio y pequeñas cantidades de óxidos de aluminio y hierro. Existen dos formas en las cuales podemos encontrar la cal: cal viva (CaO) y la cal hidratada o apagada (Ca (OH)₂).

⁶ Metha, 1986.

La cal se obtiene mediante los siguientes pasos:

- Extracción: mediante perforación según un plan de minado diseñado, cargando después los explosivos para el tumbado, se carga el material ya fragmentado y se transporta al sistema triturador.
- Trituración: los fragmentos de roca se reducen de tamaño tamizándolos, ya homogéneos, se transportan mediante bandas hacia los hornos; para rotarlos se requieren tamaños pequeños.
- Calcinación: la cal se produce por cocción de las rocas calizas o dolomíticas mediante flujos de aire caliente que circula en los huecos o poros de los fragmentos rocosos; las rocas pierden dióxido de carbono produciéndose el óxido de calcio. Debido a su tamaño y forma homogénea de los fragmentos, la cocción ocurre de la periferia hasta el centro quedando perfectamente calcinada la roca.
- Enfriamiento: posteriormente se somete a un proceso de enfriamiento para que la cal pueda ser manejada y los gases calientes regresen al horno como aire secundario.
- Inspección: el proceso siguiente es la inspección cuidadosa de muestras para evitar núcleos o piezas de roca sin calcinar.
- Cribado: se somete a cribado separando a la cal viva en trozos y segmentos de la porción que pasara por un proceso de trituración y pulverización.

- Trituración y pulverización: Se realiza con el objeto de reducir más el tamaño y así obtener cal viva molida y pulverizada, la cual se separa de la que será enviada al proceso de hidratación.
- Hidratación: consiste en agregar agua a la cal viva para obtener la cal hidratada. A la cal viva dolomítica y alta en calcio se le agrega agua y es sometida a un separador de residuos para obtener cal hidratada normal dolomítica y alta en calcio. Únicamente la cal viva dolomítica pasa por un hidratador a presión y posteriormente a molienda para obtener cal dolomítica hidratada a presión.
- Envase y embarque: la cal es llevada a una tolva de envase e introducida en sacos y transportada a través de bandas hasta el medio de transporte que las llevara al cliente.

Para la estabilización de suelos generalmente se usa la cal hidratada. La cal sola o en combinación con otros materiales dan al suelo una mayor capacidad de soporte y baja su contenido de humedad debido a que se forma una reacción exotérmica.

La cal puede ser utilizada en varios grados o cantidades para estabilizar el suelo, una mínima cantidad sirve para secar y modificar temporalmente el suelo.

Un mayor grado de tratamiento producen la estabilización estructural permanente del suelo, esto debe estar respaldado técnicamente y con un estricto proceso de construcción.

Desde la antigüedad, el uso más frecuente de cal ha sido como aglomerante en

la construcción. Al mezclar cal con agua y arena se produce una especie de mortero que se utiliza para pegar ladrillos, piedras y también para aplanar paredes y techos. El uso se debe principalmente a que la cal puede adquirir mucha dureza al secarse y puede ser un material muy resistente. Eso se produce debido a que la cal apagada absorbe el dióxido de carbono que había perdido y se convierte lentamente en carbonato de calcio al secarse.

2.5. Sub-Rasante.

La sub-rasante es el suelo que esta aproximadamente a un metro por debajo de la capa de pavimento, esto también incluye el material de relleno que reemplaza completa o parcialmente el terreno natural inapropiado para la construcción de caminos por suelos estabilizados tratados con cal o cemento. Las características generales que debe presentar el material para su uso en carreteras según la norma de la “Administradora Boliviana de Carreteras” se resume en la tabla 7.

Tabla 7: Parámetros generales para uso de suelos.

	Limite Liquido	Índice de Plasticidad
Subbase	Máximo 35	Máximo 8
Base Estabilizada	Máximo 35	Máximo 6
Carpeta de Rodadura	Máximo 35	5 – 10

Fuente: Página de Internet

Y las características mecánicas que deben cumplir los materiales también para su uso en carreteras, se resume en la siguiente tabla 8:

Tabla 8: Características generales para uso de suelos.

	Valor "CBR"
Subbase	≥ 40 %
Base Estabilizada	≥ 80 %
Carpeta de Rodadura	≥ 60 %

Fuente: Página de Internet

Las principales funciones de la capa subrasante son:

- Recibir y resistir las cargas del tránsito que le son transmitidas por el pavimento
- Transmitir y distribuir de modo adecuado las cargas del tránsito al cuerpo del terraplén las cuales se muestran en la figura 12:

Figura 12. Partes de la sub-rasante.



Fuente: internet.

El funcionamiento a largo plazo de cualquier proyecto de construcción depende principalmente de los suelos subyacentes. Los suelos inestables (arcilloso limoso) pueden crear problemas si no se realiza un tratamiento previo para su estabilización.

El tratamiento con cal transforma químicamente los suelos inestables en materiales utilizables tanto para edificaciones o proyectos viales.

2.6. Valor Soporte de California (CBR) ASTM D – 1883.

Gracias al ensayo se determina las propiedades expansivas del suelo y la relación resistencia penetración mediante el empleo de muestras compactadas al contenido óptimo de humedad determinado en el ensayo Proctor estándar. Para una estructura vial el comportamiento mecánico del suelo es el factor de mayor importancia, y debe ser una estructura resistente.

El método se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de suelos de subrasante, así también de materiales empleados en la construcción de subbases, bases y capas de rodadura granulares.

La capacidad portante de un suelo se define como la carga que puede soportar sin que se produzcan asentamientos excesivos, se lo determina mediante el índice CBR (California Bearing Ratio), nombrado así por ser aplicado por primera vez en el estado de California), realizado a suelos compactados en laboratorio con la humedad óptima y niveles de energía variable. Ensayo normalizado consiste en un procedimiento de hinchamiento y penetración.

El hinchamiento es un procedimiento en el que se sumerge la muestra en agua durante 4 días con una sobrecarga equivalente a la real aplicada en una carretera. Se realizan dos lecturas una inicial y otra final mediante un equipo calibrado. El hinchamiento es importante en suelos arcillosos por llegar a producir asentamientos diferenciales de importancia.

El objetivo del ensayo es establecer una relación entre el comportamiento de los suelos principalmente utilizados como bases y sub rasantes bajo el pavimento en

carreteras y autopistas, determinando la relación entre el valor de CBR y la densidad seca que se alcanza en el campo. El ensayo de CBR mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. La norma que guía el ensayo es la “ASTM D-1883”.

Se aplica para la evaluación de la calidad relativa de suelos de sub rasante, algunos materiales de subbase y base granular, que contengan solamente una pequeña cantidad de material que pasa por el tamiz de 50 [mm] y que es retenido en el tamiz de 20 [mm].

El ensayo puede realizarse tanto en laboratorio como en sitio, aunque éste último no es muy práctico.

2.7. Estabilización del Suelo.

2.7.1. Concepto de Estabilización.

La estabilización de suelos se define como el mejoramiento de las propiedades físicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos. La estabilización de un suelo es el proceso mediante el cual, se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que se pueda aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose una capa de asiento firme, estable y durable. Que sea capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severo y por ende aseguren geotécnicamente el comportamiento de la explanada. La estabilización del suelo también es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno o bien, disminuir su

índice de plasticidad. Las tres formas de lograrlo son: estabilización física, estabilización química y estabilización mecánica.

Los criterios que se deben tener para realizar una estabilización son:

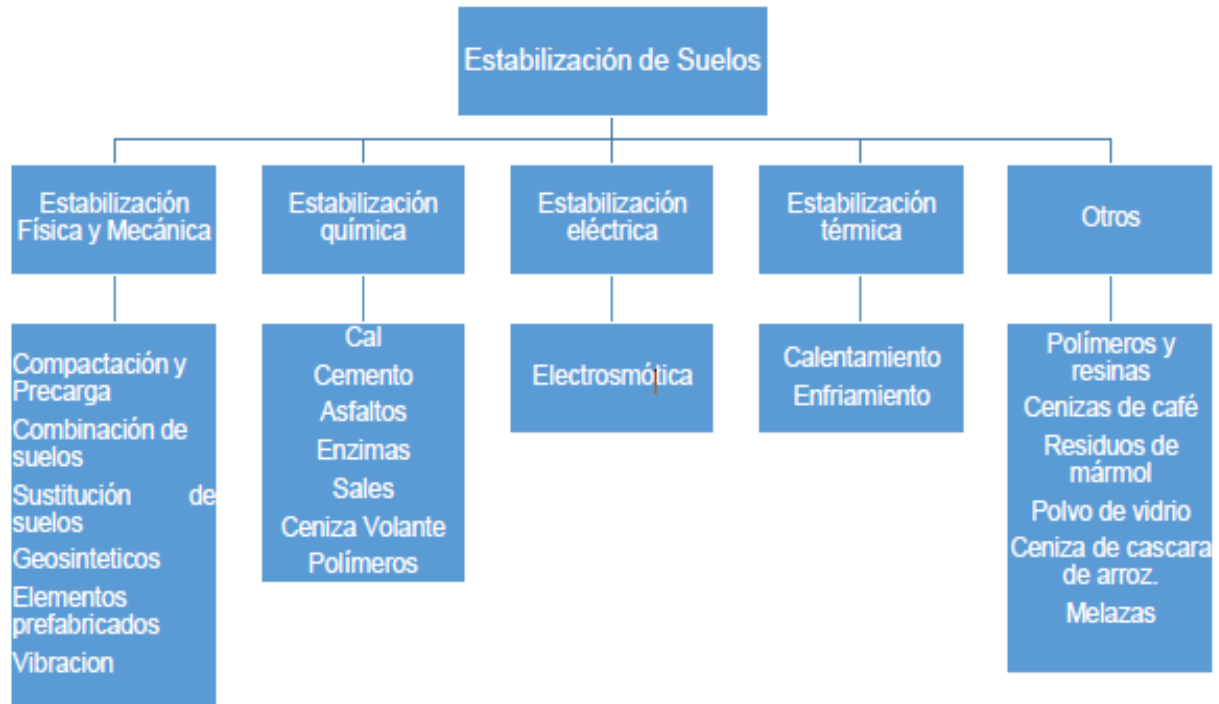
- Suelos a nivel de sub-rasante calificada como pobre o inadecuada de acuerdo al Manual Carreteras, suelos, geología, geotecnia y pavimentos (aquellos suelos que presente CBR menor o igual a 6).
- Así mismo, cuando la capa de sub-rasante sea arcillosa o limosa, y cuando se humedezcan puedan penetrar las capas granulares del pavimento.
- Para establecer un tipo de estabilización de suelos es necesario determinar el tipo de suelo existente. Los suelos que predominantemente se encuentran son: los limos, las arcillas, o las arenas limosas o arcillosas

Las consecuencias de una estabilización es que nos permite usar el suelo presente en el pavimento, nos permite construir caminos en lugares donde los terrenos son intransitables, obteniendo un emplazamiento estable que trabaje adecuadamente estructuralmente, esto permite evitar el uso de materiales de préstamo que son necesarios de llevar a la zona donde el pavimento estará emplazado. Se trata de una técnica enfocada claramente a lograr una mayor sostenibilidad, a cuyas ventajas medioambientales y técnicas, se suman importantes beneficios económicos.

2.7.2. Métodos de Estabilización.

Existen diferentes alternativas de para estabilizar suelos a continuación vemos algunas clasificaciones en la figura 13.

Figura 13. Esquema de métodos de estabilización.



Fuente. Higuera Sandoval⁷.

3.1.1.1. Estabilización Física y Mecánica

El método de estabilización se utiliza para mejorar la capacidad de soporte de resistencia de los suelos a través de cambios físicos, sin producir reacciones químicas.

- Estabilización por compactación.

Se realiza a través de la compresión del suelo con un contenido de humedad, logrando reducir el porcentaje de vacíos, aumentar la

⁷ Higuera Sandoval-Carlos Hernando, 2010

fricción interna y con ello conseguir que su capacidad de soporte se incremente. Al compactarse el suelo aumenta la densidad, aumenta la estabilidad, disminuye la contracción del suelo.

Para asegurar una adecuada compactación, se realizarán tramos de prueba, donde se definirá que equipo se usará, el espesor de las capas, el número de pasadas.

➤ Estabilización por combinación de suelos.

Considera la combinación o mezcla del material existente con materiales de préstamo, necesario como complemento la compactación. Se tendrá que realizar un escarificado de 15 cm en el suelo existente para luego colocar el material de préstamo. Los materiales tendrán que alcanzar la humedad apropiada de compactación. Un caso de ejemplo serían los suelos de grano grueso, tienen una alta fricción interna pudiendo soportar grandes esfuerzos, sin embargo, no tienen una cohesión entre sus partículas para que pueda ser estable como para ser una superficie de rodadura en una carretera, lo que trae como problemas que se puedan mover libremente y se pueda dar una separación de material. Las arcillas, por lo contrario, poseen una gran cohesión y carecen de fricción lo que hace perder estabilidad cuando hay presencia de humedad. Mezclando estos dos tipos de suelos se puede dar como resultado un buen material ya que poseería fricción interna y cohesión.

➤ Estabilización por sustitución de suelos.

Consiste en la eliminación del material no adecuado por un suelo que posee mejores características físicas y mecánicas. Se puede plantear constructivamente dos casos: el primero en el cual la capa de subrasante se construya directamente sobre el suelo natural existente o el segundo caso que consiste en realizar una excavación y el reemplazo con el material adicionado. En el primer caso se deberá realizar un escarificado, conformar, compactar en una profundidad de 15 centímetros. Seguidamente se colocará el material hasta llegar al espesor planteados hasta llegar al nivel de subrasante. En el segundo caso, se realizará la excavación hasta obtener el espesor de reemplazo planteado.

➤ Estabilización con geo sintéticos.

Con respecto a la experiencia que se tiene, los geos sintéticos proporcionan resistencia a la tracción y puede mejorar el rendimiento en la construcción de carreteras. La experiencia que se tiene con geo sintéticos, ha permitido tener diferentes funciones de los mismos. Por ejemplo, Los geotextiles tienen como función anticontaminante y drenante.

Las geomembranas son geosintéticos que tienen función de impermeabilización o protección.

Las geomallas permiten mejorar la capacidad portante del suelo ya que distribuye las cargas en una mayor área, lo que hace disminuir los esfuerzos cortantes y verticales en un terreno natural blando. El plano de falla es trasladado de un material no competente a uno de mejores características físicas y mecánicas como la base o subbase.

➤ Estabilización por elementos prefabricados.

Consiste en la incorporación de elementos prefabricados como geo sintéticos y/o tierra armada, los cuales actúan incrementando la cohesión y el ángulo de fricción del material, aumentando su capacidad portante. El método es rápido pero costoso⁸.

➤ Vibración.

La vibración se aplica en suelos arenosos o suelos con alta permeabilidad el cual consiste en la densificación del suelo a través de una vibración profunda las cuales pueden ser vibro flotación o vibro sustitución. Sin embargo, al aplicar dicho método, se necesita de un tratamiento superficial de compactación ya que la parte superior del terreno queda poco compactada.

Debido a la limitación del área, el método es poco eficiente en carreteras y también resulta ser costoso⁹.

⁸ Perez Collantes, 2014

⁹ Vásquez Concha, 2010

3.1.1.2. Estabilización Química.

Se define como la mezcla de un producto con el suelo para reaccionar químicamente modificando las propiedades del suelo, logrando mejorar las propiedades del suelo.

Cuando se utilizan productos con el fin de estabilizar un suelo, hay que tener en cuenta las consecuencias ambientales ya que pueden aparecer problemas de contaminación durante la etapa de ejecución de la construcción, operación y mantenimiento. Además, se debe considerar los factores que influyen en la estabilización como la situación geográfica, las condiciones climáticas (Humedad, temperatura, dirección y velocidad de viento entre otros), el tránsito de vehículos, entre otros. Algunas estabilizaciones químicas realizadas son:

➤ Estabilización con cal.

La estabilización con cal se aplica mayormente a suelos con granulometría fina de cierta plasticidad. En la combinación de suelo-cal, se producen dos partes en la primera parte se producen dos reacciones rápidas: floculación e intercambio iónico las cuales modifican al suelo. En la segunda parte se producen dos reacciones lentas: carbonatación y otra de tipo puzolánica (se produce la formación de nuevos productos químicos) las cuales estabilizan el suelo.

En la combinación suelo-cal, el calcio de la cal se combina con la alúmina y la sílice presentes en el suelo, formando silicatos de calcio y

de alúmina los que poseen propiedades cementantes, por lo que la magnitud de la resistencia adquirida dependerá de la cantidad de sílice y alúmina disponibles en el suelo.

La cal que se utiliza para la estabilización de suelos son el óxido cálcico (cal anhidra o cal viva) o el hidróxido cálcico (cal hidratada o cal apagada) y deben cumplir con los requisitos establecidos en las Especificaciones Técnicas Generales para construcción de carreteras EG-2013.

El efecto que produce la cal en suelos es:

- a. cambiar apreciablemente su plasticidad. Cuando el suelo presente un IP menor a 15, aumentará ligeramente IP y cuando el IP es mayor a 15 disminuye el IP.
- b. Aumenta la humedad óptima de compactación, lo que permite densificar el suelo de elevada humedad natural.
- c. Permite la reducción del potencial de contracción y de hinchamiento.
- d. Incrementa la resistencia a la compresión simple, la capacidad de soporte de resistencia del suelo y la resistencia a la tracción del suelo.
- e. Obtener un material más trabajable y fiable como producto de la reducción del contenido de agua en los suelos.

El material a estabilizar debe tener ciertas características, con el objetivo de llegar a alterar sus propiedades físicas e incrementar su resistencia o

capacidad de soporte del suelo; generalmente se recomienda que el suelo tenga un índice de plasticidad mayor a 15 y el porcentaje que pasa por el tamiz N°200 sea mayor a 25. Sin embargo, resulta poco efectivo cuando se tiene suelo con contenido de materia orgánica. El manual de carreteras de Suelos y Pavimentos nos da un guía referencial recomendado que, para estabilizar suelos con cal, estos deben tener un índice de plasticidad mayor a 10 y un contenido de materia orgánica menor a 3%.

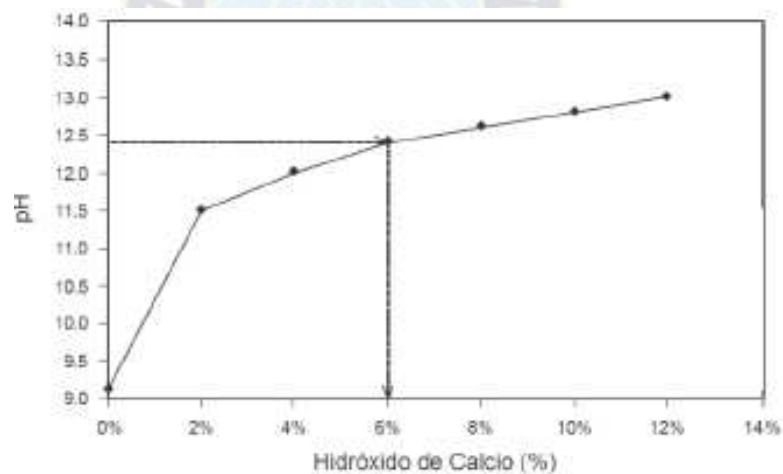
Métodos para encontrar el porcentaje óptimo de cal puede haber muchos y la eficacia de cada uno depende de la experiencia del que lo practique, muchos de estos no están normalizados por la ASTM, no obstante, el procedimiento ASTM D- 6276-03, método muy útil por su facilidad y fiabilidad, hecho por Eades y Grim, proporciona los medios para estimar el requisito de la proporción del suelo-cal para la estabilización de un suelo plástico. Se realiza en suelos que pasan el tamiz de 425 mm (N°. 40). La proporción óptima del suelo-cal para la estabilización de suelos plásticos, será aquella que brinde un mejoramiento en las características propias del suelo, determinadas principalmente por la resistencia a la compresión o el índice de plasticidad.

Una serie de especímenes son preparados conteniendo un rango de porcentajes de cal en una muestra de suelo. Las medidas del pH se hacen en las mezclas de los especímenes en suspensión para determinar el

contenido mínimo de la cal en la mezcla del suelo-cal para obtener un pH de por lo menos 12,4.

Al elevar el pH del suelo estabilizado con cal se liberan sílice y alúmina de la arcilla que reaccionan con los iones de calcio procedentes de la cal que forman silicatos y aluminatos calcios hidratados que como el caso del cemento Portland, incrementan la resistencia mecánica. El porcentaje que se recomienda para generar reacciones puzolánicas a lo largo del tiempo oscilan entre 3 y 8 por ciento.

Figura 14. Selección del porcentaje óptimo de cal método de Eades y Gri.

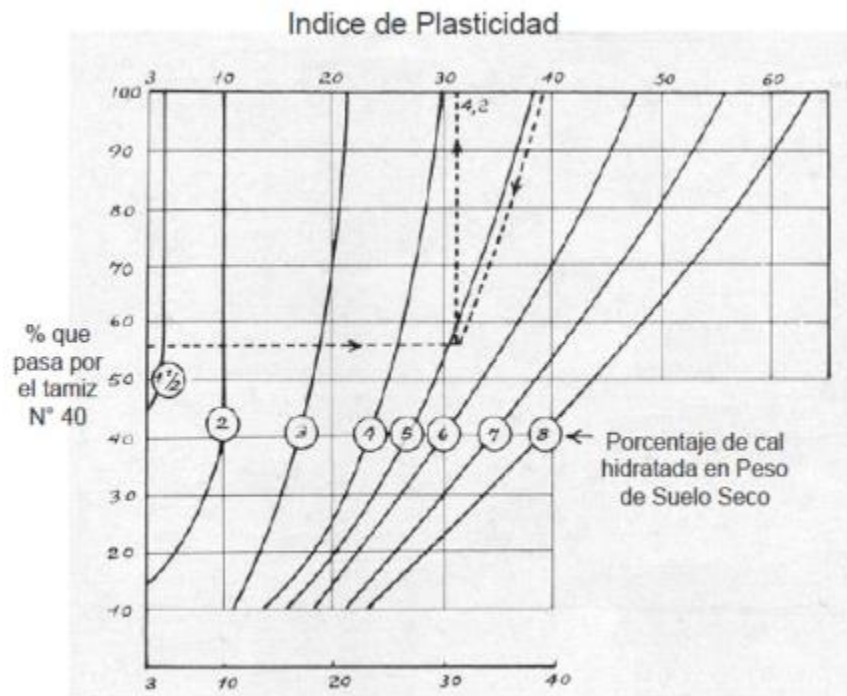


Fuente: Página de Internet

Otro método planteado fue realizado por C. Mc Dowell (1966), que realizó un ábaco mostrando las diferentes curvas representando el porcentaje de cal en porcentaje del peso de suelo seco, en función del índice de plasticidad y del porcentaje que pasa por el tamiz N° 40 del

suelo sin estabilizar¹⁰. Ábaco excluye a los suelos con un $IP < 3$ y un porcentaje que pasa el tamiz $< 10\%$ y se puede apreciar en la figura 15.

Figura 15. Abaco para diseño de tratamiento de los suelos con cal a partir del índice de plasticidad y granulometría.



Fuente: Revista Facultad de Ingeniería UPTC (2012)

La estructura final de las partículas del suelo arcilloso resulta ser desordenados, ya que la cal produce la ruptura de la estructura laminar y la reducción de la capa doble del suelo arcilloso. La distribución desordenada de las partículas redistribuye las tensiones en más partículas y en diferentes direcciones, a diferencia de la estructura laminar que posee un suelo arcilloso, las fuerzas se transmiten ortogonalmente en la estructura laminar y distribuyéndose en menos

¹⁰ C. Mc Dowell (1966)

partículas. Por ello, el suelo arcilloso mejora la capacidad de soporte de resistencia.

➤ Estabilización con Cemento.

La estabilización con cemento se aplica adecuadamente a suelos granulares tipo A1, A-2 y A-3 con presencia de finos con un límite líquido menor a 40 y una plasticidad menor a 18. Cuando se mezcla el suelo con cemento, se compacta y debe darse un curado adecuado para que se convierta en un suelo endurecido.

Los fenómenos químicos que ocurren entre el suelo y el cemento cuando ambos se mezclan con el contenido apropiado de agua consisten en reacciones del cemento con los componentes silíceos de los suelos, que producen conglomerantes que ligan a las gravas, arenas y limos; también, el hidrato de calcio que se forma debido al contacto del cemento con el agua libera iones de calcio muy ávidos de agua, que la toman del asistente en las láminas de arcilla, como resultado del proceso es la disminución de la porosidad, y de la plasticidad, por lo que se produce el aumento de la resistencia y de su durabilidad.

La resistencia del suelo aumenta con el contenido del cemento y la edad de la mezcla suelo-cemento. Sin embargo, cuando se tiene contenido mayores de cemento requerido conllevarían a la aparición

de fisuras por contracción causados por cambios de temperatura y humedad.

La dosificación aproximada de cemento de acuerdo al tipo de suelo es mostrada en la tabla 9:

Tabla 9. Rango de uso de cemento de acuerdo al tipo de suelo¹¹.

Clasificación de Suelos según AASHTO	Rango usual de cemento requerido
	Porcentaje del 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 - 1
A-6	9 - 15
A-7	10 - 16

Fuente: Federal Highway Administration (FHWA).

➤ Estabilización con productos asfálticos.

Los suelos adecuados para la estabilización con productos asfálticos son los granulares con un índice de plasticidad menor a 10 y que presenten menos del 20% que pasa la malla N°200. La estabilización con productos asfálticos puede ser usada para aumentar la estabilidad por la aglomeración del ligantes que envuelve a las partículas o también

para impermeabilizar un suelo, disminuyendo la sensibilidad a los

¹¹ *Federal Highway Administration (FHWA).*

cambios de humedad.

El material asfáltico mayormente empleado son las emulsiones asfálticas y los asfaltos fluidificados. El tipo de ligante asfáltico a usar depende de la granulometría, contenido de humedad, condiciones climáticas, la clase de equipo disponible, el tiempo que se espera durante la construcción y la facilidad para disponer los materiales.

La dosificación del ligante depende principalmente de la granulometría del suelo. Cuando se presentan productos asfálticos en exceso en el suelo, las partículas pueden lubricarse lo que disminuye la fricción interna teniendo un suelo poroso e inestable. De acuerdo al manual de carreteras Suelos y Pavimentos del MTC (2014) en general la cantidad de asfalto utilizado varía entre un 4% a un 7%.

➤ Estabilización con Sales.

Las sales son originadas a partir de la reacción entre un ácido con una base. Las sales neutralizadas son aquellas que no presentan excesos de iones de hidrogeno (sales acidas) ni contienen exceso de iones de hidroxilo (sales básicas), entre ellas tenemos a cloruro de sodio (NaCl), cloruro de calcio (CaCl_2) o cloruro de potasio (KCl).

Se han estudiado una gran cantidad de sales en laboratorio, pero debido a factores económicos y a la disponibilidad de las sales solo han podido aplicarse algunas, siendo las mayormente usadas el cloruro de sodio y el cloruro de calcio, utilizadas principalmente para el control de polvo.

➤ Estabilización con Polímeros.

En base a la investigación desarrollada por Gary Edward Welling (2012), la interacción que realiza el polímero es entrelazar las partículas del suelo produciendo un efecto aglutinante, es decir pegando las partículas del suelo, permitiendo un control de polvo en las vías y modificando la matriz del suelo logrando mejorar propiedades del suelo. Se ha comprobado que a mayor cantidad de polímeros disminuye el índice de plasticidad y mejora la resistencia al corte de las arcillas y modifica la falla de corte de frágil a uno dúctil.

El polímero más usado para estabilizaciones de suelos hoy en día son los acetatos vinílicos o los polímeros acrílicos, los cuales han resultado ser adecuados en las estabilizaciones de suelos que han estudiado, no obstante, resultan generalmente ineficientes en suelos finos debido a su más alta superficie específica de área en comparación con suelos granulares¹². Actualmente se vienen realizando investigaciones con este producto, sin embargo, las pruebas ensayadas con polímeros son pocas.

➤ Estabilización con enzimas.

Las enzimas son moléculas orgánicas que actúan como catalizadores de reacciones químicas, es decir, aceleran la velocidad de reacción. Comúnmente son de naturaleza proteica, pero también de ARN. Las

¹² (Tingle et al. 2007).

enzimas se definen como proteínas compuestas por cadenas de aminoácidos unidos por enlaces moleculares. Pueden usarse para surtir trabajos difíciles y productos químicos fuertes, permitiendo un ahorro de energía y previniendo la contaminación. La aplicación de la enzima a un suelo aplicable tendrá como resultado valores más altos de CBR, el suelo estabilizado tendrá una permeabilidad más baja debido al incremento de la densidad del suelo que se generará.

La enzima es 100% biodegradable y deriva su eficacia en la fracción de arcilla del suelo, después de la aplicación de la enzima las partículas de arcilla presentes en el suelo ya son no atraídas por el agua, permitiendo que el agua en el suelo drene libremente. Las enzimas están disponibles en forma líquida y es aplicado utilizando equipo y técnicas estándar. Una vez que es aplicado, reducirá la tendencia de un camino a exhibir varios problemas comunes.

➤ Estabilización con ceniza volante.

El suelo interactúa debido a la presencia de cuarzo y minerales de las arcillas y las cenizas volantes interactúan en la estabilización de suelo debido a la presencia de óxido de calcio o magnesio. Se producen 4 reacciones: intercambio iónico, floculación y aglomeración, reacciones puzolánicas y carbonatación¹³.

¹³ (Perez Collantes, 2014).

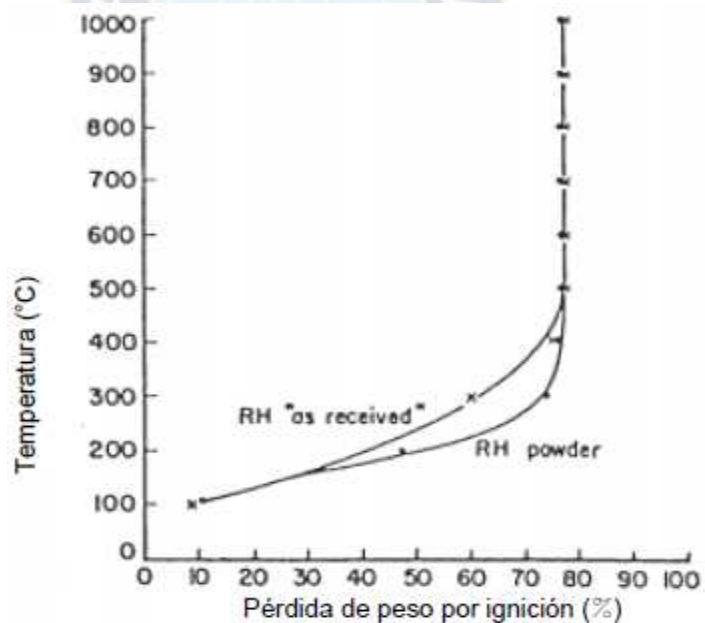
Diversas investigaciones se han realizado con la adición de ceniza volante. Según Acosta et al. (2003) los mecanismos que contribuyen a la estabilización son: el aumento de la resistencia del suelo (debido de la cementación producida por la hidratación de aluminato tricálcico presentes en las cenizas volantes). Un segundo mecanismo es que la cal libre en las cenizas volantes reacciona con los minerales de arcilla provocando compresión de la capa de absorción y reduciendo la plasticidad. El tercer mecanismo, es que la cal libre que no reaccionó con los minerales de las arcillas se encuentra disponibles para el procesamiento de cementación adicional con los compuestos de sílice y alúmina a través de las reacciones puzolánicas.

➤ Estabilización con Ceniza de Cascara de Arroz.

Se han realizado diversas investigaciones con fines de estabilización del suelo usando residuos agrícolas, generalmente usados luego de un proceso de combustión, tales como ceniza de cáscara de arroz, el cual se caracteriza por tener propiedades puzolánicas. Las propiedades de las cenizas de cáscara de arroz dependen de si la cáscara ha sufrido una combustión destructiva completa o ha sido quemada parcialmente. Los diferentes factores que influyen en las propiedades de la ceniza son la condición de incineración (temperatura y duración), la velocidad de calentamiento, la ubicación geográfica, la finura, el color y la variedad de cultivos y el año de la producción agrícola.

En el proceso de quemado de la cáscara de arroz, cuando la temperatura llega a los 100 °C se evapora el agua y a los 300 °C empieza a quemarse los componentes orgánicos. Cuando llega a los 500 °C se ha observado en diferentes investigaciones que casi todos los componentes han sido transferidos a su fase gaseosa, causando una fuerte disminución en peso del material antes de alcanzar una más estable (como se puede observar en la figura 16), el residuo en dicho estado es una ceniza rica en sílice.

Figura 16. Característica de la ceniza de arroz en ignición.



Fuente: Mehta P.K.

Para la eliminación de los materiales orgánicos de la cáscara de arroz se necesita de un tiempo para ser removidos totalmente. De acuerdo al trabajo de Deepa G. Nair (2008), el proceso de quemado debe tener una temperatura de 500 °C y necesitar de 3 a 12 horas para poder lograr una

masa de material estable, es decir, cuando los componentes orgánicos hayan sido eliminados completamente.

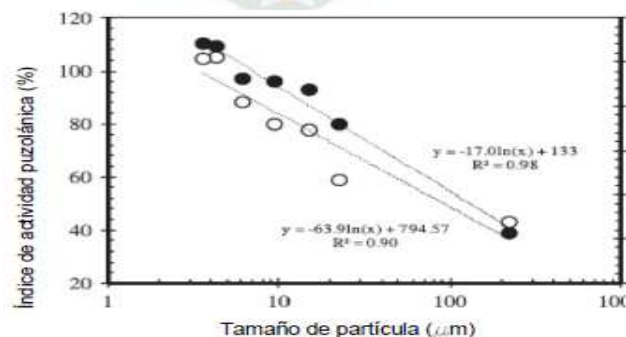
Una investigación realizada por Mehta (1977) indica que el periodo prolongado a 500 °C puede mantener la sílice amorfa, pero cuando se encuentra a temperaturas mayores a 680 °C, solo puede mantenerse en el primer minuto. De acuerdo al trabajo de Chopra (1981) cuando el tiempo de quemado tiene una larga duración provoca un incremento de los cristales de sílice, disminuyendo la presencia de sílice amorfa, la cual tiene una mayor reactividad. Investigaciones con técnicas de difracción de rayos X, capturaron la estructura de la sílice la cual a 700 °C estaba en forma amorfa, pero la combustión a mayor duración a la temperatura de 700 °C causaba que la sílice se cristalice.

La condición que puede producir la ceniza de cáscara de arroz activa se optimizó en el trabajo reciente de A. Muthadhi y S. Kothandaraman (2010). Teniendo en cuenta el equilibrio entre el consumo de energía y la extracción de la cáscara de arroz quemado, la condición óptima que puede producir una ceniza activa con el máximo contenido de sílice amorfo y otros parámetros a buen ritmo, pero consumiendo la menor energía posible, es una duración ardiente de 2 horas a 500 °C. En algunos artículos los investigadores no mencionan sobre la reactividad de los materiales y cómo se había producido, curiosamente en todos los casos, la ceniza de cáscara de arroz (quema de la cascara de arroz) ha mostrado un resultado positivo. Debido a que estos

investigadores trabajaron independientemente entre sí y con diferentes tipos de suelo en diferentes regiones, es difícil comparar el efecto de la ceniza de cáscara de arroz quemada controlada y no controlada. Sin embargo, en la investigación realizada por G. Biswas (2010) concluyó con resultados positivos la combinación el uso de cal y cenizas quemada incontrolada. Esto expresa la posibilidad de que la inversión de energía en la producción de ceniza de cáscara de arroz se pueda reducir a cierto nivel.

En la estabilización de Vinh Pham (2012) menciona que la relatividad de las cenizas de cascara de arroz se puede evaluar a través de la reacción con el hidróxido de calcio el cual se rige por la solubilidad, así como cantidad de sílice que presente. Además, el tamaño de partículas y la forma cristalina son los factores que controlan la solubilidad. Partículas más pequeñas presentan mayor reactividad mientras que partículas más grandes presentan menor reactividad. Relación entre actividad puzolánica y tamaño de partículas se muestra en la figura 17.

Figura 17. Relación índice de actividad puzolánica y el tamaño de partícula.



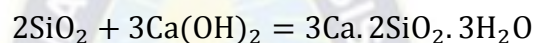
Fuente: Mehta P.K.

La estabilización del suelo con ceniza de cáscara de arroz es un método relativamente nuevo. Una gran cantidad de trabajos de investigación que se han llevado a cabo se han aplicado a suelos expansivos, los cuales confirman la oportunidad del material para la estabilización del suelo junto con otros estabilizadores como la cal y cemento ya que ha demostrado tener resultados favorables, disminuyendo el índice de plasticidad, aumentando el óptimo contenido de humedad y aumentando el valor de CBR. No obstante, se tiene una experiencia realizada en Uruguay por Leonardo Behak y Washington Peres Núñez (2008), donde se estabilizó un suelo arenoso utilizando como estabilizadores a la cal y ceniza de cascara de arroz, el cual obtuvo resultados favorables. Aún resulta cuestionable si se puede obtener resultados óptimos de la estabilización usando solamente ceniza de cáscara de arroz, es decir, si la ceniza de cáscara de arroz sea un agente estabilizador primario, debido a que no se han realizado muchas investigaciones utilizando solamente el material.

La mayoría de investigaciones realizadas indican que pueden ser usadas como agente estabilizador secundario, es decir, reemplazando una cantidad de cementos y puede combinarse con la cal para mejorar el método de estabilización con cal. Esto se debe a que las propiedades físicas y químicas de la ceniza de cáscara de arroz carecen de propiedades cementantes, sin embargo, pueden poseer un alto

porcentaje de material silícico, lo cual sería un potencial de propiedades puzolánicas.

La ceniza de cáscara de arroz al combinarse con el hidróxido de calcio reacciona a temperatura ambiente para formar componentes cementantes, a través de reacciones puzolánicas obteniéndose así, materiales más resistentes, menos deformables y más durables. Las reacciones puzolánicas se pueden esquematizar de la siguiente manera:



Una de las principales ventajas de las reacciones puzolánicas es que continúan por muchos años incrementando la resistencia.

La utilización de la ceniza de cáscara de arroz mediante la explotación de sus propiedades puzolánicas inherentes es una manera eficaz de resolver el problema ambiental y de eliminación de la ceniza a través del reciclaje del material pudiendo establecer un ambiente más limpio y saludable.

3.1.1.3. Estabilización térmica.

➤ Calentamiento.

Cuando las arcillas son calentadas a una temperatura de 900°C adquieren gran resistencia que no se pierde ni por inmersión la resistencia. Para la estabilización de suelos se necesita llegar a una temperatura entre los 200 y 400 ° C. En Rumania se desarrolló una aplicación de una llama provocada directa hacia la superficie y en Rusia

se desarrolló por circulación de gas calentado, siendo el de Rusia más efectivo, pero a su vez más complicado. No obstante, en los métodos mencionados anteriormente la influencia del punto de calentamiento no se extiende más de un par de metros.

➤ Enfriamiento.

Al producir un enfriamiento en suelos finos, genera una disminución de la resistencia debido a que la repulsión de las partículas aumenta y causa el movimiento de agua interarticular por el gradiente térmico.

La estabilización por enfriamiento debe llegar al congelamiento para evitar los efectos mencionados anteriormente y que el agua se congele y el suelo se transforma en un conjunto rígido, presentando una mejor resistencia. Para los suelos arcillosos se puede requerir de temperaturas menores de 0°C para que el agua de los poros se congele.

3.1.1.4. Estabilización por medios Eléctricos.

➤ Electrosmótica.

La electrosmótica o electroósmosis es la aplicación de una corriente eléctrica en una muestra de suelo, por medio de unos electrodos (ánodos y cátodo). Los cátodos están constituidos por tubos que recogen el agua, para luego ser evacuados por bombeo. La aplicación de corriente genera una migración de iones y un flujo de agua en el sistema hacia el cátodo, como resultado del proceso, la presión de poros se reduce, el suelo se consolida y aumenta su resistencia.

Diferentes investigaciones han realizado ensayos con productos y residuos industriales, los resultados son variados siendo desde excelentes hasta negativos. Algunos productos estudiados son:

- * Ácido fosfórico
- * Bases orgánicas
- * Cloruro de calcio
- * Cloruro sódico
- * Quim KD-40
- * Soda caustica
- * Melaza
- * Residuos industriales.

2.7.3. *Propiedades afectadas con la estabilización.*

La estabilización de suelos se realiza con la finalidad de mejorar las propiedades del suelo, a continuación, definimos las propiedades que más se estudian:

i. Estabilidad Volumétrica.

Generalmente relacionada con suelos que se expanden y se contraen por los cambios de humedad relacionados con los cambios climático o alguna actividad propia de la construcción. Las presiones de expansión al no estar controladas, pueden levantar postes, inclinar poster, fracturas muros, romper tubo de drenaje, entre otras cosas.

Algunas soluciones planteadas es la aplicación de cargas, impermeabilizar el suelo a través de membranas, introducción de aguas, a través medios químicos o térmicos, etc.

En arcillas expansivas, presentes con mucha frecuencia en la zona de selva, se trata de unir las partículas por lazos suficientemente fuerte para resistir las presiones internas de expansión, logrando modificar la masa de la arcilla. Esto se confirma con ensayos de corte directo, ensayo de carga repetida, ensayo de deformación y capacidad de soporte de resistencia.

ii. Resistencia.

Es la capacidad de un suelo a evitar su deformación y falla ante una carga, mayormente posee menos resistencia cuando el contenido de humedad es alto. Entre los suelos que presentan resistencia baja están los suelos arcillosos. Estos suelos son sensibles a la humedad.

Lo suelos arcillosos pueden presentar diferentes características dependiendo de la humedad y energía de compactación. De acuerdo a Montejo Fonseca (2002) los suelos arcillosos compactados en el lado seco de la curva de compactación, presentan un comportamiento elástico y resistencia relativamente alta, mientras que el suelo arcilloso compactado en el lado húmedo, presentaría resistencias bajas y comportamiento plástico o viscoso. Esto se debe a que la alta humedad generada en las partículas de las arcillas un efecto de repulsión, lo que

trae como consecuencia que la cohesión sea menor. Para mejorar la resistencia del suelo se suele usar algunas formas de estabilización como:

- Compactación
- Vibro flotación
- Precarga
- Drenaje
- Estabilización mecánica con otros suelos
- Estabilización química

iii. Permeabilidad.

El suelo se puede definir como permeable pues presenta poros, los cuales pueden llenarse de aguas, estos poros se interconectan de modo que generan caminos por donde el agua puede transportarse, cuando la cantidad de vacíos es mínima, no podrá transportar el agua, entonces el suelo será impermeable. La permeabilidad se relaciona con dos problemas que se buscan solucionar, la presión de poros y el flujo de agua a través del suelo. Cuando se compacta los suelos arcillosos a humedades bajas, se obtiene una alta permeabilidad debido a que existen una gran cantidad de vacíos intersticiales. No obstante, al aumentar la humedad generará una menor permeabilidad del suelo. Una

de las soluciones que se plantean en suelos arcillosos es el uso de floculante que permiten reducir significativamente la permeabilidad.

iv. Compresibilidad.

Es el grado en que el volumen del suelo disminuye por efecto de una carga. Para suelos con textura gruesa (gravas y arenas) la compresibilidad será mínimas pues las partículas están en contacto. Para suelos de textura fina (limos y arcillas) se produce una reducción en el volumen, porque gran parte de los vacíos intersticiales se eliminarán. Mientras mayor índice plástico tenga el suelo mayor será la compresibilidad.

La compresibilidad tiene una influencia en las propiedades de los suelos, ya que se altera las fuerzas existentes entre las partículas en magnitud y sentido, lo que tiene importancia decisiva en la modificación de la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y se provocan desplazamientos.

v. Durabilidad.

La durabilidad está relacionada con la resistencia al intemperismo, erosión o la abrasión del tránsito. Mayormente relacionado a la superficie de rodadura, la última capa del pavimento.

CAPÍTULO III

MARCO PRÁCTICO Y METODOLOGIA

3.2. Método General

El método específico es el experimental, porque la investigación se apoya en la observación de fenómenos provocados o manipulados en laboratorio¹⁴ y es una situación de control en la que se manipulan de manera intencional, una o más variables independientes (causas) para analizar las consecuencias de tal manipulación sobre una o más variables dependientes (efecto).¹⁵ El diseño de investigación es el pre experimental y se define como el resultado pre test a los obtenidos de los ensayos del laboratorio del suelo en estudio sin la adición de aditivos, y el post test son las distintas dosificaciones en porcentajes de material reciclado.

3.3. Método Aplicado.

El método aplicado es el cuantitativo porque usa la recolección de datos, con base en la medición de propiedades mecánicas del suelo (C.B.R.), para establecer patrones de comportamiento.

3.4. Localización y Ubicación de la Muestra

El lugar seleccionado para la extracción de muestras y ejecución de los ensayos de laboratorio se encuentra ubicado en la ciudad de La Paz, en la calle 28 de Cota Cota.

¹⁴ (Ccanto 201 O)

¹⁵ (Hernandez, et al 2010)

Figura 18. Ubicación del lugar de la muestra a estudio.



Fuente: Elaboración Propia.

Figura 19. Extracción del Suelo.



Fuente: Elaboración Propia.

Con el objetivo de obtener información geotécnica del suelo a ser ensayado, se realizaron ensayos de laboratorio para poder determinar las propiedades físicas, mecánicas y químicas de las muestras de suelo arcilloso, cal y cascara de arroz.

3.5. Metodología.

En la construcción de obras civiles en la actualidad, en muchos casos necesita de mejoramiento o estabilización, para conseguir un material durable y que responda a las necesidades constructivas. Para ello se cuenta con tres fases metodológicas las cuales son:

3.5.1. Fase Preliminar.

Donde se hace la búsqueda de material bibliográfico el cual es de mucha importancia para el tema de estabilización de suelos arcillosos, con el fin de desarrollar conceptos sólidos en el tema y parámetros adecuados para la realización del presente proyecto de Estabilización de Suelos Arcillosos con ceniza de Cascara de arroz y cal. Además de la búsqueda de los materiales (Suelo, Cal y Ceniza de Cascara de Arroz).

3.5.2. Fase de Realización de los ensayos en el laboratorio.

3.5.2.1. Materiales investigados.

La fase de ensayos comenzara con la obtención de los materiales. Para el caso del suelo se realizarán trabajos de campo, donde se reconocerá la zona de estudio, y se procederá con las exploraciones geotécnicas. La ceniza de cascara de arroz se obtendrán de la producción de arroz en el mismo departamento.

- El suelo a estabilizar proviene de la zona de Cota Cota (campus universitario, UMSA) ubicado en la ciudad de La Paz. Previa a la extracción del material se procede con los siguientes ensayos en el laboratorio de Mecánica de Suelos del Instituto de Ensayo de Materiales (IEM) como ser:
 - Contenido de Humedad
 - Granulometría por vía seca
 - Límites de consistencia del suelo
 - Gravedad específica de los sólidos del suelo
 - Compactación Proctor T-180 B
 - Relación de Soporte California “CBR”
- El material como estabilizante para el suelo arcilloso en el presente proyecto es la Cascara de arroz, proveniente del norte de los yungas (caranavi) de La Paz, el cual es material con un alto contenido de sílice.

Obtención de la ceniza de cascara de arroz: Durante la operación de descascarillado del arroz se produce un material de baja densidad global y que, por tanto, representa un grave problema para su vertido o almacenamiento. Cada tonelada de arroz virgen produce 200 kilogramos de cascarilla, que después de su combustión produce aproximadamente 40 kilogramos de cenizas. Si la combustión se realiza de forma incontrolada, las cenizas producidas están formadas, principalmente, por cristobalita y tridimita y deben de molerse muy

finamente para que posean propiedades puzolánicas. Sin embargo, las cenizas producidas a baja temperatura contienen sílice en forma celular y no cristalina por consiguiente es un producto altamente puzolánico. La quema se realiza a una temperatura no mayor a los 700 °C por un lapso de tiempo de 1 – 2 horas.

- La cal a utilizar es distribuida en todo el mercado de la ciudad de La Paz. La cal par el proyecto puede ser cal viva o hidratada y debe satisfacer los requisitos en las Especificaciones Técnicas Generales dadas para la construcción de proyectos viales.

El agua que se empleara en la investigación debe estar limpia, no debe contener materia orgánica y debe estar libre de sales, aceites, ácidos y álcalis perjudiciales. El agua potable a usar será de la red pública correspondiente al Laboratorio de Instituto de Ensayo de Materiales (IEM), la que cumple los límites permisibles indicados en la norma técnica.

3.5.2.2. Mezcla de los materiales

Luego de tener todo el material necesario para el proyecto de estabilización se procede a realizar la dosificación para así determinar el porcentaje optimo que se pone (suelo, cascara de arroz y cal), es necesario realizar una serie de pruebas de laboratorio con muestras del suelo natural con distintos porcentajes de ceniza de cascara de arroz y cal. Los porcentajes iniciales a considerar serán 10 % de ceniza de cascara de arroz, 5% de cal y 85% de suelo arcilloso. Los cuales variarían

según al comportamiento del suelo estabilizado teniendo un rango de valor para cada material, ceniza de cascara de arroz 5-25%, cal 5% y el suelo de 70-85%.

Los resultados obtenidos a partir de estos ensayos serán esenciales para definir los parámetros de trabajo óptimo para la realización de los trabajos a gran escala en el camino que se desea estabilizar.

3.5.3. Fase de Análisis y Resultados.

Se presentan y se analizan los resultados de los ensayos realizados con las muestras de suelo arcilloso, ceniza de cascara de arroz y cal provenientes del departamento de La Paz.

3.6. Ensayos en Suelo Natural.

3.6.1. Ensayos Físicos.

3.6.1.1. Contenido de Humedad (ASTM D2216-98)

Objetivo. - El ensayo tiene por objetivo determinar el contenido de agua en la muestra de suelo en porcentaje. El contenido de humedad de un suelo es la relación, expresada como un porcentaje del peso del agua en relación con el peso del suelo seco. El ensayo se realiza determinando el peso de agua eliminada, secando el suelo húmedo hasta un peso constante en un horno controlado a una temperatura de $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$. El resultado es muy importante especialmente en suelos cohesivos ya que dicho parámetro, nos da una idea del estado húmedo natural del suelo.

Procedimiento de los cálculos:

- Se determina el peso del agua según:

$$W_W = W_{W1} - W_{W2} \dots\dots\dots (1)$$

- El peso del suelo seco se determina a partir de:

$$W_S = W_2 - W_C \dots\dots\dots (2)$$

- Y el contenido de humedad de la muestra será:

$$\%h = \frac{W_W}{W_S} * 100 \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

%h : Contenido de Humedad.

Ww : Peso del agua (g).

Ws : Peso seco de los sólidos del suelo (g).

Figura 20. Muestra para contenido de Humedad.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 21. Ensayo de contenido de humedad.



Fuente: Elaboración Propia

Los resultados obtenidos para la muestra del suelo de Cota Cota se muestran en Tabla 10.

Tabla 10. Contenido de humedad del suelo de cota cota.

Pesos	Humedad Natural		
	30	5	19
Capsula No.	30	5	19
Capsula + suelo húmeda (g) (P1)=	1091.66	1065.80	1052.30
Capsula + suelo seco (g) (P2)=	1033.10	1010.30	995.60
Peso del agua (g) (Pa = P1 - P2)=	58.56	55.50	56.70
Peso de la capsula (g) (Pc)=	222.61	222.61	222.61
Peso suelo seco (g) (P2 - Pc) = (Ps)=	810.49	787.69	772.99
Contenido de humedad (%Hh) (Pa/Ps)*100 =	7.23	7.05	7.34

Fuente: Elaboración propia.

3.6.1.2. Análisis Granulométrico de Suelos por tamizado (ASTM D421-58, ASTM D422-63).

Objetivo. - El ensayo tiene por objetivo determinar la distribución del tamaño de partículas mayores a 0.075 [mm] por medio de un proceso de tamizado y el cálculo de los coeficientes de uniformidad y curvatura.

Información que también puede brindar ayuda en el desarrollo de las relaciones a cerca de la porosidad y compactación.

Procedimiento de los cálculos.

- Calcular el porcentaje parcial retenido en cada tamiz respecto al total:

$$\%R_p = \frac{P}{P_s} \dots\dots\dots (4)$$

Dónde:

R_P = Porcentaje retenido parcial

P = peso retenido en cada tamiz

P_s = peso de la muestra total seca

- Porcentaje retenido acumulado en cada tamiz, sumando el % parcial retenido de cada tamiz con el % parcial retenido acumulado de un tamiz previo.

$$\%R_t(i + 1) = \%R_P + \%R_t(i) \dots\dots\dots (5)$$

- Porcentaje de finos.

$$\%R_t(i + 1) = 100 - \%R_t(i + 1) \dots\dots\dots (6)$$

- Cálculo de finos respecto al tamiz N°10:

$$\%P_t = \frac{\%P_m * P_{T \text{ tamiz } N^{\circ}10}}{100} \dots\dots\dots (7)$$

Figura 22. Juego de Tamices serie gruesa y fina.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

Tabla 11. Resultado al análisis del agregado grueso.

ANÁLISIS DEL AGREGADO GRUESO					
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	% Parcial Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa Total
2"	50,80		0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,10		0,00	0,00	100,00
1"	25,40	96,19	1,18	1,18	98,82
3/4"	19,10	27,8	0,34	1,52	98,48
3/8"	9,52	214,76	2,63	4,15	95,85
No. 4	4,76	176,29	2,16	6,31	93,69
No. 10	2,00	210,77	2,58	8,89	91,11
Total		725,81			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 12. Resultado al análisis del agregado fino.

ANÁLISIS DEL AGREGADO FINO						
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	% Parcial Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa Acumulado	% Pasa Total
No. 10	2,00					91,11
No.20	0,84	2,65	2,67	2,67	97,33	88,68
No.40	0,42	1,31	1,32	3,99	96,01	87,48
No.60	0,25	1,09	1,10	5,09	94,91	86,48
No.140	0,105	2,46	2,48	7,57	92,43	84,22
No.200	0,074	1,33	1,34	8,91	91,09	82,99
Total		8,84				

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 13. Resultado de las características de la granulometría.

CARACTERÍSTICAS DE LA GRANULOMETRÍA			
D10 =	0,008	Cu =	62,50
D30 =	0,018	Cc =	0,08
D60 =	0,50		
GRAVA	(%)		6
ARENA	(%)		11
FINO	(%)		83
TOTAL	(%)		100,00

Fuente: Elaboración propia

3.6.1.3. Límites de Atterberg del Suelo ASTM D424-59.

Objetivo: El ensayo por objetivo determinar los límites de consistencia de una muestra de suelo por medio de una serie de mediciones y

procedimientos normalizados. El problema de potencial de volumen puede muy a menudo ser detectado de los resultados de los ensayos de límite líquido y límite plástico. El límite líquido en ocasiones puede utilizarse para estimar asentamientos en problemas de consolidación, y ambos límites son algunas veces útiles para predecir la máxima densidad en estudios de compactación.

Figura 23. Máquina de Casagrande.



Fuente: Elaboración propia

os resultados para la muestra de Cota Cota se muestran en la tabla 14.

Tabla 14. Resultado de límites de consistencia.

L.L.=	28,24
L.P.=	18,58
I.P.=	9,67

Fuente: Elaboración propia

3.6.1.4. Gravedad Específica de los sólidos del suelo ASTM D854-02.

Objetivo: El ensayo tiene por objetivo determinar la gravedad específica de los sólidos de una muestra de suelo cuyas partículas tienen un tamaño menor a 4.75 [mm], el valor de la gravedad específica, es un parámetro básico para calcular la relación de vacíos de un suelo, se utiliza también en el ensayo de hidrometría y es útil para predecir el peso unitario del suelo. Ocasionalmente el valor de la gravedad específica puede utilizarse en la clasificación de los minerales del suelo, algunos minerales de hierro tienen un valor de gravedad específica mayor que los provenientes de la sílice.

Procesamiento de cálculos.

- Determinar la masa del picnómetro.

$$M_{pw,t} = M_p + (V_p * \rho_{w,t}) \dots\dots\dots (8)$$

P_w, t = Densidad del agua a la temperatura de ensayo

M_p = Masa del picnómetro

V_p = Volumen del picnómetro

- Gravedad específica a la temperatura de ensayo:

$$G_t = \frac{P_s}{P_{w,t}} = \frac{M_s}{M_{pw,t} - (M_{pw,t} - M_s)} \dots\dots\dots (9)$$

G_t = Gravedad específica a la temperatura de ensayo

M_s = Peso del suelo seco

$M_{pw,t}$ = Peso picnómetro + agua + suelo

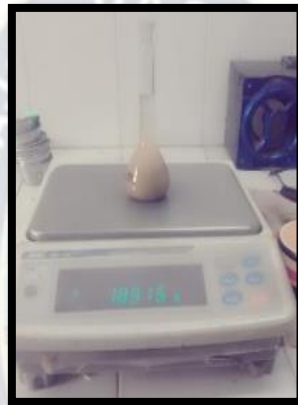
- Corrección

$$G_{20^{\circ}\text{C}} = K * G_t \dots\dots\dots (10)$$

$G_{20^{\circ}\text{C}}$ = Gravedad específica corregida a 20° C

K = Relación entre densidades del agua

Figura 24. Ensayo de Peso Específico.



Fuente: Elaboración propia

Los resultados para la muestra se muestran en la tabla 15:

Tabla 15. Gravedad Específica a la temperatura de 20° C.

Recipiente de evaporacion No	81
Picnometro No	1
Temperatura (oC)	16
Peso especifico del agua a 18 oC (Gt) (gr)	0,9990
Peso picnometro + agua + suelo (W1) (gr)	169,45
Peso recipiente + suelo seco (Wa) (gr)	119,9
Peso del recipiente (Wb) (gr)	80,27
Peso del suelo seco (Ws=Wa-Wb) (gr)	39,63
Peso del picnometro lleno de agua a temperatura i oC (W2) (gr)	144,470
Factor de correccion a 20 oC Kt (adimencional)	1,000801443
Peso especifico del suelo (Gs=(Kt Ws)/(Ws -W1+W2))(adimencional)	2,707
Peso especifico del suelo (Gs=(Gt Ws)/(Ws -W1+W2))(adimencional)	2,702

Fuente: Elaboración propia

3.6.1.5. Clasificación del Suelo.

Para la clasificación SUCS se consideró la granulometría, los porcentajes pasantes la malla N°4, N°200 y las características plásticas. La identificación del tipo de suelo por el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS se lleva a cabo a partir de la utilización del diagrama de flujo indicado en la tabla 16 se aprecia:

Tabla 16. Sistema de clasificación SUCS.

Gráfica de la Unified Soil Classification (según la ASTM, 2009) (ASTM D2487-98: Práctica estándar para la clasificación de suelos para fines ingenieriles (Unified Soil Classification). Derechos de autor de la ASTM INTERNATIONAL. Reimpresa con permiso).

Criterios para asignar símbolos y nombres de grupo utilizando pruebas de laboratorio ^a				Clasificación del suelo		
				Símbolo de grupo	Nombre de grupo ^b	
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en la malla núm. 200	Gravas Más de 50% de la fracción gruesa retenida en la malla núm. 4	Gravas limpias	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	GW	Grava bien graduada ^d	
		Menos de 5% finos ^e	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$	GP	Grava mal graduada ^d	
	Gravas con finos Más de 12% finos ^e	Los finos se clasifican como ML o MH		GM	Grava limosa ^{f, g, h}	
		Los finos se clasifican como CL o CH		GC	Grava arcillosa ^{f, g, h}	
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa la malla núm. 4	Arenas limpias	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$	SW	Arena bien graduada ⁱ	
		Menos de 5% finos ^d	$C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^c$	SP	Arena mal graduada ⁱ	
Arena con finos Más de 12% finos ^d		Los finos se clasifican como ML o MH		SM	Arena limosa ^{f, g, h, i}	
		Los finos se clasifican como CL o CH		SC	Arena arcillosa ^{f, g, h, i}	
Suelos de grano fino 50% o más pasa la malla núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánicos	$IP > 7$ y se encuentra en o arriba de la línea "A" ^j	CL	Arcilla de baja compresibilidad ^{k, l, m}	
			$IP < 4$ o se encuentra debajo de la línea "A" ^j	ML	Limo de baja compresibilidad ^{k, l, n}	
	Orgánicos	$\frac{\text{Límite líquido—secado en horno}}{\text{Límite líquido—no secado}} < 0.75$		OL	Arcilla orgánica ^{k, l, m, o}	
					Limo orgánico ^{k, l, m, o}	
	Limos y arcillas Límite líquido 50 o mayor	Inorgánicos	IP se encuentra en o arriba de la línea "A"		CH	Arcilla de alta compresibilidad ^{k, l, m, o}
			IP se encuentra debajo de la línea "A"		MH	Limo de alta compresibilidad ^{k, l, m, o}
Orgánicos		$\frac{\text{Límite líquido—secado en horno}}{\text{Límite líquido—no secado}} < 0.75$		OH	Arcilla orgánica ^{k, l, m, p}	
					Limo orgánico ^{k, l, m, q}	
Suelos altamente orgánicos	Principalmente materia orgánica, de color oscuro y olor orgánico			PT	Turba	

Fuente: Braja M. Das 2016

Del cual se determinó que el suelo corresponde a **CL** arcilla con baja compresibilidad.

Para la clasificación AASHTO se consideró la granulometría, los porcentajes pasantes de la malla N°200 y las características plásticas.

Tabla 17. Procedimiento la clasificación de suelo método de la AASHTO.

DIVISIÓN GENERAL	Materiales Granulares (pasa menos del 35% por el tamiz ASTM #200)							Materiales Limo-arcillosos (más del 35% por el tamiz ASTM #200)				
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7	
GRUPO	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5	A-7-6
Subgrupo												
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (% que pasa por cada tamiz)												
Serie ASTM	#10	≤ 50										
	#40	≤ 30	≤ 50	≥ 51								
	#200	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≥ 36	≥ 36	≥ 36	≥ 36
ESTADO DE CONSISTENCIA (de la fracción de suelo que pasa por el tamiz ASTM #40)												
Limite líquido			NP	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	≥ 41	≤ 40	>41 (IP<LL-30)	>41 (IP>LL-30)
Índice de plasticidad	≤ 6			≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≤ 10	≤ 10	≥ 11	≥ 11	≥ 11
ÍNDICE DE GRUPO	0	0	0	≤ 4		≤ 8	≤ 12	≤ 20	≤ 20			
TIPOLOGÍA	Fragmentos de piedra, grava y arena		Arena fina	Gravas y arenas limosas o arcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos		
CALIDAD	EXCELENTE A BUENA						ACEPTABLE A MALA					

Fuente: Braja M. Das 2016

$$IG = (F_{200} - 35) (0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01(F_{200} - 15) (IP - 10) \dots\dots\dots(11)$$

$$IG = 6$$

Donde:

F₂₀₀ = % que pasa el tamiz 200

LL = limite liquido

IP = índice de plasticidad

De acuerdo a la tabla N°17, el suelo se clasifica según el Sistema AASHTO

como: **A-4 (6)**

3.6.2. Ensayos Mecánicos.

3.6.2.1. Compactación Proctor Modificado ASTM T-180-90 AASHTO T 180D.

Objetivo. – La compactación de suelos es el proceso mecánico por el cual se produce una disminución del volumen total del material con el siguiente aumento del grado de compacidad y sus propiedades mecánicas con aplicaciones fundamentales en carreteras, presas de tierras, pistas de aterrizaje, etc. El procedimiento es parte del concepto de mejoramiento del suelo.

Cálculos a realizar.

- Cálculo del contenido de humedad y la masa seca.

$$w = \frac{(A-B)}{(B-C)} * 100 \dots\dots\dots (12)$$

$$W = \frac{W1}{(w+100)} * 100 \dots\dots\dots (13)$$

Dónde:

w: % de humedad en el espécimen.

A: masa del contenedor y suelo húmedo.

B: masa del contenedor y suelo seco.

C: masa del contenedor.

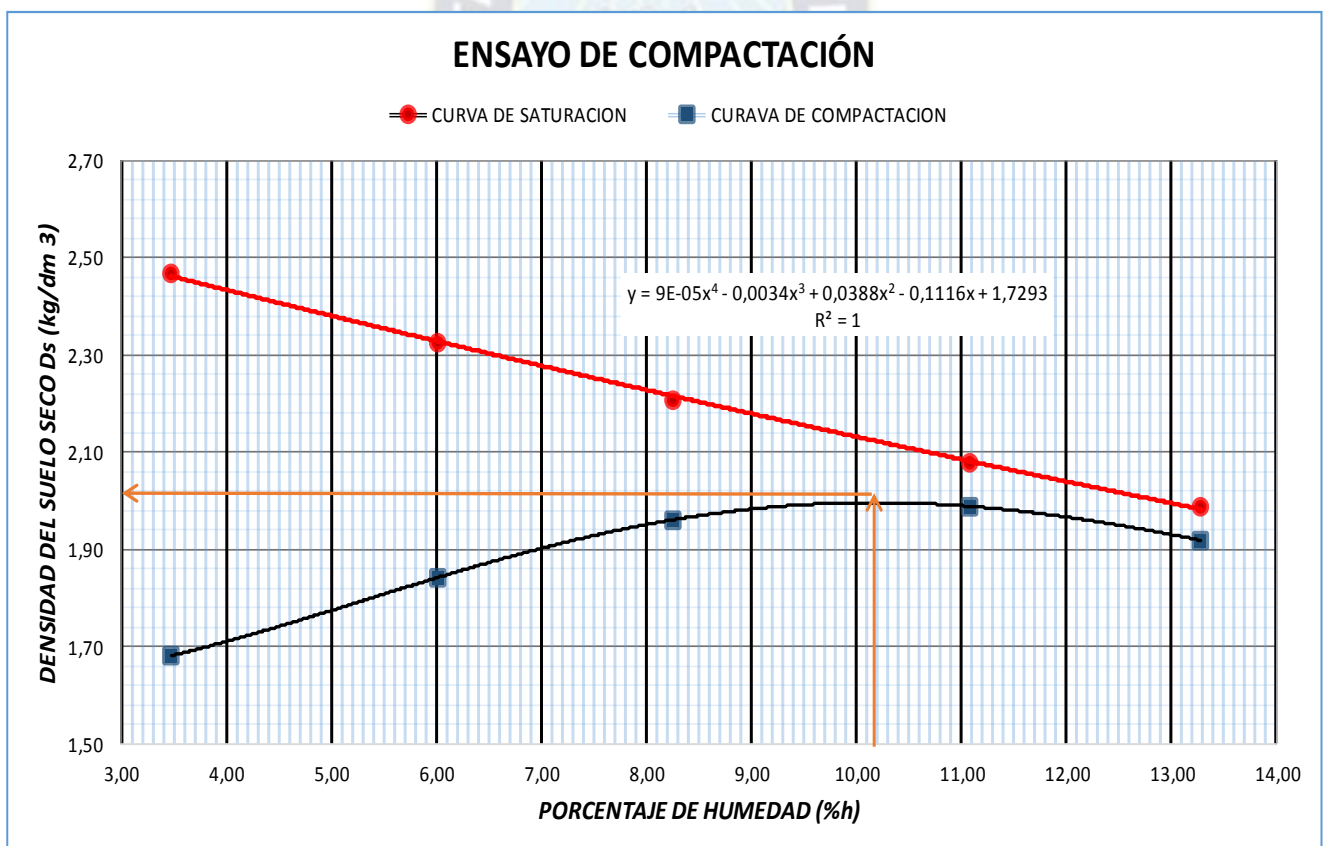
W: densidad húmeda [lb/pie3] o [Kg/m3].

W1: densidad húmeda [lb/pie3] o [Kg/m3]

Para cada muestra compactada. Las densidades con sequedad de horno del suelo deben ser marcadas como ordenadas y los contenidos de humedad como abscisas. Cuando los contenidos de humedad y densidad han sido marcados como lo indicado se verá que conectando los puntos se forma una curva. El contenido de humedad correspondiente al punto más alto de la curva debe ser llamado contenido óptimo de humedad del suelo bajo compactación.

Los resultados son los siguientes.

Figura 25. Curva de compactación Suelo Natural.



HUMEDAD OPTIMA

10,10

DENSIDAD SECA MAXIMA

2,00

Fuente: Elaboración propia.

Figura 26. Molde para la compactación.



Fuente: Elaboración propia.

3.6.2.2. Relación Soporte California "CBR" AASHHTO T-193.

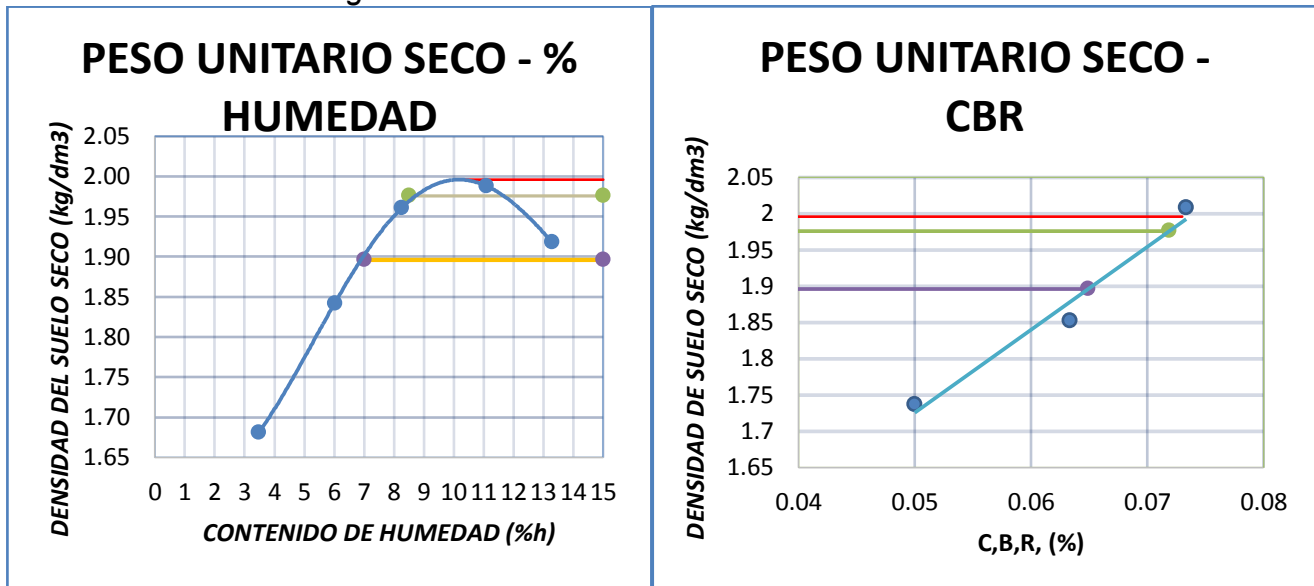
Objetivo. - El método de ensayo tiene la intención de determinar los valores de soporte de suelos y el suelo agregado cuando estos últimos son compactados en un laboratorio a contenidos óptimos de humedad para grados variables de densidad. El ensayo es útil para evaluar suelos de terraplén (sub-rasante), y algunos materiales de capa base y súbbase que contengan pequeñas cantidades de material retenido en el tamiz de 19 [mm] (3/4").

Tabla 18. Expansión del suelo.

FECHA	HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO EN DIAS	MOLDE N°1		MOLDE N°2		MOLDE N°3	
			LECTURA	%	LECTURA	%	LECTURA	%
21/4/2019	13:00	0	85		9		16	
22/4/2019	13:00	1						
23/4/2019	13:00	2	240		212,5		200	
24/4/2019	13:00	3	250		243		244	
25/4/2019	13:00	4	262	3,54	252	4,86	256	4,8

Fuente: Elaboración propia.

Figura 27. Curva humedad-densidad seca-CBR.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 19. Valores de CBR.

CBR 100%=	0,073
CBR 97%=	0,072
CBR 95%=	0,065

Fuente: Elaboración propia.

3.6.3. Ensayos Químicos.

3.6.3.1. Análisis de Materia Orgánica.

Objetivo. - El objetivo del ensayo es determinar el contenido de materia orgánica, fácilmente oxidadas en muestras de suelos. La materia orgánica es una mezcla heterogénea de sustancias de origen vegetal, animal y microbiano que, dentro del suelo, influyen sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas. El ensayo es basa en método que utiliza dicromato de potasio el cual se va reduciendo debido a la materia orgánica presente en el suelo (se produce la oxidación de dicromato de potasio en medio de ácido sulfúrico). Una consideración

previa para el ensayo es confirmar que no existan sales de cloro ya que pueden ser la fuente de errores, si existiera se deberá eliminar las sales solubles. En la siguiente tabla 20, se muestra los niveles de materia orgánica que está planteado en el manual de suelos y pavimentos para la estabilización de suelos con cal:

Tabla 20. Nivel de contenido de materia Orgánica

Nivel contenido	de Porcentaje de masa Orgánica
Factible	0 – 3 %
No Factible	Más de 3 %

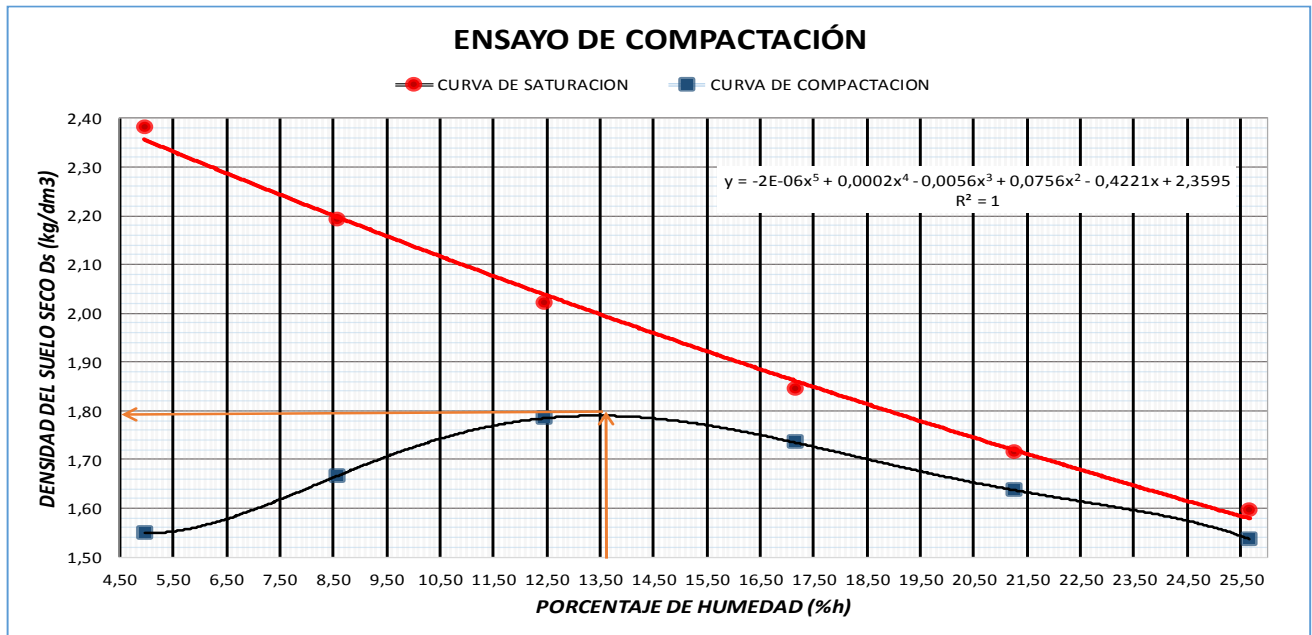
Fuente: Elaboración propia.

3.7. Ensayo suelo cal y CCA.

3.7.1. Compactación Proctor Modificado (AASHTO T 180 D).

A continuación, se muestra la curva de compactación para distintos de mezcla de suelo, cal (5%) y ceniza de cascara de arroz (3%).

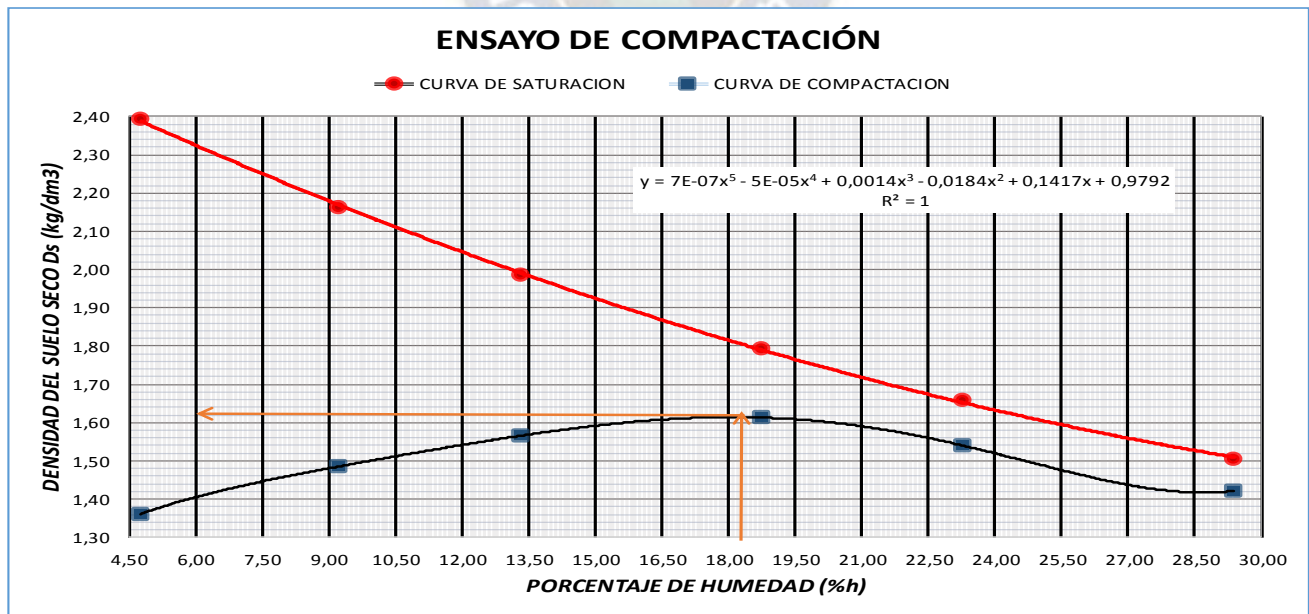
Figura 28. Curva de compactación para 5% de cal, 3% CCA y 92% de suelo.



HUMEDAD OPTIMA	13,50	DENSIDAD SECA MAXIMA	1,79
----------------	-------	----------------------	------

Fuente: Elaboración propia.

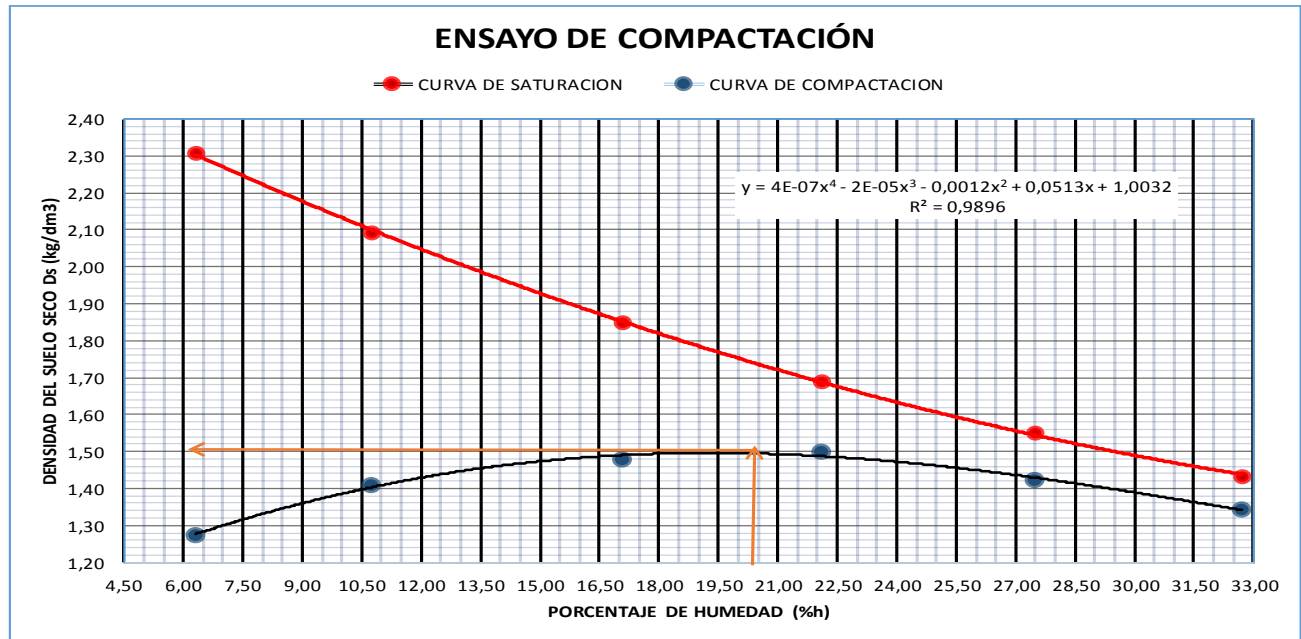
Figura 29. Curva de compactación para 5% de cal, 10% de CCA y 85% de suelo.



HUMEDAD OPTIMA	17,50	DENSIDAD SECA MAXIMA	1,61
----------------	-------	----------------------	------

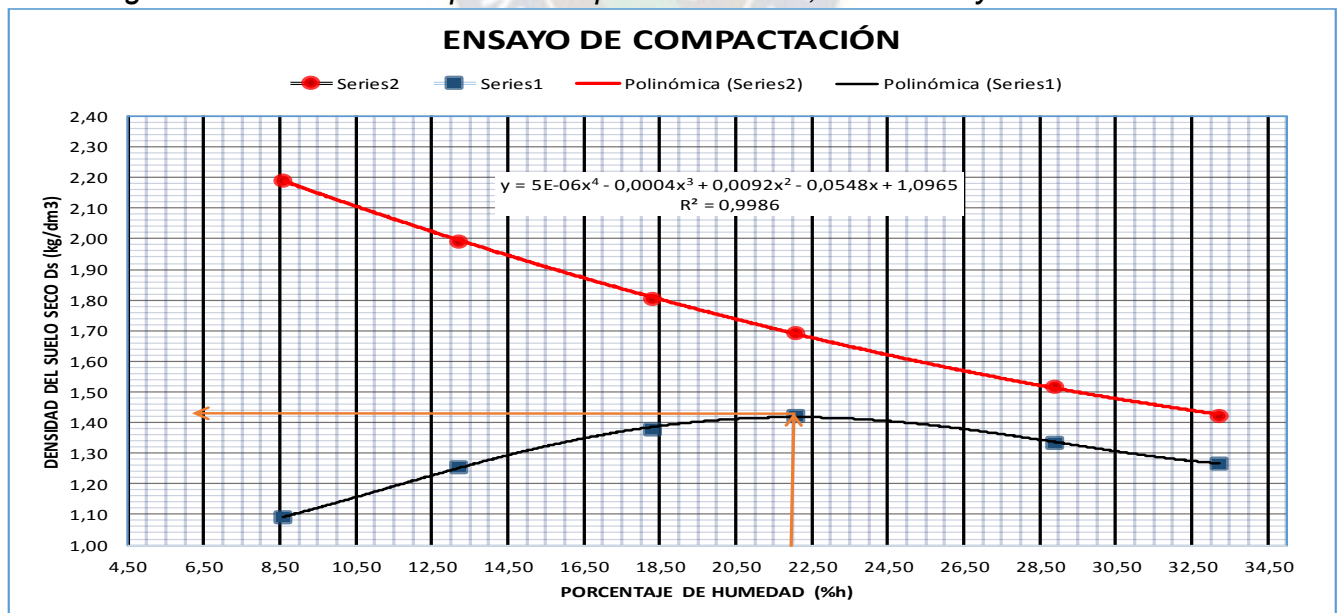
Fuente: Elaboración propia.

Figura 30. Curva de compactación para 5% de cal, 15% de CCA y 80% de suelo.



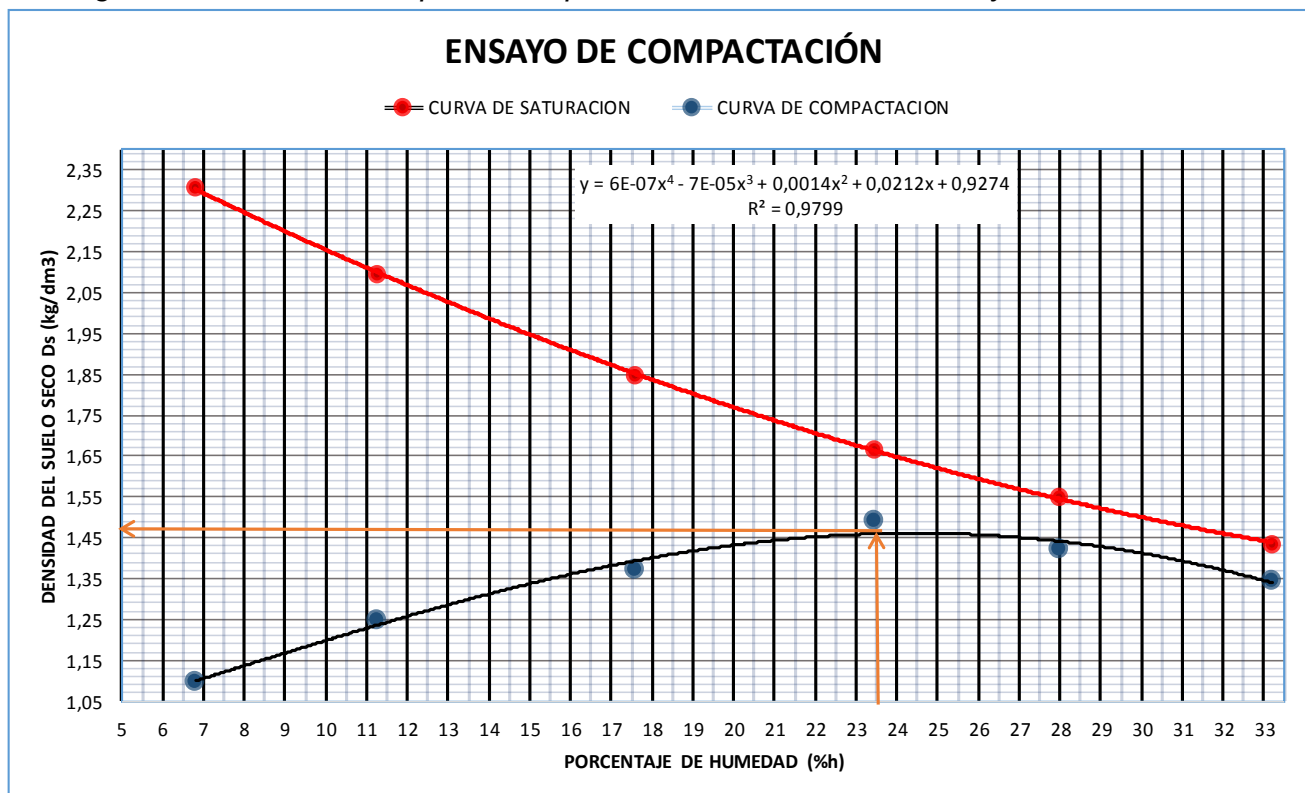
Fuente: Elaboración propia.

Figura 31. Curva de compactación para 5% de cal, 20% CCA y 75% de suelo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 32. Curva de compactación para 5% de cal, 25% de CCA y 70% de suelo



HUMEDAD OPTIMA	23,50	DENSIDAD SECA MAXIMA	1,49
----------------	-------	----------------------	------

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2. Relación Soporte California (C.B.R.) de suelo, cal y CCA

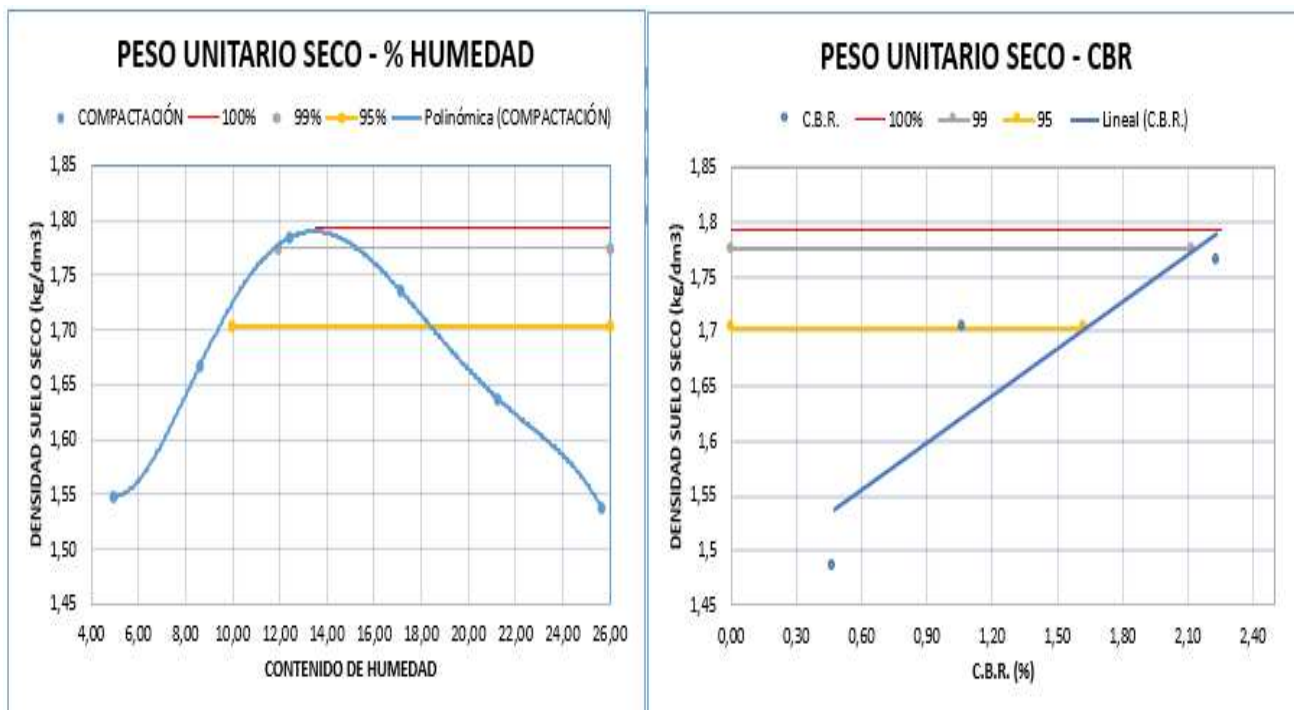
Se determinaron los valores de la Relación del Soporte California para las mezclas de suelo, cal (5%), variando CCA, en 3%, 10%, 15%, 20% y 25%

Tabla 21. Expansión del suelo con 3% de CCA.

FECHA	HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO EN DIAS	MOLDE N°1		MOLDE N°2		MOLDE N°3	
			LECTURA EXTENSOMETR	%	LECTURA EXTENSOMETR	%	LECTURA EXTENSOMETRO	%
21/4/2019	13:00	0	30		32		88	
22/4/2019	13:00	1						
23/4/2019	13:00	2	59		63		103	
24/4/2019	13:00	3	65		69		109	
25/4/2019	13:00	4	67	0,74	71	0,78	110	0,44

Fuente: Elaboración propia.

Figura 33. Curva humedad-densidad seca-CBR, para 3% de CCA.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 22. Valores de CBR para un contenido de 3% de CCA.

CBR 100%=	2,233
CBR 97%=	2,121
CBR 95%=	1,621

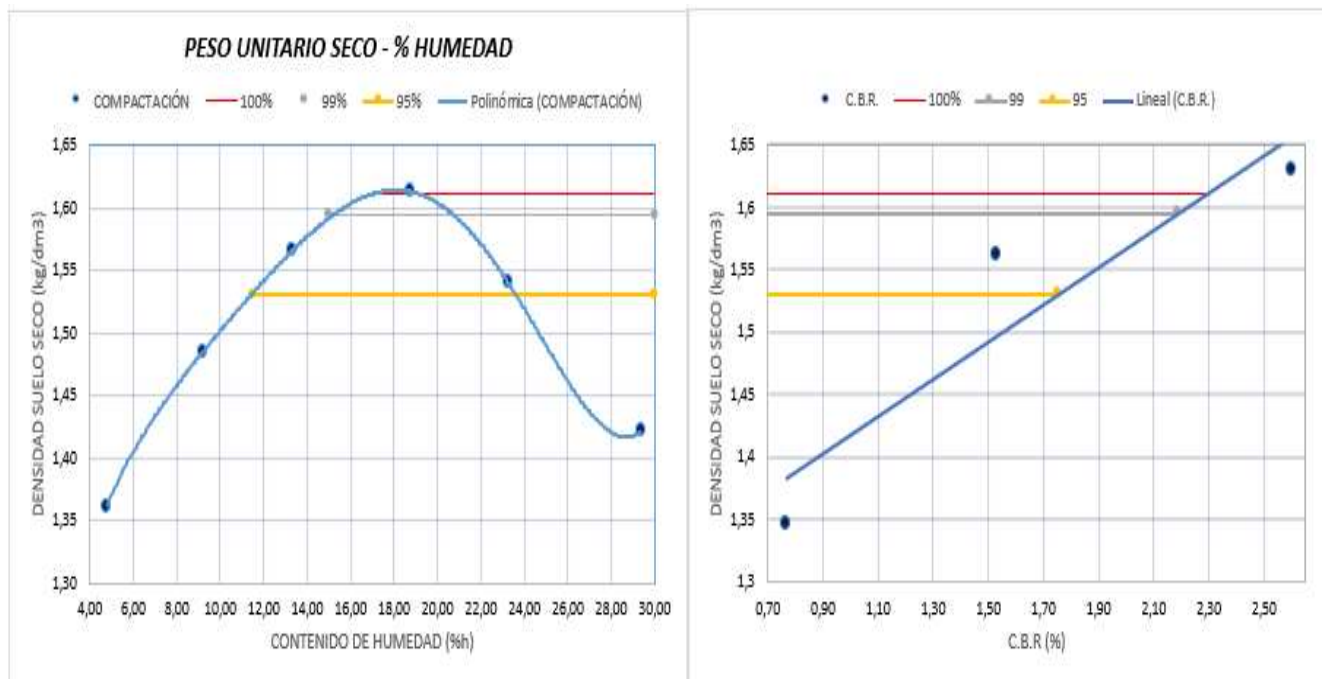
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 23. Expansión del suelo con 10% de CCA.

FECHA	HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO EN DIAS	MOLDE N°1		MOLDE N°2		MOLDE N°3	
			LECTURA	%	LECTURA	%	LECTURA	%
21/4/2019	13:00	0	82		34		3	
22/4/2019	13:00	1						
23/4/2019	13:00	2	109		55		16	
24/4/2019	13:00	3	114		62		22	
25/4/2019	13:00	4	117	0,7	65	0,62	26	0,46

Fuente: Elaboración propia.

Figura 34. Curva humedad-densidad seca-CBR, para 10% de CCA.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 24. Valores de CBR para un contenido de 10% de CCA.

CBR 100% =	2,600
CBR 97% =	2,187
CBR 95% =	1,755

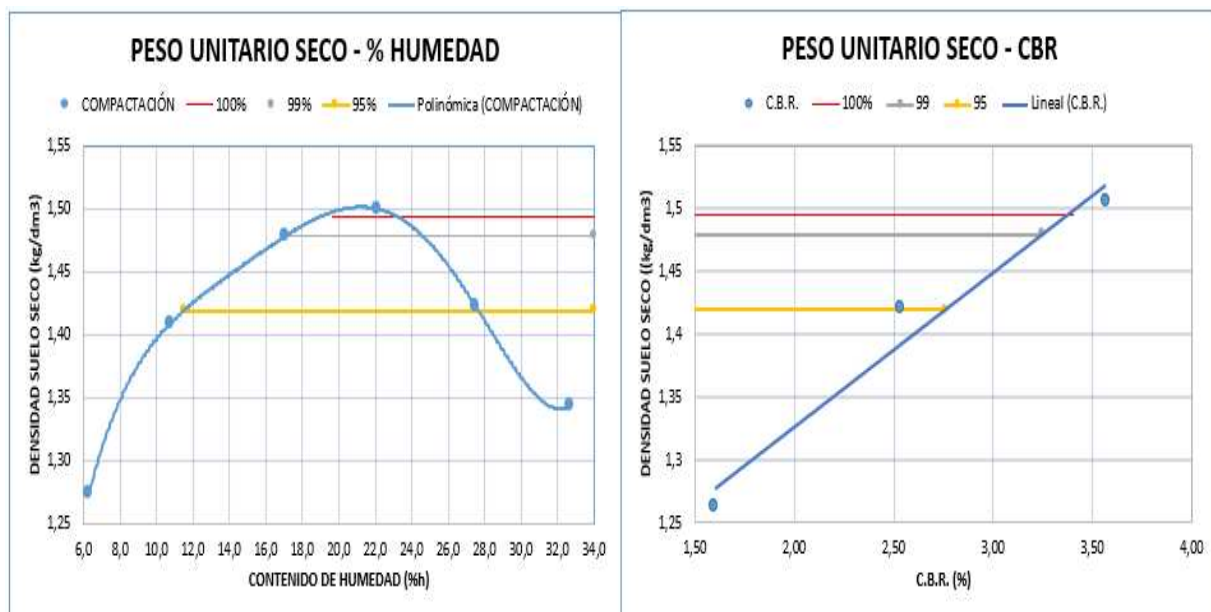
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 25. Expansión del suelo con 15% de CCA.

FECHA	HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO EN DIAS	MOLDE Nº1		MOLDE Nº2		MOLDE Nº3	
			LECTURA	%	LECTURA	%	LECTURA	%
21/4/2019	13:00	0	95		18		49	
22/4/2019	13:00	1						
23/4/2019	13:00	2	112		30		62	
24/4/2019	13:00	3	116		32		64	
25/4/2019	13:00	4	119	0,48	33	0,3	65	0,32

Fuente: Elaboración propia.

Figura 35. Curva humedad-densidad seca-CBR, para 15% de CCA.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 26. Valores de CBR para un contenido de 15% de CCA.

CBR 100% =	3,567
CBR 97% =	3,247
CBR 95% =	2,760

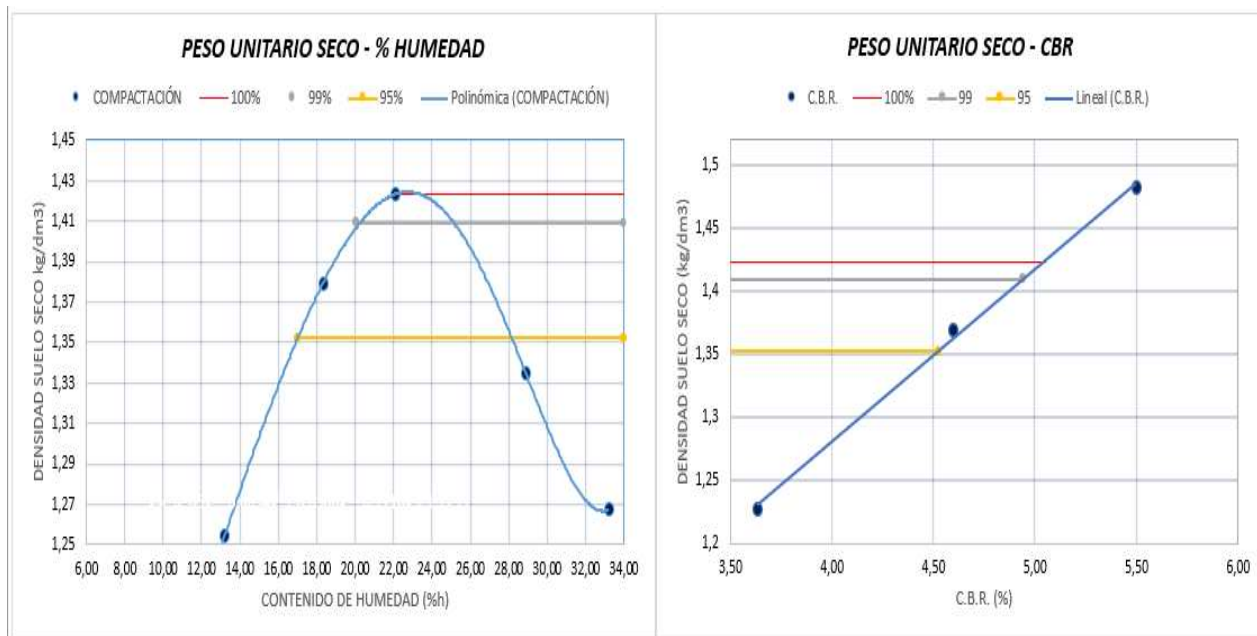
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27. Expansión del suelo con 20% de CCA.

FECHA	HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO EN DIAS	MOLDE N°1		MOLDE N°2		MOLDE N°3	
			LECTURA	%	LECTURA	%	LECTURA	%
21/4/2019	13:00	0	111		22		65	
22/4/2019	13:00	1						
23/4/2019	13:00	2	115		26		68	
24/4/2019	13:00	3	119	0,48	28	0,3	70	0,32
25/4/2019	13:00	4	125	0,28	31	0,18	73	0,16

Fuente: Elaboración propia.

Figura 36. Curva humedad-densidad seca-CBR, para 20% de CCA.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28. Valores de CBR para un contenido de 20% de CCA.

CBR 100%=	5,500
CBR 97%=	4,943
CBR 95%=	4,527

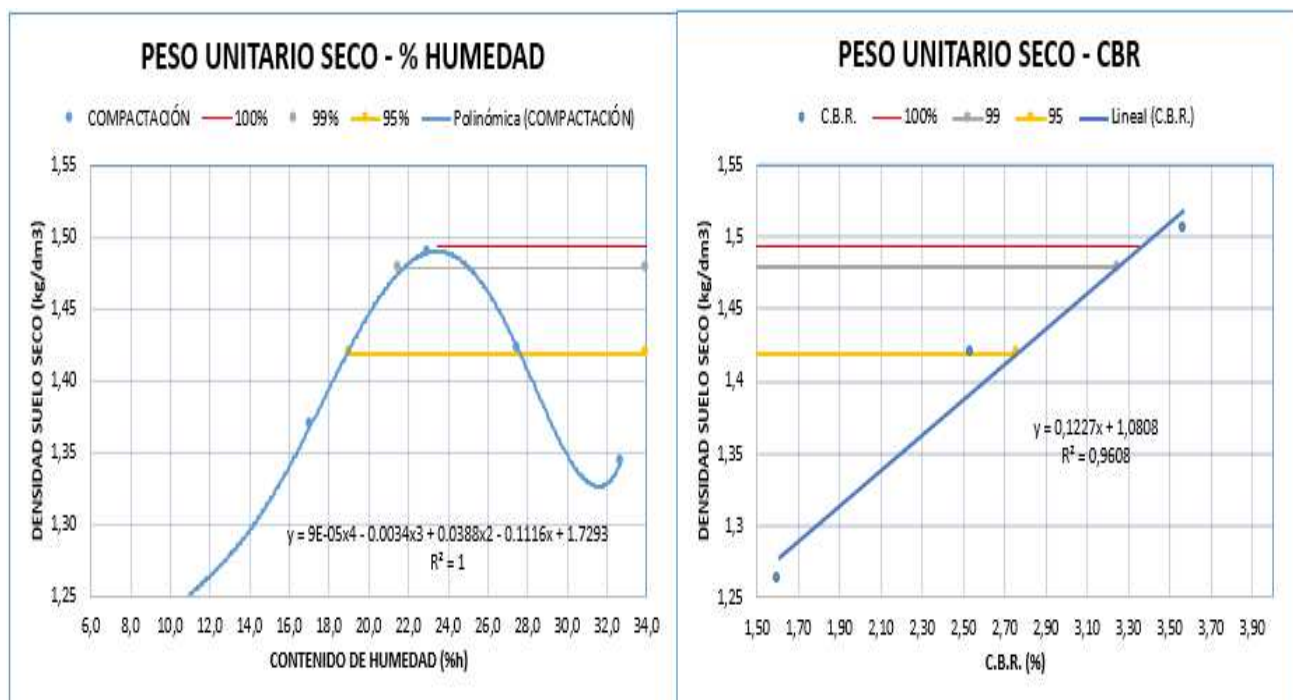
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 29. Expansión del suelo con 25% de CCA.

FECHA	HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO EN DIAS	MOLDE N°1		MOLDE N°2		MOLDE N°3	
			LECTURA	%	LECTURA	%	LECTURA	%
21/4/2019	13:00	0	95		18		49	
22/4/2019	13:00	1						
23/4/2019	13:00	2	112		30		62	
24/4/2019	13:00	3	116		32		64	
25/4/2019	13:00	4	119	0,48	33	0,3	65	0,32

Fuente: Elaboración propia.

Figura 37. Curva humedad-densidad seca-CBR, para 25% de CCA.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30. Valores de CBR para un contenido de 25% de CCA.

CBR 100% =	3,567
CBR 97% =	3,247
CBR 95% =	2,760

Fuente: Elaboración propia.

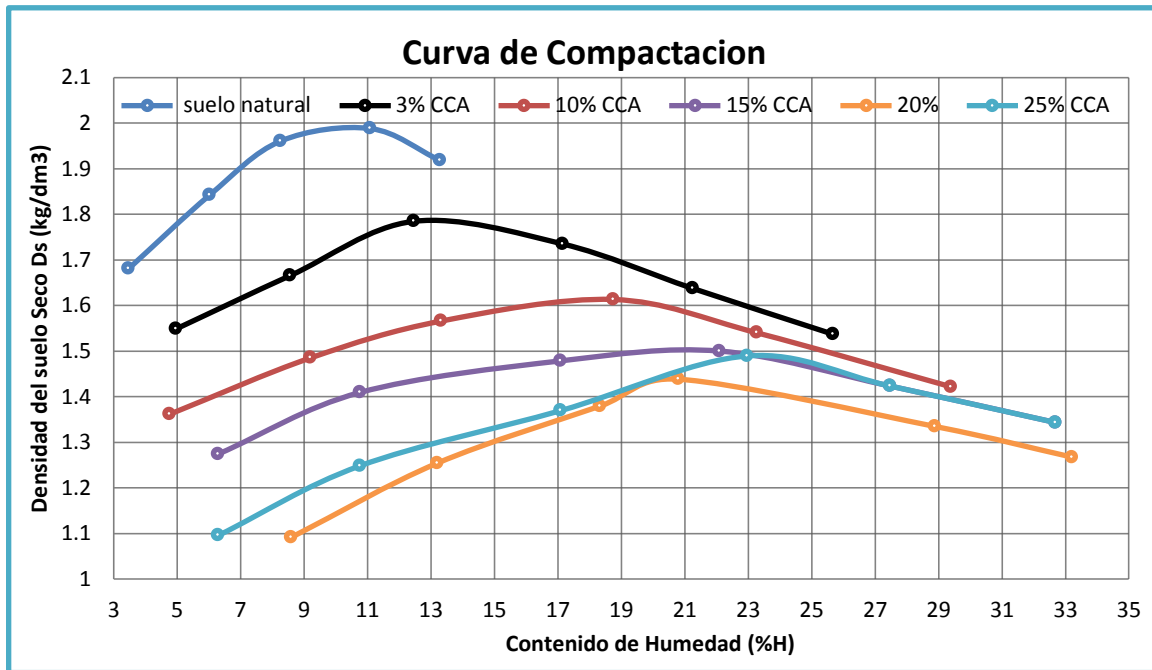
3.8. Resultados.

Tabla 31. Compactación a diferentes % CCA.

CCA%	Compactación	
	Densidad	Humedad
0	2,00	10,10
3	1,79	13,50
10	1,61	17,50
15	1,49	19,65
20	1,42	22,10
25	1,49	19,65

Fuente: Elaboración propia.

Figura 38. Comparación de Curvas de Compactación en función de %CCA



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la figura 38. se observa que según a las combinaciones de ceniza de cascara de arroz, se obtiene que al adicionar más ceniza de cascara de arroz, a partir de la combinación de 20 % contenido de CCA, necesita que se adicione más agua, es nos da como resultado que para las combinaciones con ceniza de cascara de arroz, el óptimo contenido de humedad se obtiene adicionando 20 % de ceniza de cascara de arroz.

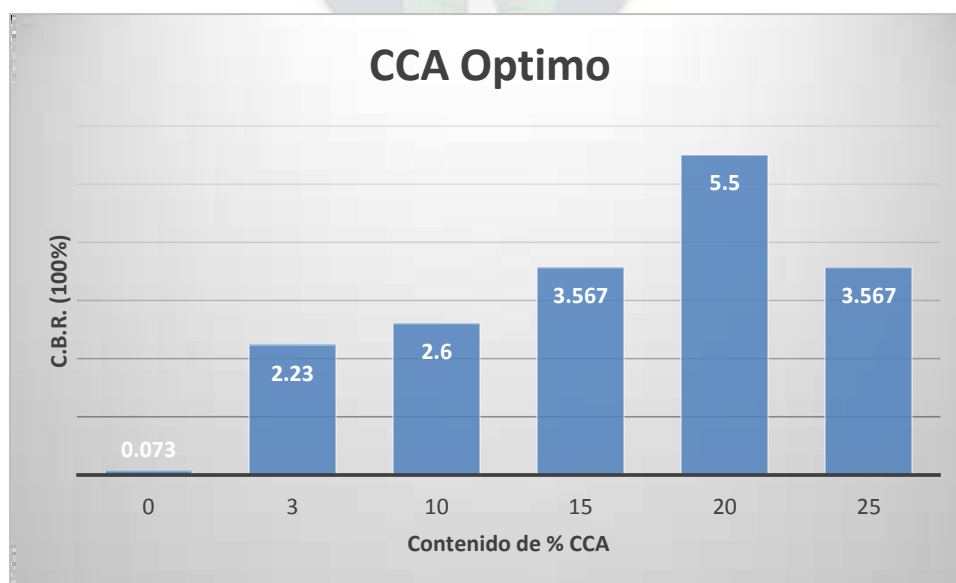
Tabla 32. C.B.R. a diferentes %CCA

CCA%	CRB		
	95%	97%	100%
0	0,065	0,072	0,073
3	1,621	2,121	2,233
10	1,755	2,187	2,600
15	2,760	3,247	3,567
20	4,527	4,943	5,500
25	2,760	3,247	3,567

Fuente: Elaboración propia.

De estos resultados el máximo CBR se logró con el 20 %, el CBR incremento de 0.07% hasta un valor de 5.5%.

Figura 39. Contenido Optimo de %CCA.



Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones.

- La influencia de la ceniza de cascara de arroz (CCA) influye favorablemente en suelos expansivos como es el caso del suelo arcilloso, en la estabilización del suelo para formar suelos más firmes para así poder ser utilizados en la construcción de subrasante, el cual se reflejó formando una masa compacta y el aumento de grado de compactación y por lo tanto el incremento del CBR de una forma representativa.
- Las propiedades físico-mecánicas de la muestra del suelo arcilloso (CL) la cual se identificó como suelo arcilloso según el Sistema Unificado de Clasificación de suelos (SUCS), así mismo el CBR en estado natural dando los siguientes valores de:

Tabla 19. Valores de CBR suelo natural.

CBR 100% =	0.073
CBR 97% =	0.072
CBR 95% =	0.065

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en los resultados el suelo arcilloso era prácticamente un suelo con propiedades físico-mecánicas bajas el cual no podía ser utilizado en la construcción de obras viales.

- Se demostró que mientras el % de CCA sube, la resistencia es directamente proporcional hasta un contenido de 20 % de CCA, si se sigue incrementando el contenido de % CCA mayor a 20 % CCA el C.B.R. baja.
- Se logró determinar el porcentaje de CCA de acuerdo a los resultados obtenidos de CBR, el cual dio un valor mayor del CBR para un 20% de CCA. Al seguir incrementando el contenido de CCA a 25% el CBR va en disminución.
- Se realizaron los ensayos de las propiedades físico-mecánicas del suelo natural, así como el suelo con adición de la ceniza de cascara de arroz y 5% de cal: resultados que se presenta a continuación:

Tabla 33. Valores de compactacion para contenidos de 3%, 10%, 15%, 20% y 25% de CCA.

CCA%	CRB			Compactacion	
	95%	97%	100%	Densidad	Humedad
0	0,065	0,072	0,073	2,00	10,10
3	1,621	2,121	2,233	1,79	13,50
10	1,755	2,187	2,600	1,61	17,50
15	2,760	3,247	3,567	1,49	19,65
20	4,527	4,943	5,500	1,42	22,10
25	2,760	3,247	3,567	1,49	19,65

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede ver los resultados la adición de CCA aporta un comportamiento mucho mejor para el CBR a comparación del suelo natural, el CBR era técnicamente nulo y con la adición de la ceniza de cascara de arroz mejoro relevantemente.

- Con los resultados ya obtenidos durante los ensayos de laboratorio, así como el trabajo de gabinete, se pudo llegar a la conclusión de que la ceniza de cascara de arroz es un material estabilizante para suelos con bajo CBR.

4.2. Recomendaciones.

Es importante señalar que el suelo en estudio necesita de algún tipo de tratamiento previo a su utilización para la construcción de obras viales, ya que por la baja presencia de material granular y alto porcentaje de partículas finas, es un material que presenta características desfavorables para la utilización.

Se recomienda aplicar la técnica de estabilización de suelos-ceniza de cascara de arroz-cal para mejorar características de suelos expansivos como la disminución de la plasticidad, aumento de la capacidad de soporte, aumento de las resistencias mecánicas, mejora de la impermeabilidad y aumento de resistencia a los ciclos de humedecimiento y secado. Sin embargo, antes de seleccionar el tipo de estabilización y el aditivo a utilizar es preciso conocer las características del suelo, siendo recomendable que la adición de material de la ceniza de cascara de arroz se lo realice preferiblemente en suelo con alta presencia de material fino (material que pase el tamiz 200), ya que por sus características.

Además de ser muy buena alternativa de bajo costo, al evitar los altos costos de transporte de suelo seleccionado, menor impacto ambiental evitando explotación de canteras y mantenimiento.

Por la experiencia desarrollada en la obtención de la ceniza de cascara de arroz, se recomienda tener mucho cuidado con la temperatura de combustión así mismo el tiempo en el que debe estar a cierta temperatura.

Como se demostró en la presente investigación, la ceniza de cáscara de arroz resultó un estabilizador para suelos arcillosos, logrando que mejore su resistencia.

Por lo que se recomienda continuar con las investigaciones con diferentes suelos.

4.3. Bibliografía.

- Ing. Víctor Bermejo Franco- Ing. Luis Pacosillo Ticona; Guía de laboratorio de mecánica de suelos I; La Paz-Bolivia; primera edición 2013
- Ing. Víctor Bermejo Franco -Ing. Hernán Flores; Guía de laboratorio de mecánica de suelos II; La Paz-Bolivia; primera edición 2013
- Administradora Boliviana de Carreteras; Manual de ensayos de suelos y materiales Suelos; La Paz-Bolivia.
- Administradora Boliviana de Carreteras; Manual de especificaciones técnicas generales para la construcción; La Paz-Bolivia.
- BRAJA M. DAS. Fundamentos de ingeniería geotecnia. 4ª. ed. México: Thomson, 2015. 636 pp. ISBN: 978-607-519-372-4IECA. (s.f.).
- Estabilización Química de Suelos: Aplicaciones en la construcción de estructuras de pavimentos.
- VALORACIÓN DE LAS CENIZAS DE CARBÓN PARA LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS MEDIANTE ACTIVACIÓN ALCALINA Y SU USO EN VÍAS NO PAVIMENTADAS: proyecto de grado de la Universidad de MEDELLIN colombia
- Hernán de Solminihac T; Gerardo Echeverría G; Guillermo Thenoux Z.

- LA UTILIZACIÓN DE CÁSCARA DE ARROZ BAJO EL PROCESO DE CALCINACIÓN CONTROLADA COMO PUZOLANA ARTIFICIAL EN EL DISEÑO DE MORTEROS PARA ACABADOS: Proyecto de Grado de la universidad de SAN CARLOS DE GUATEMALA.

ANEXO A
ENSAYOS DE LABORATORIO DEL SUELO NATURAL

ANEXO A-1
CONTENIDO DE UMEDAD (ASTM D2216-98)

Pesos	Humedad Natural		
Capsula No.	30	5	19
Capsula + suelo húmeda (g) (P1)=	1091,66	1065,80	1052,30
Capsula + suelo seco (g) (P2)=	1033,10	1010,30	995,60
Peso del agua (g) (Pa = P1 - P2)=	58,56	55,50	56,70
Peso de la capsula (g) (Pc)=	222,61	222,61	222,61
Peso suelo seco (g) (P2 - Pc) = (Ps)=	810,49	787,69	772,99
Contenido de humedad (Pa/Ps)*100 = (%Hh)	7,23	7,05	7,34

ANEXO A-2
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO (ASTM D422,
AASHTO T88)

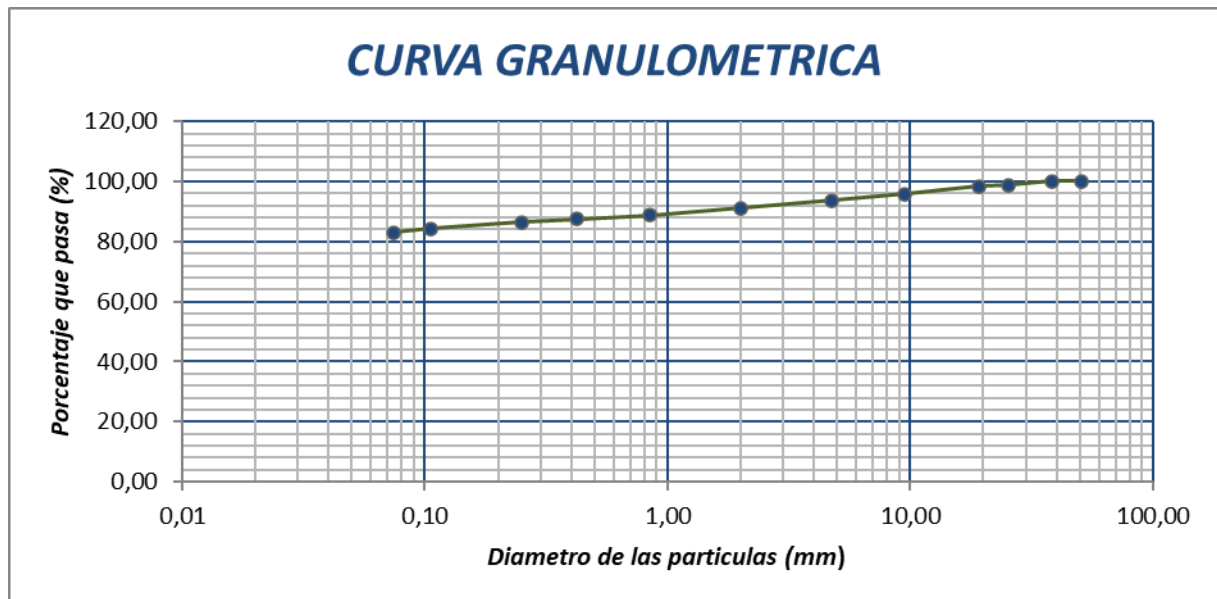
GRANULOMETRÍZ POR TAMIZADO				
Pesos	Humedad Natural	Humedad Higroscópica	PESO SECO DE LA MUESTRA TOTAL	
Capsula No.	30	139	Peso total de la muestra húmeda (g)	8229,00
Capsula + suelo húmeda (g) (P1)=	1091,66	165,81	Peso muestra retenida tamiz No. 10 (g)	725,81
Capsula + suelo seco (g) (P2)=	1033,10	165,00	Peso muestra que pasa tamiz No. 10 (g)	7503,19
Peso del agua (g) (Pa = P1 - P2)=	58,56	0,81	Peso del agua (g)	60,78
Peso de la capsula (g) (Pc)=	222,61	65,81	Peso muestra seca que pasa tamiz No. 10 (g)	7442,41
Peso suelo seco (g) (P2 - Pc) = (Ps)=	810,49	99,19	Peso de la muestra total seca (g)	8168,22
Contenido de humedad (Pa/Ps)*100 = (%Hh)	7,23	0,82		

ANÁLISIS DEL AGREGADO GRUESO					
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	% Parcial Retenido	% Retenido Acumulado	% Pasa Total
2"	50,80		0,00	0,00	100,00
1 1/2"	38,10		0,00	0,00	100,00
1"	25,40	96,19	1,18	1,18	98,82
3/4"	19,10	27,8	0,34	1,52	98,48
3/8"	9,52	214,76	2,63	4,15	95,85
No. 4	4,76	176,29	2,16	6,31	93,69
No. 10	2,00	210,77	2,58	8,89	91,11
Total		725,81			

ANÁLISIS MECANICO DEL MORTERO	
Peso muestra húmeda (g)	100,00
Peso muestra seca (g)	99,19

ANÁLISIS DEL AGREGADO FINO						
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido (g)	% Parcial Retenido	% Retenido Acumulad	% Pasa Acumulado	% Pasa Total
No. 10	2,00					91,11
No.20	0,84	2,65	2,67	2,67	97,33	88,68
No.40	0,42	1,31	1,32	3,99	96,01	87,48
No.60	0,25	1,09	1,10	5,09	94,91	86,48
No.140	0,105	2,46	2,48	7,57	92,43	84,22
No.200	0,074	1,33	1,34	8,91	91,09	82,99
Total		8,84				

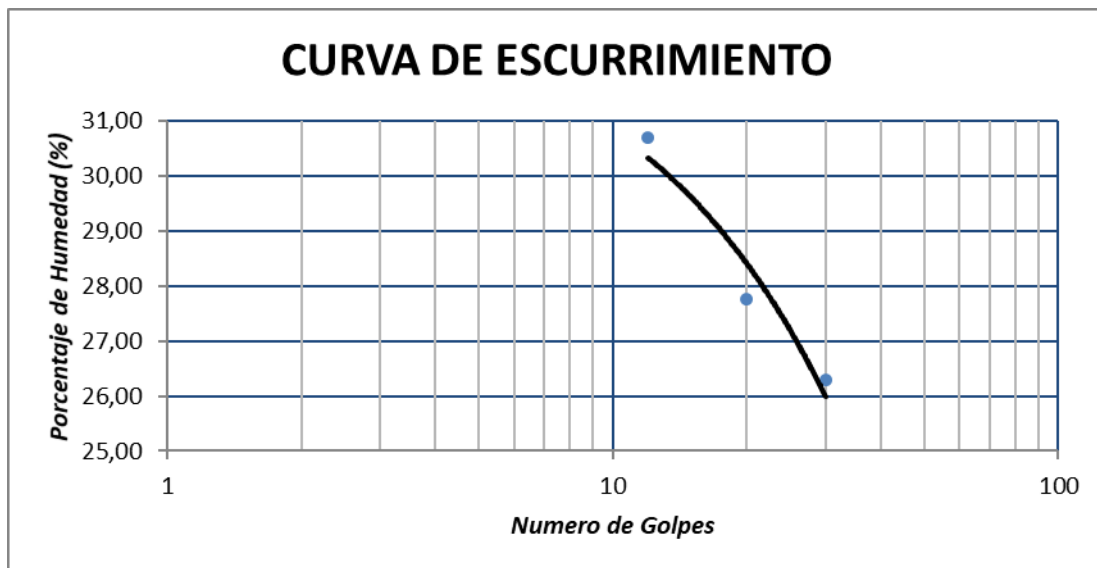
CARACTERÍSTICAS DE LA GRANULOMETRÍA			
D10 =	0,008	Cu =	62,50
D30 =	0,018	Cc =	0,08
D60 =	0,50		
GRAVA	(%)		6
ARENA	(%)		11
FINO	(%)		83
TOTAL	(%)		100,00



ANEXO A-3

LIMITES DE ATTERBERG DE CONSISTENCIA DEL SUELO ASTM D424 - 59

LIMITES DE ATTERBERG			
LIMITE LIQUIDO			
Cápsula N°	41	42	52
N° de Golpes	30	20	12
Suelo húmedo + cápsula (Wh)	48,27	45,92	41,30
Suelo seco + cápsula (Ws)	42,06	39,86	35,10
Peso de agua Pa = (Wh - Ws)	6,21	6,06	6,20
Peso de cápsula (Wc)	18,43	18,03	14,90
Peso suelo seco (g) Ps = (Ws - Wc)	23,63	21,83	20,20
Porcentaje de humedad (%) %h = Pa/Ps*100	26,28	27,76	30,69
			28,24

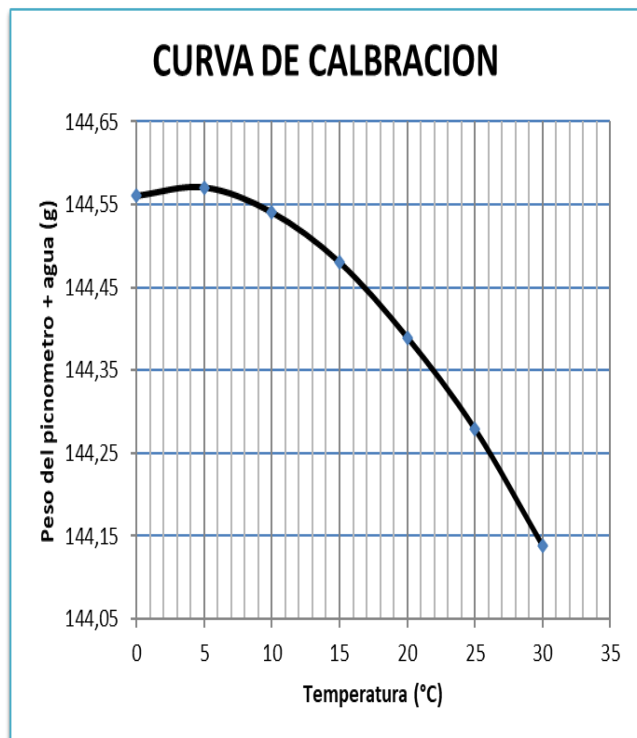


LIMITE PLASTICO (LP)		
Cápsula N°	55	61
Suelo húmedo + cápsula (Wh)	36,92	34,93
Suelo seco + cápsula (Ws)	34,02	32,33
Peso de agua (Pa) = (Wh - Ws)	2,90	2,60
Peso de cápsula (Wc)	18,38	18,36
Peso suelo seco Ps = (Ws - Wc)	15,64	13,97
Porcentaje de humedad (%h)	18,54	18,61
	L.P. =	18,6

L.L.=	28,24
L.P.=	18,58
I.P.=	9,67

ANEXO A-4 GRAVEDAD ESPECIFICA DE LOS SOLIDOS DEL SUELO ASTM D854-02

Peso específico del agua a 16 (oC) (gr)	0,999
Peso del picnometro lleno de agua a temperatura de ensayo (oC) (gr)	144,47
Peso del picnometro vacío (gr)	44,25



Temperatura [oC]	Ywti	Mpw,ti
0	1	144,560288
5	1	144,57032
10	1	144,540224
15	0,999	144,480032
20	0,998	144,389744
25	0,997	144,279391
30	0,996	144,138943

Interpolando Peso específico del agua a temp i = 16

	16	0,9990	
--	----	--------	--

Peso del picnometro lleno de agua a temperatura i oC (W2)

144,470

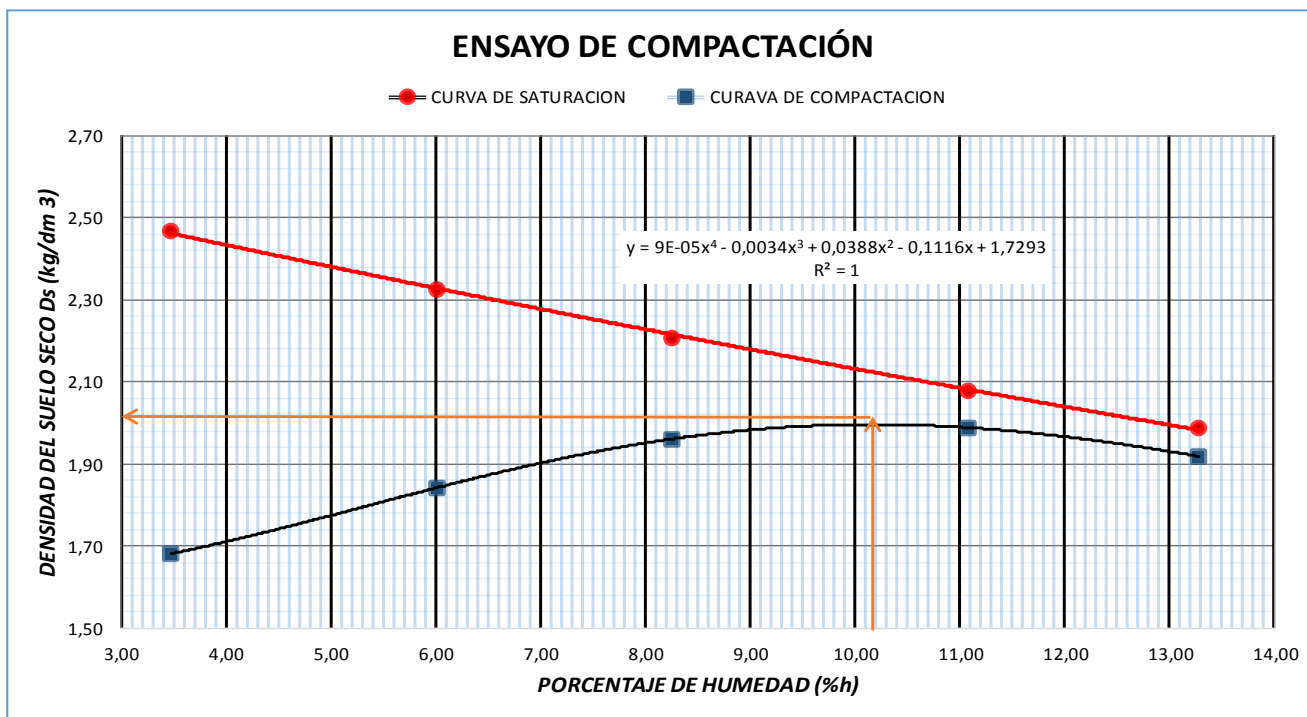
Recipiente de evaporacion No	81
Picnometro No	1
Temperatura (oC)	16
Peso específico del agua a 18 oC (Gt) (gr)	0,9990
Peso picnometro + agua + suelo (W1) (gr)	169,45
Peso recipiente + suelo seco (Wa) (gr)	119,9
Peso del recipiente (Wb) (gr)	80,27
Peso del suelo seco (Ws=Wa-Wb) (gr)	39,63
Peso del picnometro lleno de agua a temperatura i oC (W2) (gr)	144,470

Factor de correccion a 20 oC Kt (adimencional)	1,000801443
Peso específico del suelo (Gs=(Kt Ws)/(Ws -W1+W2))(adimencional)	2,707

Peso específico del suelo (Gs=(Gt Ws)/(Ws -W1+W2))(adimencional)	2,702
--	-------

ANEXO A-5 COMPACTACION PROCTOR T-180-90 (AASHTO T 180 D)

PLANILLA DE ENSAYO DE COMPACTACIÓN					
DATO PREVIO	DENSIDAD DEL SUELO G _s	2,701			
N° DE CAPAS	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
N° DE GOLPES POR CAPA	56,00	56,00	56,00	56,00	56,00
SUELOS HUMEDO MAS MOLDE	9448,10	9901,90	10262,70	10445,40	10369,90
PESO DEL MOLDE*	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00
PESO DEL SUELO HUMEDO	3698,10	4151,90	4512,70	4695,40	4619,90
VOLUMEN DE LA MUESTRA	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00
DENSIDAD DEL SUELO HUMEDO	1,74	1,95	2,12	2,21	2,17
N° DE CAPSULA*					
PESO DEL SUELO HUMEDO+CAPSULA	301,38	267,47	282,87	229,42	205,92
PESO DEL SUELO SECO MAS CAPSULA	293,66	256,62	266,18	213,19	189,02
PESO DEL AGUA	7,72	10,85	16,69	16,23	16,90
PESO DE LA CAPSULA	71,29	76,28	64,09	66,78	61,76
PESO DEL SUELO SECO	222,37	180,34	202,09	146,41	127,26
CONTENIDO DE HUMEDAD	3,47	6,02	8,26	11,09	13,28
DENSIDAD DEL SUELO SECO	1,68	1,84	1,96	1,99	1,92
SATURACIÓN	2,47	2,32	2,21	2,08	1,99



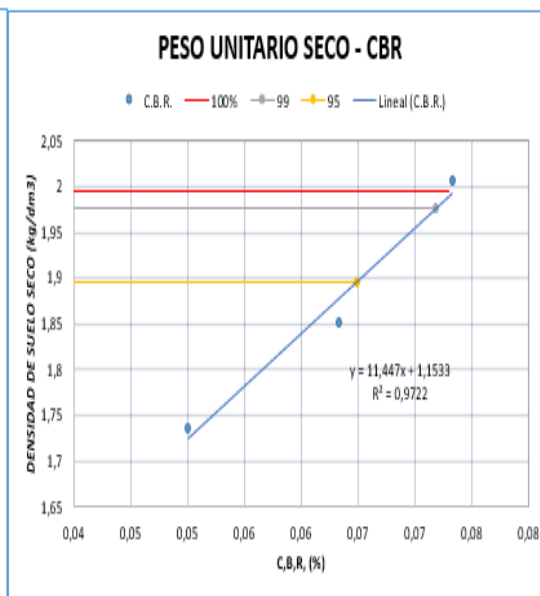
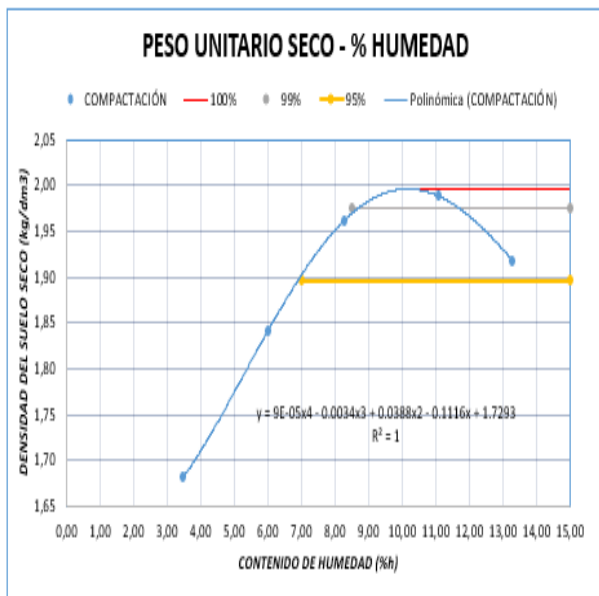
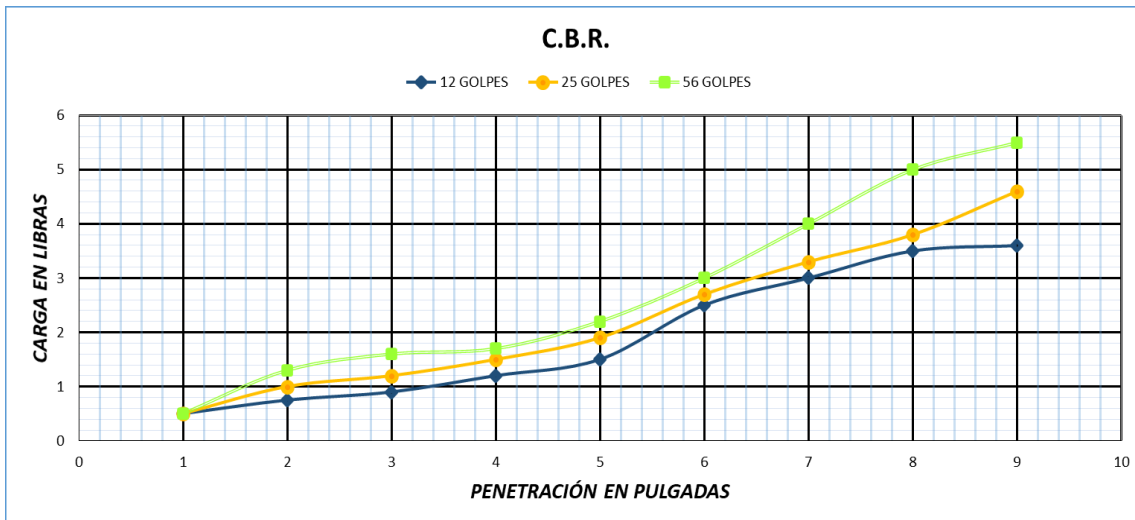
HUMEDAD OPTIMA	10,10	DENSIDAD SECA MAXIMA	2,00
----------------	-------	----------------------	------

ANEXO A-6 RELACION SOPORTE CALIFORNIA "CBR" AASHTO T 1883-07

MUESTRA	HUMEDAD OPTIMA	DENSIDAD SECA MAXIMA	Ho	0.1"	0.2"	CBR 100% T 180 D (0.1")		NO DEFINIDO	
						CBR 99% T 180 D (0.1")		0,07	
1	10,10	2,00	50	3000	4500	CBR 95% T 180 D (0.1")		0,06	
CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO									
Nº MOLDE	M7			M8			M9		
Nº DE CAPAS	5			5			5		
Nº DE GOLPES POR CAPA	12			25			56		
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	ANTES DE MOJARSE	DEPUES DE MOJARSE	ANTES DE MOJARSE	DEPUES DE MOJARSE	ANTES DE MOJARSE	DEPUES DE MOJARSE	ANTES DE MOJARSE	DEPUES DE MOJARSE	
PESO DE LA MUESTRA HUM + MOLDE (Kg)	12212,2	12321,2	12534,2	12598,3	12149,1	12250,1			
PESO DEL MOLDE (Kg)	7736,8	7736,8	7966,5	7966,5	7123,9	7123,9			
PESO DE LA MUESTRA HÚMEDA	4475,4	4584,4	4567,7	4631,8	5025,2	5126,2			
VOLUMEN DE LA MUESTRA (dm ³)	2325	2325	2345	2345	2335,000	2335,000			
PESO UNITARIO MUESTRA HÚMEDA	1,925	1,972	1,948	1,975	2,152	2,195			
MUESTRA DE HUMEDAD DEL	FONDO	SUPERFICIAL	2º SUPERFICIAL	FONDO	SUPERFICIAL	2º SUPERFICIAL	FONDO	SUPERFICIAL	2º SUPERFICIAL
Nº DE CAPSULA*	22	33	106	25	18	107	56	57	108
PESO DEL SUELO HUMEDO+CAPSULA	205,16	226,64	480,5	274,6	241,5	472,67	264,18	305,14	456,71
PESO DEL SUELO SECO MAS CAPSULA	190,37	211,14	467,11	252,57	224,59	453,33	242,62	280,78	438,4
PESO DEL AGUA	14,79	15,5	13,39	22,03	16,91	19,34	21,56	24,36	18,31
PESO DE LA CAPSULA	58,21	63,08	65,06	61,220	73,440	65,550	59,070	73,600	66,320
PESO DEL SUELO SECO	132,160	148,060	402,050	406,52	344,58	387,78	317,02	320,81	372,08
CONTENIDO DE HUMEDAD	11,191	10,469	3,330	5,419	4,907	4,987	6,801	7,593	4,921
PROMEDIO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD	10,830			5,163			7,197		
PESO UNITARIO DE LA MUESTRA SECA	1,737			1,852			2,008		
EXPANSIÓN H=5"									

FECHA	HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO EN DIAS	MOLDE Nº1		MOLDE Nº2		MOLDE Nº3	
			LECTURA	%	LECTURA	%	LECTURA	%
21/4/2019	13:00	0	85		9		16	
22/4/2019	13:00	1						
23/4/2019	13:00	2	240		212,5		200	
24/4/2019	13:00	3	250		243		244	
25/4/2019	13:00	4	262	3,54	252	4,86	256	4,8

C.B.R.									
PENETRACIÓN PULGADAS	MOLDE Nº1			MOLDE Nº2			MOLDE Nº3		
	CARGA (Lb)	CBR %	CBR	CARGA (Lb)	CBR %	CBR	CARGA (Lb)	CBR %	CBR
0	0,5			0,5			0,5		
0,025	0,75			1			1,3		
0,05	0,9			1,2			1,6		
0,075	1,2			1,5			1,7		
0,1	1,5	0,05		1,9	0,06		2,2	0,07	
0,2	2,5	0,06		2,7	0,06		3	0,07	
0,3	3			3,3			4		
0,4	3,5			3,8			5		
0,5	3,6			4,6			5,5		



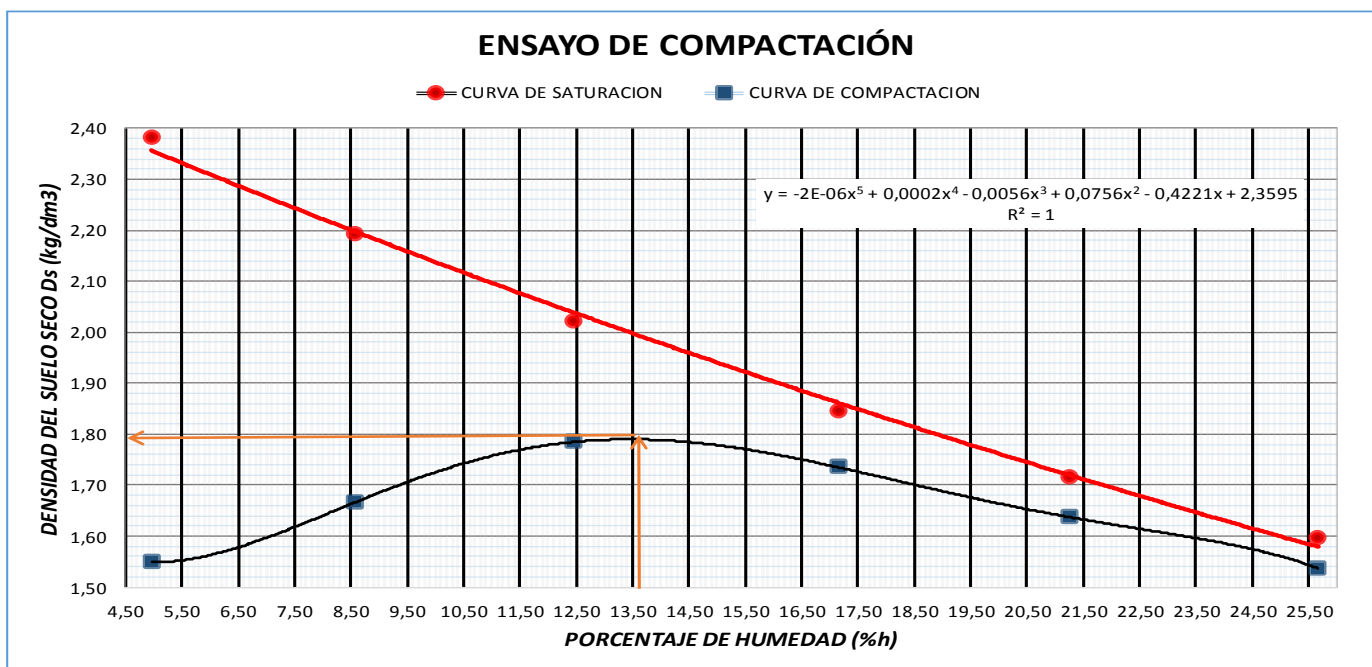
CBR 100% =	0,073
CBR 97% =	0,072
CBR 95% =	0,065

ANEXO B
ENSAYOS DE LABORATORIO DE LA MEZCLA DE SUELO, CAL Y CENIZA
DE CASCARA DE ARROZ

ANEXO B-1

**MEZCLA DE 5% CAL, 3%CCA Y 92% SUELO
COMPACTACION PROCTOR T-180-90 (AASHTO T 180 D)**

PLANILLA DE ENSAYO DE COMPACTACIÓN						
DATO PREVIO	DENSIDAD DEL SUELO Gs	2,701				
Nº DE CAPAS	5	5	5	5	5	5
Nº DE GOLPES POR CAPA	56	56	56	56	56	56
SUELOS HUMEDO MAS MOLDE	9334,00	9723,00	10144,90	10199,10	10098,70	9984,5
PESO DEL MOLDE	5878,00	5878,00	5878,00	5878,00	5878,00	5878,00
PESO DEL SUELO HUMEDO	3456,00	3845,00	4266,90	4321,10	4220,70	4106,50
VOLUMEN DE LA MUESTRA	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00
DENSIDAD DEL SUELO HUMEDO	1,63	1,81	2,01	2,03	1,99	1,93
Nº DE CAPSULA						
PESO DEL SUELO HUMEDO+CAPSULA	385,56	352,10	322,18	384,84	346,23	429,5
PESO DEL SUELO SECO MAS CAPSULA	371,10	330,87	295,80	338,59	296,89	357,99
PESO DEL AGUA	14,46	21,23	26,38	46,25	49,34	71,51
PESO DE LA CAPSULA	79,83	83,08	84,09	68,95	64,75	79,44
PESO DEL SUELO SECO	291,27	247,79	211,71	269,64	232,14	278,55
CONTENIDO DE HUMEDAD	4,96	8,57	12,46	17,15	21,25	25,67
DENSIDAD DEL SUELO SECO	1,55	1,67	1,78	1,73	1,64	1,54
SATURACIÓN	2,38	2,19	2,02	1,85	1,72	1,60



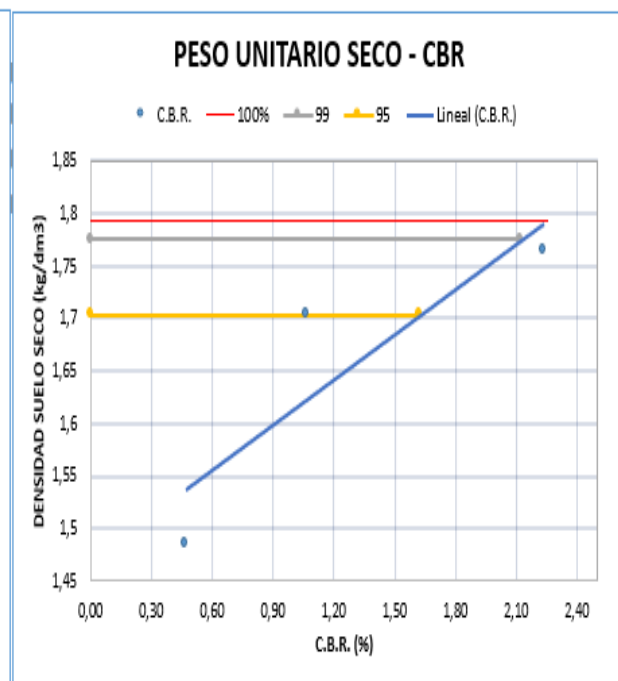
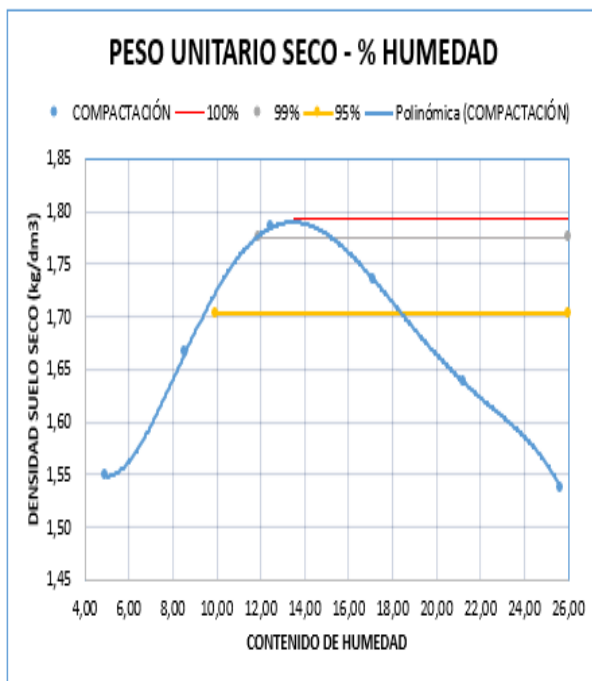
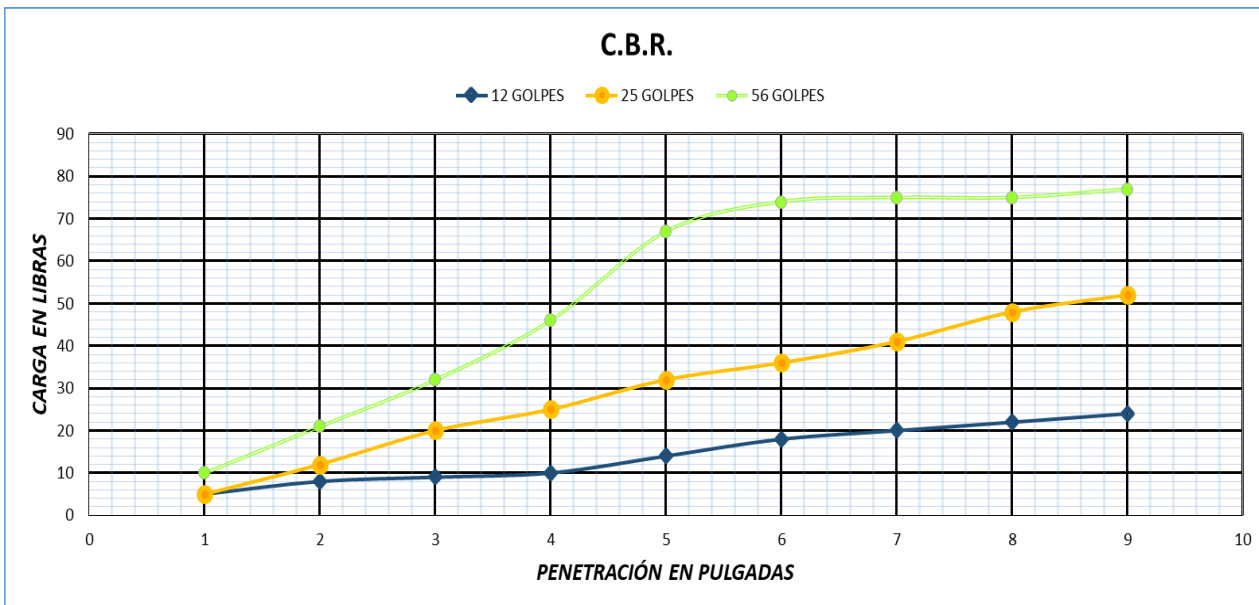
HUMEDAD OPTIMA	13,50	DENSIDAD SECA MAXIMA	1,79
----------------	-------	----------------------	------

**MEZCLA DE 5% CAL, 3%CCA Y 92% SUELO
RELACION SOPORTE CALIFORNIA "CBR" AASHTO T 1883-07**

PLANILLA DE ENSAYO DE COMPACTACIÓN										
MUESTRA	HUMEDAD OPTIMA	DENSIDAD SECA MAXIMA	Ho	0.1"	0.2"	CBR 100% T 180 D (0.1")		NO DEFINIDO		
						CBR 99% T 180 D (0.1")		2,12		
1	13,50	1,79	50	3000	4500	CBR 95% T 180 D (0.1")		1,62		
CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO										
Nº MOLDE*	M1			M2			M3			
Nº DE CAPAS*	5			5			5			
Nº DE GOLPES POR CAPA*	12			25			56			
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	ANTES DE MOJARSE		DEPUES DE MOJARSE		ANTES DE MOJARSE		DEPUES DE MOJARSE		ANTES DE MOJARSE	
PESO DE LA MUESTRA HUM + MOLDE (Kg)	11519,2		12017,6		12520,3		12942,9		13042,8	
PESO DEL MOLDE (Kg)	7576		7576		8315,9		8315,9		8490,8	
PESO DE LA MUESTRA HÚMEDA	3943,2		4441,6		4204,4		4627		4552	
VOLUMEN DE LA MUESTRA (dm ³)	2350		2350		2338		2338		2368,000	
PESO UNITARIO MUESTRA HÚMEDA	1,678		1,890		1,798		1,979		1,922	
MUESTRA DE HUMEDAD DEL	FONDO	SUP.	2º SUP.	FONDO	SUP.	2º SUP.	FONDO	SUP.	2º SUP.	
Nº DE CAPSULA*	18	25	77	28	33	38	38	56	62	
PESO DEL SUELO HUMEDO+CAPSULA*	317,17	278,91	316,32	276,98	233,46	345,75	316,47	315,06	292,62	
PESO DEL SUELO SECO MAS CAPSULA*	289,1	253,91	258,96	253,26	215,04	288,42	287,87	286,29	252,33	
PESO DEL AGUA	28,07	25	57,36	23,72	18,42	57,33	28,6	28,77	40,29	
PESO DE LA CAPSULA*	73,46	61,24	59,52	58,230	63,100	79,770	79,480	59,090	73,380	
PESO DEL SUELO SECO	215,640	192,670	199,440	406,52	344,58	387,78	317,02	320,81	372,08	
CONTENIDO DE HUMEDAD	13,017	12,976	28,761	5,835	5,346	14,784	9,022	8,968	10,828	
PROMEDIO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD	12,996			5,590			8,995			
PESO UNITARIO DE LA MUESTRA SECA	1,485			1,703			1,764			
EXPANSIÓN H=5"										

FECHA	HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO EN DIAS	MOLDE Nº1		MOLDE Nº2		MOLDE Nº3	
			LECTURA EXTENSOMETR	%	LECTURA EXTENSOMETR	%	LECTURA EXTENSOMETR	%
21/4/2019	13:00	0	0		0		RO	
22/4/2019	13:00	1	30		32		88	
23/4/2019	13:00	2	59		63		103	
24/4/2019	13:00	3	65		69		109	
25/4/2019	13:00	4	67	0,74	71	0,78	110	0,44

C.B.R.									
PENETRACIÓN PULGADAS	MOLDE Nº1			MOLDE Nº2			MOLDE Nº3		
	CARGA (Lb)	CBR %	CBR	CARGA (Lb)	CBR %	CBR	CARGA (Lb)	CBR %	CBR
0	5			5			10		
0,025	8			12			21		
0,05	9			20			32		
0,075	10			25			46		
0,1	14	0,47		32	1,07		67	2,23	
0,2	18	0,40		36	0,80		74	1,64	
0,3	20			41			75		
0,4	22			48			75		
0,5	24			52			77		

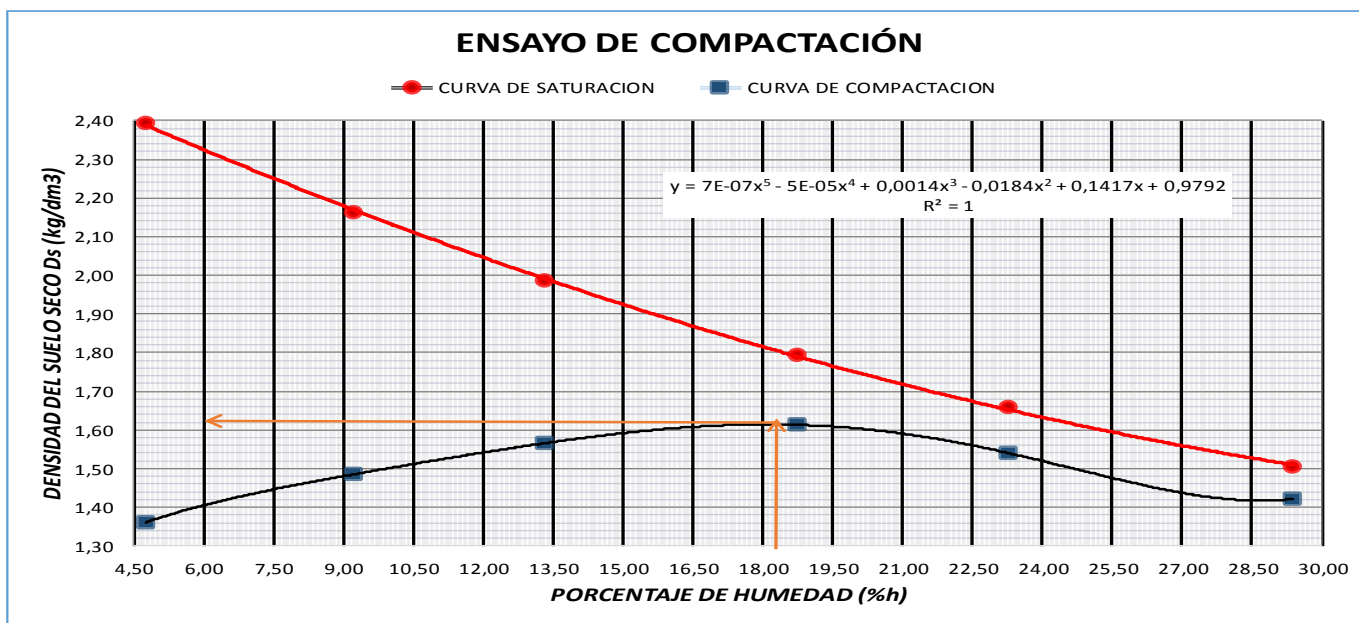


CBR 100%=	2,233
CBR 97%=	2,121
CBR 95%=	1,621

ANEXO B-2

**MEZCLA DE 5% CAL, 10%CCA Y 85% SUELO
COMPACTACION PROCTOR T-180-90 (AASHTO T 180 D)**

PLANILLA DE ENSAYO DE COMPACTACIÓN						
DATO PREVIO	DENSIDAD DEL SUELO Gs	2,701				
Nº DE CAPAS	5	5	5	5	5	5
Nº DE GOLPES POR CAPA	56	56	56	56	56	56
SUELOS HUMEDO MAS MOLDE	8910,10	9325,80	9650,00	9950,60	9914,20	9788,9
PESO DEL MOLDE	5878,00	5878,00	5878,00	5878,00	5878,00	5878,00
PESO DEL SUELO HUMEDO	3032,10	3447,80	3772,00	4072,60	4036,20	3910,90
VOLUMEN DE LA MUESTRA	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00
DENSIDAD DEL SUELO HUMEDO	1,43	1,62	1,77	1,92	1,90	1,84
Nº DE CAPSULA	15	17	60	106	114	61
PESO DEL SUELO HUMEDO+CAPSULA	299,94	262,13	241,97	318,79	325,13	372,77
PESO DEL SUELO SECO MAS CAPSULA	289,19	245,14	221,86	278,89	276,29	304,64
PESO DEL AGUA	10,75	16,99	20,11	39,90	48,84	68,13
PESO DE LA CAPSULA	63,27	60,51	70,83	66,11	66,41	72,83
PESO DEL SUELO SECO	225,92	184,63	151,03	212,78	209,88	231,81
CONTENIDO DE HUMEDAD	4,76	9,20	13,32	18,75	23,27	29,39
DENSIDAD DEL SUELO SECO	1,36	1,49	1,57	1,61	1,54	1,42
SATURACIÓN	2,39	2,16	1,99	1,79	1,66	1,51



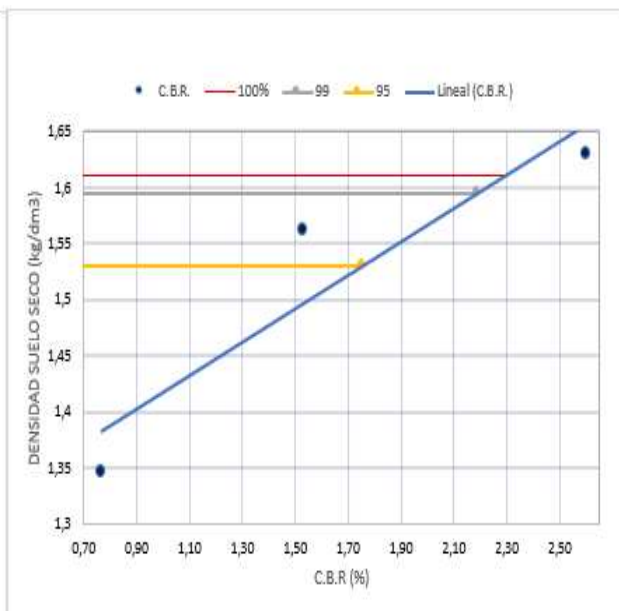
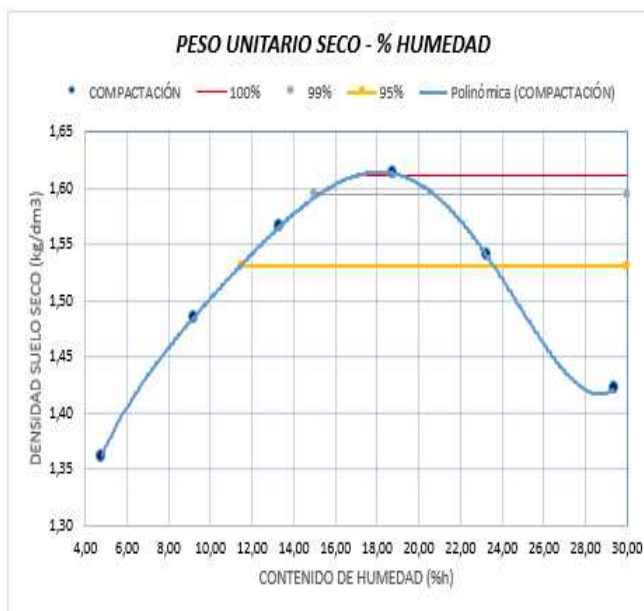
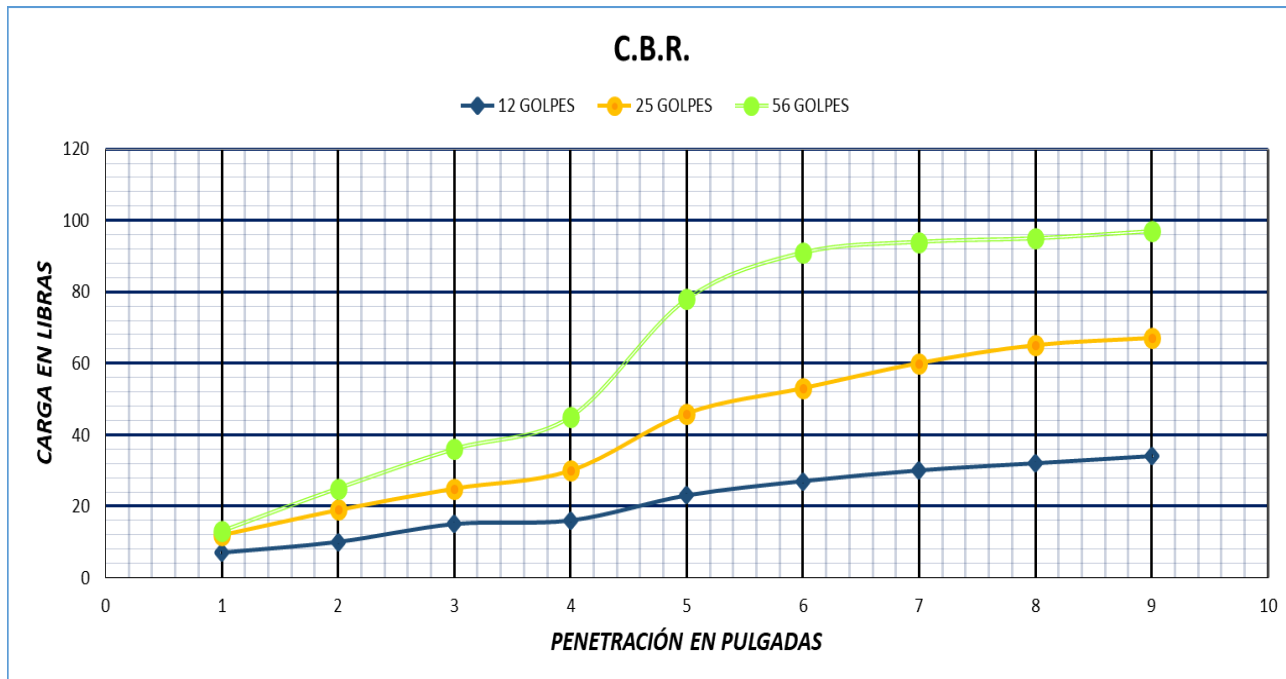
HUMEDAD OPTIMA	17,50	DENSIDAD SECA MAXIMA	1,61
----------------	-------	----------------------	------

**MEZCLA DE 5% CAL, 10%CCA Y 85% SUELO
RELACION SOPORTE CALIFORNIA "CBR" AASHTO T 1883-07**

PLANILLA DE ENSAYO DE COMPACTACIÓN									
MUESTRA	HUMEDAD OPTIMA	DENSIDAD SECA MAXIMA	Ho	0.1"	0.2"	CBR 100% T 180 D (0.1")	NO DEFINIDO		
1	17,50	1,61	50	3000	4500	CBR 99% T 180 D (0.1")	2,19		
						CBR 95% T 180 D (0.1")	1,76		
CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO									
Nº MOLDE	M7			M8			M9		
Nº DE CAPAS	5			5			5		
Nº DE GOLPES POR CAPA	12			25			56		
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	ANTES DE MOJARSE	DEPUES DE MOJARSE	ANTES DE MOJARSE	DEPUES DE MOJARSE	ANTES DE MOJARSE	DEPUES DE MOJARSE	ANTES DE MOJARSE	DEPUES DE MOJARSE	
PESO DE LA MUESTRA HUM + MOLDE (Kg)	11465	11945,2	11957	12330,1	11488,4	11747,2			
PESO DEL MOLDE (Kg)	7740,6	7740,6	7970	7970	7127	7127			
PESO DE LA MUESTRA HÚMEDA	3724,4	4204,6	3987	4360,1	4361,4	4620,2			
VOLUMEN DE LA MUESTRA (dm ³)	2350	2350	2338	2338	2368,000	2368,000			
PESO UNITARIO MUESTRA HÚMEDA	1,585	1,789	1,705	1,865	1,842	1,951			
MUESTRA DE HUMEDAD DEL	FONDO	SUP.	2" SUP.	FONDO	SUP.	2" SUP.	FONDO	SUP.	2" SUP.
Nº DE CAPSULA	57	65	40	76	84	36	131	140	31
PESO DEL SUELO HUMEDO+CAPSULA	282,85	307,34	307,54	321,52	306,55	292,85	343	334,81	294,5
PESO DEL SUELO SECO MAS CAPSULA	251,62	272,58	246,99	285,26	274,23	243,82	300,43	294,33	244,76
PESO DEL AGUA	31,23	34,76	60,55	36,26	32,32	49,03	42,57	40,48	49,74
PESO DE LA CAPSULA	73,6	79,85	73,62	83,080	84,070	76,290	68,950	64,760	58,850
PESO DEL SUELO SECO	178,020	192,730	173,370	406,52	344,58	387,78	317,02	320,81	372,08
CONTENIDO DE HUMEDAD	17,543	18,036	34,925	8,920	9,380	12,644	13,428	12,618	13,368
PROMEDIO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD	17,789			9,150			13,023		
PESO UNITARIO DE LA MUESTRA SECA	1,345			1,562			1,630		
EXPANSIÓN H=5"									

FECHA	HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO EN DIAS	MOLDE Nº1		MOLDE Nº2		MOLDE Nº3	
			LECTURA	%	LECTURA	%	LECTURA	%
21/4/2019	13:00	0	82		34		3	
22/4/2019	13:00	1						
23/4/2019	13:00	2	109		55		16	
24/4/2019	13:00	3	114		62		22	
25/4/2019	13:00	4	117	0,7	65	0,62	26	0,46

PENETRACIÓN PULGADAS	C.B.R.								
	MOLDE Nº1			MOLDE Nº2			MOLDE Nº3		
	CARGA (Lb)	CBR %	CBR	CARGA (Lb)	CBR %	CBR	CARGA (Lb)	CBR %	CBR
0	7			12			13		
0,025	10			19			25		
0,05	15			25			36		
0,075	16			30			45		
0,1	23	0,77		46	1,53		78	2,60	
0,2	27	0,60		53	1,18		91	2,02	
0,3	30			60			94		
0,4	32			65			95		
0,5	34			67			97		

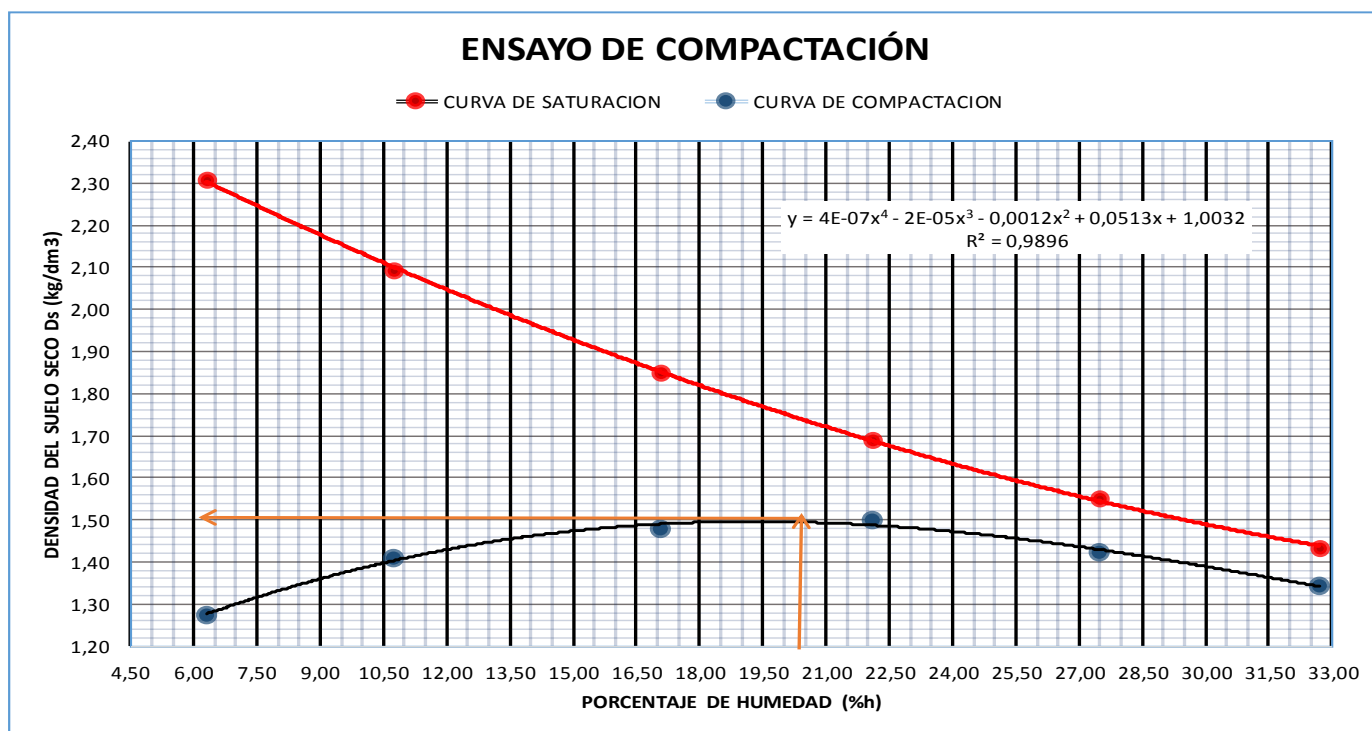


CBR 100%=	2,600
CBR 97%=	2,187
CBR 95%=	1,755

ANEXO B-3

MEZCLA DE 5% CAL, 15%CCA Y 80% SUELO
COMPACTACION PROCTOR T-180-90 (AASHTO T 180 D)

PLANILLA DE ENSAYO DE COMPACTACIÓN						
DATO PREVIO	DENSIDAD DEL SUELO Gs	2,701				
Nº DE CAPAS *	5	5	5	5	5	5
Nº DE GOLPES POR CAPA *	56	56	56	56	56	56
SUELOS HUMEDO MAS MOLDE *	8629,40	9068,40	9430,20	9643,70	9607,20	9539
PESO DEL MOLDE *	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00
PESO DEL SUELO HUMEDO	2879,40	3318,40	3680,20	3893,70	3857,20	3789,00
VOLUMEN DE LA MUESTRA *	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00
DENSIDAD DEL SUELO HUMEDO	1,35	1,56	1,73	1,83	1,81	1,78
Nº DE CAPSULA *	15	17	60	61	106	114
PESO DEL SUELO HUMEDO+CAPSULA *	241,51	239,10	264,95	302,58	346,36	368,94
PESO DEL SUELO SECO MAS CAPSULA *	230,96	221,75	236,63	261,00	285,95	294,4
PESO DEL AGUA	10,55	17,35	28,32	41,58	60,41	74,54
PESO DE LA CAPSULA *	63,27	60,51	70,83	72,83	66,11	66,41
PESO DEL SUELO SECO	167,69	161,24	165,80	188,17	219,84	227,99
CONTENIDO DE HUMEDAD	6,29	10,76	17,08	22,10	27,48	32,69
DENSIDAD DEL SUELO SECO	1,27	1,41	1,48	1,50	1,42	1,34
SATURACIÓN	2,31	2,09	1,85	1,69	1,55	1,43



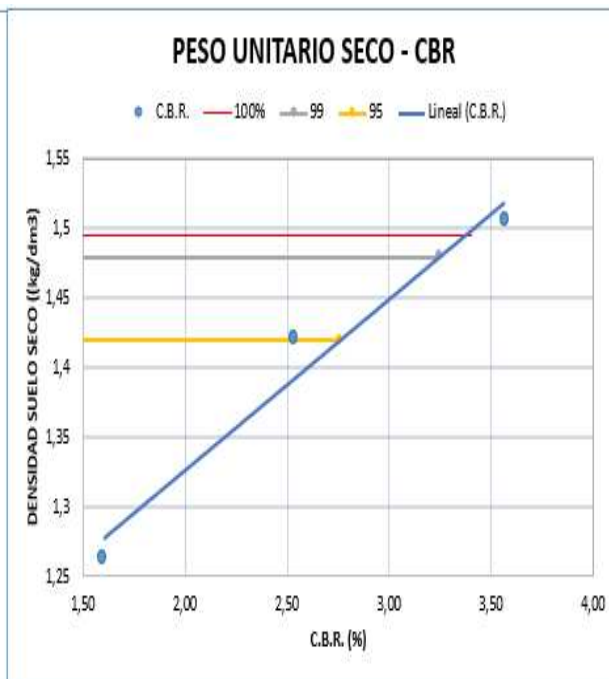
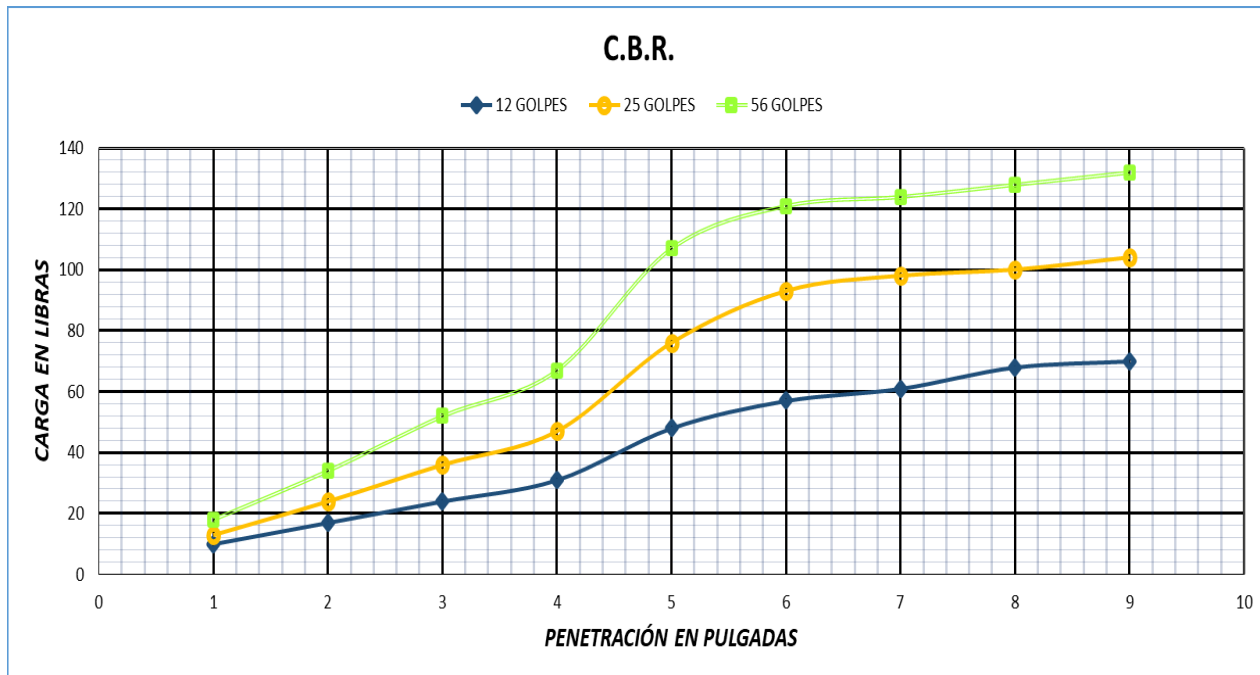
HUMEDAD OPTIMA	19,65	DENSIDAD SECA MAXIMA	1,49
----------------	-------	----------------------	------

**MEZCLA DE 5% CAL, 15%CCA Y 80% SUELO
RELACION SOPORTE CALIFORNIA "CBR" AASHTO T 1883-07**

PLANILLA DE ENSAYO DE COMPACTACIÓN										
MUESTRA	HUMEDAD OPTIMA	DENSIDAD SECA MAXIMA	Ho	0.1"	0.2"	CBR 100% T 180 D (0.1")		NO DEFINIDO		
						CBR 99% T 180 D (0.1")		3,25		
1	19,65	1,49	50	3000	4500	CBR 95% T 180 D (0.1")		2,76		
CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO										
Nº MOLDE*	M4			M5			M6			
Nº DE CAPAS*	5			5			5			
Nº DE GOLPES POR CAPA*	12			25			56			
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	ANTES DE MOJARSE		DEPUES DE MOJARSE		ANTES DE MOJARSE		DEPUES DE MOJARSE		ANTES DE MOJARSE	
PESO DE LA MUESTRA HUM + MOLDE (Kg)	10490,2		10969,2		12774,3		13176,6		11038,1	
PESO DEL MOLDE (Kg)	6923,7		6923,7		8902,2		8902,2		6958,2	
PESO DE LA MUESTRA HÚMEDA	3566,5		4045,5		3872,1		4274,4		4079,9	
VOLUMEN DE LA MUESTRA (dm ³)	2350		2350		2338		2338		2368,000	
PESO UNITARIO MUESTRA HÚMEDA	1,518		1,721		1,656		1,828		1,723	
MUESTRA DE HUMEDAD DEL	FONDO	SUP.	2º SUP.		FONDO	SUP.	2º SUP.		FONDO	SUP.
Nº DE CAPSULA*	57	65	19		76	84	46		131	140
PESO DEL SUELO HUMEDO+CAPSULA*	242,11	324,15	262,74		323,6	285,27	307,62		364,29	348,09
PESO DEL SUELO SECO MAS CAPSULA*	214,08	282,59	212,62		252,32	230,95	248,73		317,8	302,28
PESO DEL AGUA	28,03	41,56	50,12		71,28	54,32	58,89		46,49	45,81
PESO DE LA CAPSULA*	73,6	79,85	60,72		83,080	84,070	59,970		68,950	64,760
PESO DEL SUELO SECO	140,480	202,740	151,900		406,52	344,58	387,78		317,02	320,81
CONTENIDO DE HUMEDAD	19,953	20,499	32,995		17,534	15,764	15,186		14,665	14,279
PROMEDIO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD	20,226			16,649			14,472			
PESO UNITARIO DE LA MUESTRA SECA	1,262			1,420			1,505			
EXPANSIÓN H=5"										

FECHA	HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO EN DIAS	MOLDE Nº1		MOLDE Nº2		MOLDE Nº3	
			LECTURA	%	LECTURA	%	LECTURA	%
21/4/2019	13:00	0	95		18		49	
22/4/2019	13:00	1						
23/4/2019	13:00	2	112		30		62	
24/4/2019	13:00	3	116		32		64	
25/4/2019	13:00	4	119	0,48	33	0,3	65	0,32

C.B.R.									
PENETRACIÓN PULGADAS	MOLDE Nº1			MOLDE Nº2			MOLDE Nº3		
	CARGA (Lb)	CBR %	CBR	CARGA (Lb)	CBR %	CBR	CARGA (Lb)	CBR %	CBR
0	10			13			18		
0,025	17			24			34		
0,05	24			36			52		
0,075	31			47			67		
0,1	48	1,60		76	2,53		107	3,57	
0,2	57	1,27		93	2,07		121	2,69	
0,3	61			98			124		
0,4	68			100			128		
0,5	70			104			132		

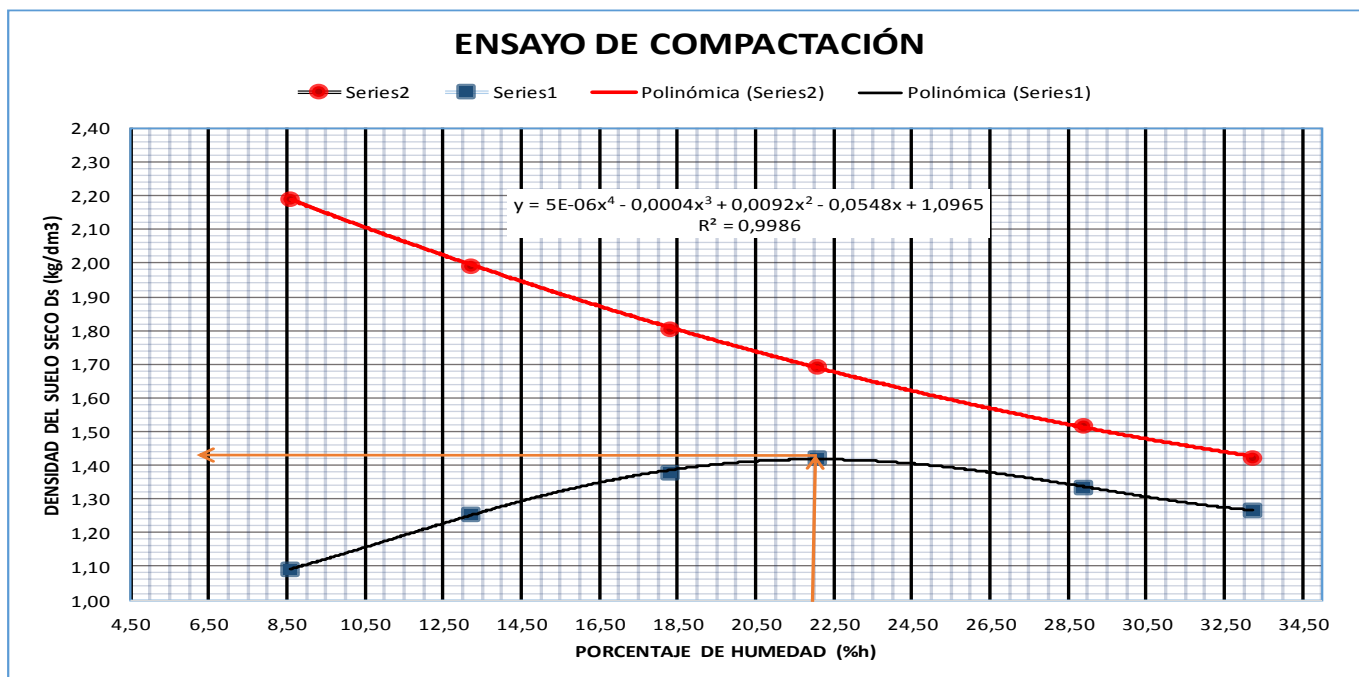


CBR 100% =	3,567
CBR 97% =	3,247
CBR 95% =	2,760

ANEXO B-4

MEZCLA DE 5% CAL, 20%CCA Y 75% SUELO
COMPACTACION PROCTOR T-180-90 (AASHTO T 180 D)

PLANILLA DE ENSAYO DE COMPACTACIÓN						
DATO PREVIO	DENSIDAD DEL SUELO Gs	2,701				
Nº DE CAPAS	5	5	5	5	5	5
Nº DE GOLPES POR CAPA	56	56	56	56	56	56
SUELOS HUMEDO MAS MOLDE	8269,40	8768,40	9220,20	9443,70	9407,20	9339
PESO DEL MOLDE	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00
PESO DEL SUELO HUMEDO	2519,40	3018,40	3470,20	3693,70	3657,20	3589,00
VOLUMEN DE LA MUESTRA	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00
DENSIDAD DEL SUELO HUMEDO	1,19	1,42	1,63	1,74	1,72	1,69
Nº DE CAPSULA	15	17	60	61	108	114
PESO DEL SUELO HUMEDO+CAPSULA	231,51	240,20	246,59	320,85	356,16	386,14
PESO DEL SUELO SECO MAS CAPSULA	218,20	219,25	219,36	276,00	291,15	306,42
PESO DEL AGUA	13,31	20,95	27,23	44,85	65,01	79,72
PESO DE LA CAPSULA	63,27	60,51	70,83	72,83	66,11	66,41
PESO DEL SUELO SECO	154,93	158,74	148,53	203,17	225,04	240,01
CONTENIDO DE HUMEDAD	8,59	13,20	18,33	22,08	28,89	33,22
DENSIDAD DEL SUELO SECO	1,09	1,25	1,38	1,42	1,33	1,27
SATURACIÓN	2,19	1,99	1,81	1,69	1,52	1,42



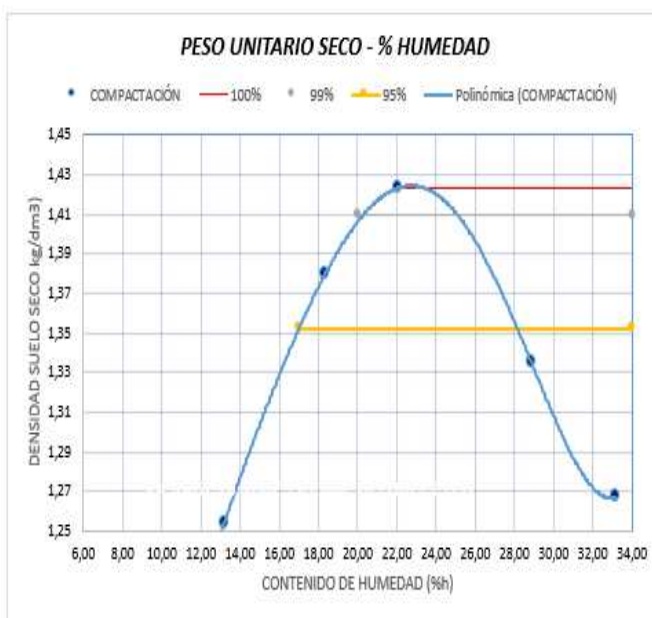
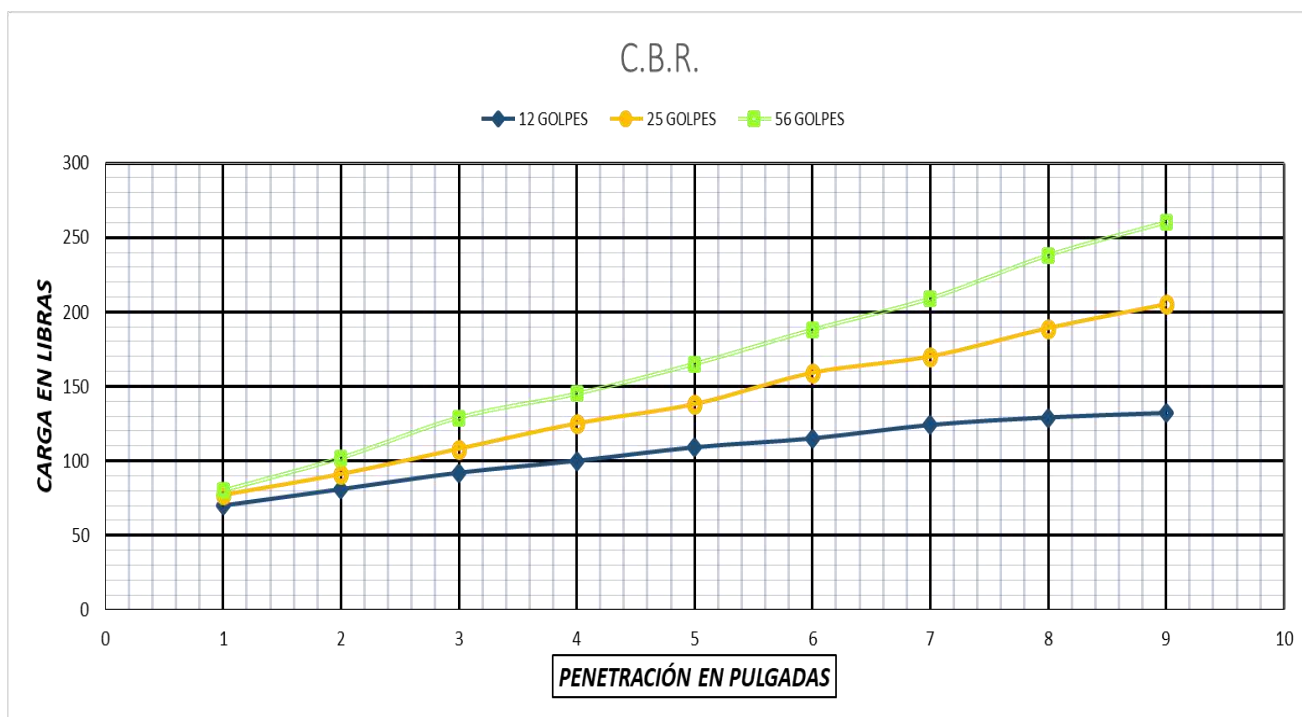
HUMEDAD OPTIMA	22,10	DENSIDAD SECA MAXIMA	1,42
----------------	-------	----------------------	------

**MEZCLA DE 5% CAL, 20%CCA Y 75% SUELO
RELACION SOPORTE CALIFORNIA "CBR" AASHTO T 1883-07**

PLANILLA DE ENSAYO DE COMPACTACIÓN										
MUESTRA	HUMEDAD OPTIMA	DENSIDAD SECA MAXIMA	Ho	0.1"	0.2"	CBR 100% T 180 D (0.1")		NO DEFINIDO		
						CBR 99% T 180 D (0.1")		4,94		
1	22,10	1,42	50	3000	4500	CBR 95% T 180 D (0.1")		4,53		
CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO										
Nº MOLDE	M4			M5			M9			
Nº DE CAPAS	5			5			5			
Nº DE GOLPES POR CAPA	12			25			56			
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	ANTES DE MOJARSE		DEPUES DE MOJARSE		ANTES DE MOJARSE		DEPUES DE MOJARSE		ANTES DE MOJARSE	
PESO DE LA MUESTRA HUM + MOLDE (Kg)	10390,2		10869,2		12634,3		13076,6		11185,1	
PESO DEL MOLDE (Kg)	6923,7		6923,7		8902,2		8902,2		7123,4	
PESO DE LA MUESTRA HÚMEDA	3466,5		3945,5		3732,1		4174,4		4061,7	
VOLUMEN DE LA MUESTRA (dm ³)	2350		2350		2338		2338		2368,000	
PESO UNITARIO MUESTRA HÚMEDA	1,475		1,679		1,596		1,785		1,715	
MUESTRA DE HUMEDAD DEL	FONDO	SUP.	2º SUP.		FONDO	SUP.	2º SUP.		FONDO	SUP.
Nº DE CAPSULA	57	65	19		76	84	46		131	140
PESO DEL SUELO HUMEDO+CAPSULA	242,11	324,15	262,74		323,6	285,27	307,62		364,29	358,09
PESO DEL SUELO SECO MAS CAPSULA	214,08	282,59	212,62		252,32	230,95	248,73		312,8	309,28
PESO DEL AGUA	28,03	41,56	50,12		71,28	54,32	58,89		51,49	48,81
PESO DE LA CAPSULA	73,6	79,85	60,72		83,080	84,070	59,970		68,950	64,760
PESO DEL SUELO SECO	140,480	202,740	151,900		406,52	344,58	387,78		317,02	320,81
CONTENIDO DE HUMEDAD	19,953	20,499	32,995		17,534	15,764	15,186		16,242	15,215
PROMEDIO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD	20,226			16,649			15,728			
PESO UNITARIO DE LA MUESTRA SECA	1,227			1,368			1,482			
EXPANSIÓN H=5"										

FECHA	HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO EN DIAS	MOLDE Nº1		MOLDE Nº2		MOLDE Nº3	
			LECTURA	%	LECTURA	%	LECTURA	%
21/4/2019	13:00	0	111		22		65	
22/4/2019	13:00	1						
23/4/2019	13:00	2	115		26		68	
24/4/2019	13:00	3	119	0,48	28	0,3	70	0,32
25/4/2019	13:00	4	125	0,28	31	0,18	73	0,16

C.B.R.									
PENETRACIÓN PULGADAS	MOLDE Nº1			MOLDE Nº2			MOLDE Nº3		
	CARGA (Lb)	CBR %	CBR	CARGA (Lb)	CBR %	CBR	CARGA (Lb)	CBR %	CBR
0	70			77			80		
0,025	81			91			102		
0,05	92			108			129		
0,075	100			125			145		
0,1	109	3,63		138	4,60		165	5,50	
0,2	115	2,56		159	3,53		188	4,18	
0,3	124			170			209		
0,4	129			189			238		
0,5	132			205			260		

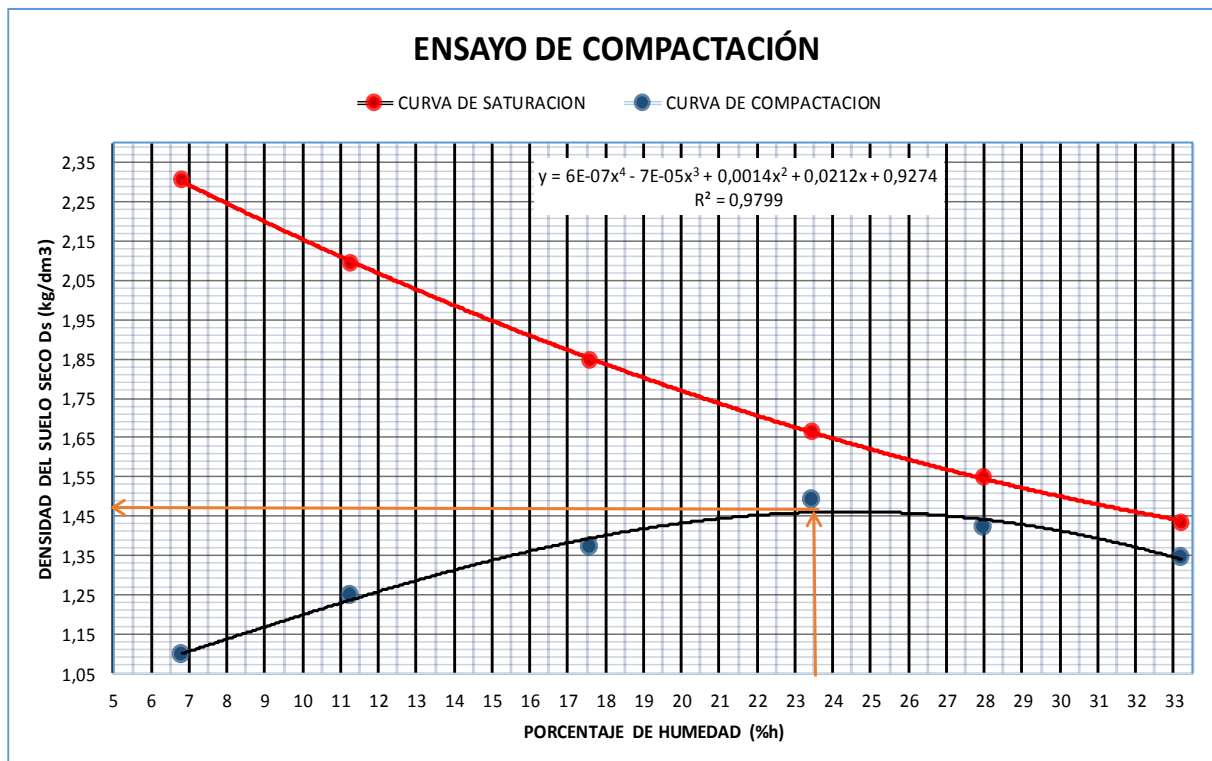


CBR 100%=	5,500
CBR 97%=	4,943
CBR 95%=	4,527

ANEXO B-5

**MEZCLA DE 5% CAL, 25%CCA Y 70% SUELO
COMPACTACION PROCTOR T-180-90 (AASHTO T 180 D)**

PLANILLA DE ENSAYO DE COMPACTACIÓN						
DATO PREVIO	DENSIDAD DEL SUELO Gs	2,701				
Nº DE CAPAS	5	5	5	5	5	5
Nº DE GOLPES POR CAPA	56	56	56	56	56	56
SUELOS HUMEDO MAS MOLDE*	8225,60	8689,50	9158,30	9643,70	9607,20	9539
PESO DEL MOLDE*	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00	5750,00
PESO DEL SUELO HUMEDO	2475,60	2939,50	3408,30	3893,70	3857,20	3789,00
VOLUMEN DE LA MUESTRA*	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00	2126,00
DENSIDAD DEL SUELO HUMEDO	1,16	1,38	1,60	1,83	1,81	1,78
Nº DE CAPSULA*	15	17	60	61	108	114
PESO DEL SUELO HUMEDO+CAPSULA*	241,51	239,10	264,95	303,00	346,36	368,94
PESO DEL SUELO SECO MAS CAPSULA*	230,96	221,75	236,63	260,00	285,95	294,4
PESO DEL AGUA	10,55	17,35	28,32	43,00	60,41	74,54
PESO DE LA CAPSULA*	63,27	60,51	70,83	72,83	66,11	66,41
PESO DEL SUELO SECO	167,69	161,24	165,80	187,17	219,84	227,99
CONTENIDO DE HUMEDAD	6,29	10,76	17,08	22,97	27,48	32,69
DENSIDAD DEL SUELO SECO	1,10	1,25	1,37	1,49	1,42	1,34
SATURACIÓN	2,31	2,09	1,85	1,67	1,55	1,43



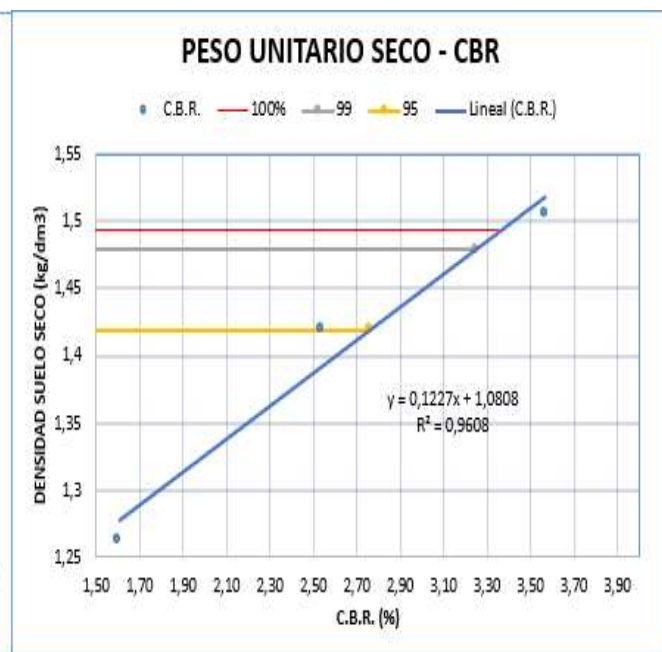
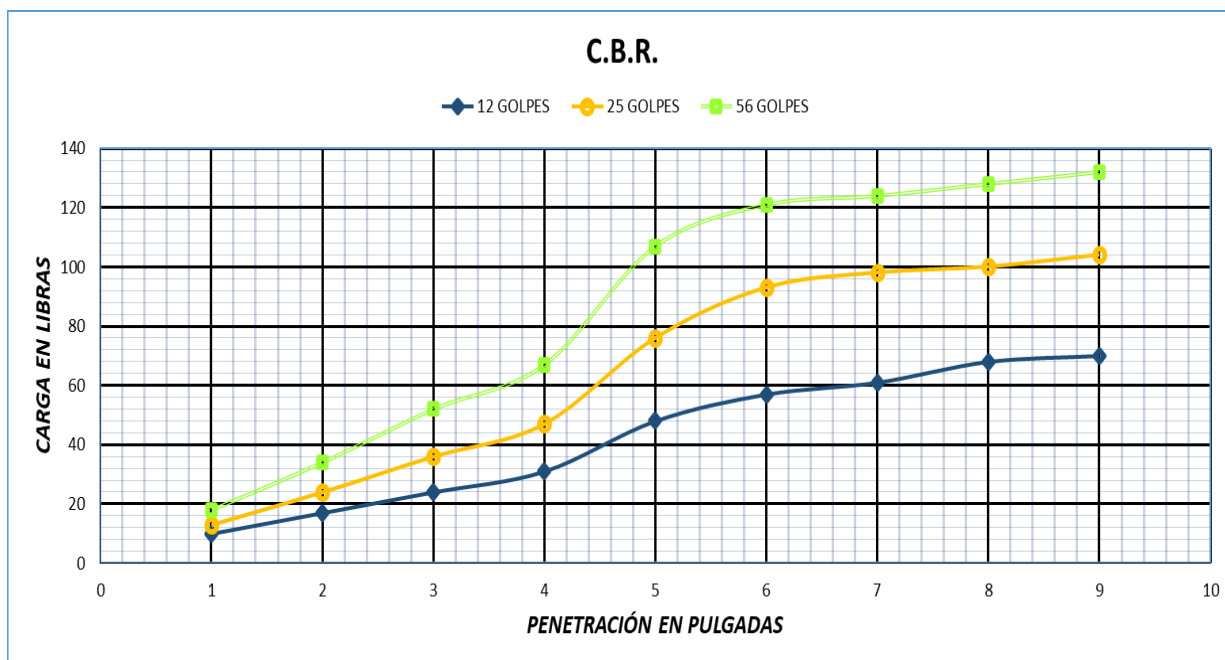
HUMEDAD OPTIMA	23,50	DENSIDAD SECA MAXIMA	1,49
----------------	-------	----------------------	------

**MEZCLA DE 5% CAL, 25%CCA Y 70% SUELO
RELACION SOPORTE CALIFORNIA "CBR" AASHTO T 1883-07**

PLANILLA DE ENSAYO DE COMPACTACIÓN										
MUESTRA	HUMEDAD OPTIMA	DENSIDAD SECA MAXIMA	Ho	0.1"	0.2"	CBR 100% T 180 D (0.1")		NO DEFINIDO		
						CBR 99% T 180 D (0.1")		CBR 95% T 180 D (0.1")		
1	19,65	1,49	50	3000	4500			3,25		
CONTENIDO DE HUMEDAD Y PESO UNITARIO										
Nº MOLDE	M4			M5			M6			
Nº DE CAPAS	5			5			5			
Nº DE GOLPES POR CAPA	12			25			56			
CONDICIÓN DE LA MUESTRA	ANTES DE MOJARSE		DEPUES DE MOJARSE		ANTES DE MOJARSE		DEPUES DE MOJARSE		ANTES DE MOJARSE	
PESO DE LA MUESTRA HUM + MOLDE (Kg)	10490,2		10969,2		12774,3		13176,6		11038,1	
PESO DEL MOLDE (Kg)	6923,7		6923,7		8902,2		8902,2		6958,2	
PESO DE LA MUESTRA HÚMEDA	3566,5		4045,5		3872,1		4274,4		4079,9	
VOLUMEN DE LA MUESTRA (dm ³)	2350		2350		2338		2338		2368,000	
PESO UNITARIO MUESTRA HÚMEDA	1,518		1,721		1,656		1,828		1,723	
MUESTRA DE HUMEDAD DEL	FONDO	SUP.	2º SUP.	FONDO	SUP.	2º SUP.	FONDO	SUP.	2º SUP.	
Nº DE CAPSULA	57	65	19	76	84	46	131	140	21	
PESO DEL SUELO HUMEDO+CAPSULA	242,11	324,15	262,74	323,6	285,27	307,62	364,29	348,09	274,18	
PESO DEL SUELO SECO MAS CAPSULA	214,08	282,59	212,62	252,32	230,95	248,73	317,8	302,28	224	
PESO DEL AGUA	28,03	41,56	50,12	71,28	54,32	58,89	46,49	45,81	50,18	
PESO DE LA CAPSULA	73,6	79,85	60,72	83,080	84,070	59,970	68,950	64,760	56,060	
PESO DEL SUELO SECO	140,480	202,740	151,900	406,52	344,58	387,78	317,02	320,81	372,08	
CONTENIDO DE HUMEDAD	19,953	20,499	32,995	17,534	15,764	15,186	14,665	14,279	13,486	
PROMEDIO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD	20,226			16,649			14,472			
PESO UNITARIO DE LA MUESTRA SECA	1,262			1,420			1,505			
EXPANSIÓN H=5"										

FECHA	HORA	TIEMPO TRANSCURRIDO EN DIAS	MOLDE Nº1		MOLDE Nº2		MOLDE Nº3	
			LECTURA	%	LECTURA	%	LECTURA	%
21/4/2019	13:00	0	95		18		49	
22/4/2019	13:00	1						
23/4/2019	13:00	2	112		30		62	
24/4/2019	13:00	3	116		32		64	
25/4/2019	13:00	4	119	0,48	33	0,3	65	0,32

C.B.R.									
PENETRACIÓN PULGADAS	MOLDE Nº1			MOLDE Nº2			MOLDE Nº3		
	CARGA (Lb)	CBR %	CBR	CARGA (Lb)	CBR %	CBR	CARGA (Lb)	CBR %	CBR
0	10			13			18		
0,025	17			24			34		
0,05	24			36			52		
0,075	31			47			67		
0,1	48	1,60		76	2,53		107	3,57	
0,2	57	1,27		93	2,07		121	2,69	
0,3	61			98			124		
0,4	68			100			128		
0,5	70			104			132		



CBR 100% =	3,354
CBR 97% =	3,250
CBR 95% =	2,751

Correo: uluriguido@gmail.com
Cel.: 73245957