

1.1 Antecedentes

La estabilización de suelos se refiere al proceso de someter a los suelos naturales a ciertos tratamientos para aprovechar sus mejores cualidades de manera que puedan soportar las condiciones adversas inherentes al diseño rindiendo en todo tiempo el servicio adecuado que de ellos se espera, es decir dar a los suelos resistencia al esfuerzo cortante, a la deformabilidad o compresibilidad, dar estabilidad volumétrica ante la presencia del agua, siempre buscando, una mejoría sustancial en el comportamiento esfuerzo deformación de los suelos y/o de la estructura que se coloque sobre ellos, a lo largo de su vida útil. Existen varios procedimientos que se emplean para lograr la mejoría de los suelos, pero uno de los más frecuentes es la técnica de estabilización por medios mecánicos y por medios químicos, este último es de mayor interés en este estudio y se logra por la adición de agentes estabilizantes específicos, como la cal, el cemento, el asfalto, cenizas u otros.

En Bolivia y en diversos países del mundo la estabilización química de suelos cuenta con una gama de datos a base de estudios realizados dando como resultados especificaciones, manuales y algunos proyectos de investigación que sirven como guías que pueden seguirse para lograr la mejoría de las propiedades de los suelos como la que es presentada en el Manual de Carreteras de la ABC, volumen 4C. Pero para la adición de la ceniza de cascarilla de arroz en la estabilización de suelos fino con contenido de arcilla, no existe más que algunos trabajos de investigación y artículos donde se hace énfasis en las propiedades puzolanas del producto y estabilizaciones con ceniza de diferente derivación; siendo que en Bolivia la superficie cultivada con arroz se ha incrementado durante los últimos 30 años ya que en la década delos años 70´ se cultivaba aproximadamente 50 mil hectáreas y en el año 2008 esta producción supera las 140 mil hectáreas, sin embargo en los últimos años, 2009 a 2010, esta cantidad va en incremento .

En el departamento de Tarija la ceniza de cascarilla de arroz y cal (producto residual) como agente estabilizador de suelos finos arcillosos no es una práctica muy difundida y por tanto el desarrollo de esta tecnología, todavía no adquiere un carácter universal y como se mencionó anteriormente en Bolivia, su aplicación todavía no está desplegada.

Con el desarrollo de esta investigación sobre la estabilización de suelos, el autor busca establecer que la mezcla ceniza de cascarilla de arroz y cal, empleada como estabilizante funcione adecuadamente en un suelos fino con contenido de arcilla tipo expansivo, donde la ceniza empleada está compuesta entre 90 y 96% por sílice, por lo cual proporcionaría a los suelos la sílice necesaria para reaccionar con la cal y formar productos puzolánicos, es decir que se busca una reacción puzolanica para obtener propiedades cementantes ,ya que los materiales puzolanicos reaccionan con la mezcla de agua e hidróxido de calcio (cal).

Este trabajo abarca las mezclas de “S-CAL-CCA” (suelo-cal-ceniza de cascarilla de arroz), enfocando la evolución temporal de su empleo a nivel mundial, sus mecanismos de estabilización, sus propiedades de ingeniería además de buscar nuevas alternativas de uso de nuevos materiales que tradicionalmente no son usados en nuestra región ni en el país. Si se logra la divulgación y tomar conciencia del uso de estos suelos estabilizados, para la construcción de tramos viales, ya sean caminos vecinales, carreteras, aeropistas, calles, avenidas, se tendrían un menor costo en su construcción y mantenimiento.

1.2 Fundamentación teórica

1.2.1 Presentación de conocimientos científicos

“Investigan el uso de la ceniza de cáscara de arroz como estabilizante de suelos para pavimentos; el estudio aparece en el número de abril de la fecha 16/05/2008 de la Revista Ingeniería de Construcción, de la Escuela de Ingeniería de la Universidad Católica de Chile. La publicación, de 60 páginas, presenta un artículo cuyos autores,

los profesores Leonardo Behak, de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República, Uruguay, y Washington Peres Núñez, de la Universidad Federal de Rio Grande do Sul, Brasil, caracterizaron un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentos.”

“En la U.A.J.M.S de la facultad de Ciencias y Tecnología de la carrera de Ingeniería Civil del departamento de “Estructuras y Ciencias de los materiales” en diciembre del 2010 se realizó el trabajo de investigación de proyecto de grado por el estudiante Hugo Fernando Jaramillo Farfán que titula: “Determinación de la influencia de la adición de ceniza de cascarilla de arroz en hormigones sometidos a compresión”

En el Instituto de Investigaciones Tecnológicas (U.A.G.R.M.) del departamento de Santa Cruz-Bolivia se realizó la investigación por el docente: Ing. Efraín Pérez Chavarría sobre: “Estabilización de suelos para pavimentos adicionando la ceniza de cascarilla de arroz y cal”

Artículos en internet:

“El silicio secreto del arroz” por José Ángel Martos- Barcelona 27 Febrero 2008.

La apuesta por la energía solar ha creado una gran demanda de silicio altamente purificado, clave para la fabricación de células fotovoltaicas. El problema es que en el mercado no hay suficiente silicio con la pureza necesaria para satisfacer la demanda, lo que está provocando una frenética búsqueda de alternativas. Una de las que han salido ha llamado la atención por la materia prima que quiere usar para extraer el silicio: la cáscara de arroz.”

1.2.2 Posición asumido ante el tema

En función de las investigaciones presentadas y análisis se puede considerar que los artículos y trabajos presentados instan a demostrar la estabilización de suelos finos con contenido de arcilla con material cementante; la cual para el trabajo de

investigación planteada se conseguirá combinando la ceniza de la cascarilla del arroz como producto puzzolánico artificial debido a su alto contenido en sílice y la cal.

La adición de cal más ceniza de cascarilla de arroz (CAL+CCA) a un suelo fino es responsable por acciones de intercambio catiónico, floculación y cementación a través de las reacciones puzzolánicas. Las dos primeras son responsables por pequeños incrementos inmediatos de resistencia.

La determinación de la mejoría de las características de resistencia mecánica sobre condiciones de mezclas no curadas interesa en las situaciones en que los efectos inmediatos de adición de cal son necesarios como un expediente constructivo, esto es en los casos de suelos muy plásticos que por su reducida capacidad de soporte. En general, se evaluará la resistencia de las mezclas de S+CAL+CCA por medio de los ensayos de compresión no confinada y CBR. Usualmente el efecto de la cal viva en la reducción de las plasticidades es más rápido que el de la cal hidratada, y se ha descubierto que el primer proceso de adición de la cal es el más eficiente, en nuestro caso la reacción se produce como en el caso de la cal hidratada.

Para ésta investigación se ha de realizar mezclas con diferentes porcentajes de contenido de S+CAL+CCA, en condiciones de muestras no curadas lo cual permitirá determinar la variación del índice de C.B.R con condiciones físico- mecánicas luego del fraguado.

1.3 Diseño teórico

1.3.1 Determinación del problema

1.3.1.1 Situación problemática

No siempre se encuentra el suelo adecuado que garantice la estabilidad y durabilidad de una explanada. Si unimos a ello la creciente importancia medioambiental y la presión social por minimizar la apertura de nuevos préstamos y vertederos necesarios para el movimiento de tierras de una infraestructura, es evidente que se debería

esforzar en utilizar materiales calificados como tolerables, marginales e incluso inadecuados.

Una gran parte de la superficie terrestre está cubierta por suelos parcialmente saturados, y son estos suelos los que son susceptibles a presentar expansiones. Son muchos los países que sufren los efectos de los suelos expansivos, y a pesar de que es difícil estimar el monto total de las afectaciones globales, claramente se observa que es un problema a nivel mundial.

Por otro lado la problemática existente, debido a la contaminación ambiental en el mundo y particularmente en nuestro país debido a la mala utilización de los recursos biomásicos como es la cascarilla de arroz, ha dado lugar al planteamiento de usos eficientes de esta; actualmente el producto es quemado indiscriminadamente o simplemente incorporado al suelo sin atravesar los respectivos procesos de descomposición microbiana, contaminando de forma significativa el medio ambiente.

Por lo que cada vez es más frecuente la búsqueda de materiales económicos que nos brinden características más favorables, estos nos dan alternativas para sustituir otros materiales naturales en la construcción, obligando a ingenieros a familiarizarse con sus propiedades, ventajas y aplicaciones de dichos materiales.

1.3.1.2 Problema

“¿Cuál es el efecto de la ceniza de cascarilla de arroz y cal empleados como aditivos estabilizantes en el comportamiento físico mecánico de los suelos finos con contenido de arcillas?”

1.3.2 Objetivo general

Determinar desde el punto de vista técnico e ingenieril la estabilización de suelos finos con contenido de arcillas mediante la adición de ceniza de cascarilla de arroz-cal como sustancia cementante, con la finalidad de obtener un material con

propiedades físico-mecánicas suficientes para su óptima elección como solución en los problemas de pavimentación.

1.3.3 Objetivos específicos

- Evaluar las propiedades físico-mecánicas del suelo en estado natural mediante la determinación de granulometría, plasticidad, resistencia y contenido de ph existentes en el material.
- Determinar el porcentaje de dióxido de sílice de la ceniza de cascarilla de arroz para la formación de compuestos cementicios con el hidróxido de calcio mediante el análisis químico.
- Establecer una metodología de dosificación en porcentajes de mezcla suelo-cal y suelo-cal-ceniza de cascarilla de arroz; a través de ensayos de laboratorio que permitan evaluar la variación que experimentan las propiedades físicas –mecánicas de los suelos finos con contenido de arcilla.
- Definir en base a los resultados obtenidos los porcentajes óptimos de ceniza de cascarilla de arroz- cal para la estabilización de suelos finos con contenido de arcilla que permitan su empleo en sub rasantes.
- Proponer una metodología de trabajo, que sirva de experiencia para futuras aplicaciones de este material.

1.3.4 Tipo de estudio

En función de la teoría revisada y el planteamiento del problema conjuntamente con los objetivos se analiza que la investigación proyectada en el presente trabajo es de carácter aplicado y del tipo explicativo ya que se pretende mediante la obtención de un producto puzolánico en base a ceniza y cal; lograr estabilizar suelos finos arcillosos por tanto también se considera del tipo exploratorio debido al material cementante encontrado la cual deriva de la incineración de la cascarilla de arroz que produce un alto contenido de sílice entre sus composición química.

1.3.5 Hipótesis

La hipótesis planteada para este trabajo de investigación es:

“Mediante la adición de un porcentaje óptimo de ceniza de cascarilla de arroz más cal (sustancia cementante) se conseguirá el mejoramiento de las propiedades físico mecánicas de los suelos finos con contenido de arcillas, incrementando así su resistencia y disminuyendo su deformación.”

1.3.6 Definición de variables conceptuales y operacionales

- **Variable 1 (Independiente):** son los porcentajes de ceniza y los porcentajes de cal las cuales serán manipuladas.
- **Variable 2 (Dependiente):** son las deficiencias que presentara el suelo en relación a los ensayos de CBR, expansión y límites que serán analizados y comparados.
- **Unidad de Observación (UO):** Es el comportamiento del material suelo arcilloso frente a la adición de porcentajes de la ceniza de cascarilla de arroz y la cal.

1.4 Diseño metodológico

La metodología que se describe a continuación, se emplea en forma independiente, pero representa, una solución técnica, para constituir una estructura vial, dependiendo de los requerimientos, las características y objetivos de cada obra y del nivel al que se quiere llegar en las condiciones de la estructura vial.

1.4.1 Unidad de estudio y decisión muestral

1.4.1.1 Unidad de estudio

La unidad de estudio es la “Estabilización de suelos por medios químicos” porque está referida principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas

patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso.

1.4.1.2 Población

Todos los elementos o materiales disponibles para estabilizar un suelo arcilloso que tenga $CBR \leq 3\%$ y una expansión $> \% 4$ entre estos están por ejemplo la cal, el cloruro de sodio, productos asfálticos, cemento, cenizas, polímeros, etc.

1.4.1.3 Muestra

Son la ceniza de cascarilla de arroz y la cal como materiales con características puzolánicas y cementantes debido a su alto contenido de sílice, utilizados para estabilizar bancos de suelos finos.

1.4.1.4 Muestreo

Para la obtención de la ceniza de cascarilla de arroz se realizara un muestreo no probabilístico ya que es el más apropiado tomando en cuenta que el estudio es de tipo exploratorio por lo tanto en función del conocimiento claro y preciso de la población y/o los individuos más representativos para fines de la investigación que se quiere observar; en este caso son las muestras de cascarilla de arroz para posteriormente calcinarla y obtener su alto contenido de sílice - alúmina y por otro lado la cal.

Para proceder al muestreo en este caso para el material que es el suelo se deberá subdividir el área en unidades de suelos homogéneos (cartografía); en esta subdivisión se debe considerar el tipo de suelo que es arcilloso y que presente comportamiento plástico y expansivo, además tomar en cuenta la topografía, vegetación e historia del manejo previo.

1.4.2 Métodos, Técnicas y Procedimientos

1.4.2.1 Experimentales.-

La realización del siguiente trabajo de investigación se planteara como:

Experimental; puesto que se realizaran ensayos de caracterización en el laboratorio del comportamiento de la ceniza de cascarilla de arroz -cal en suelos finos con contenido de arcilla.

1.4.2.2 Experimento.-

Se realizaran ensayos de caracterización a todos los materiales, tales como:

- ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO (ASTM D422 AASHTO T88)
- DETERMINACIÓN DEL LÍMITE LÍQUIDO DE LOS SUELOS (ASTM D4318 AASHTO T89)
- DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO E ÍNDICE DE PLASTICIDAD (ASTM D4318 AASHTO T90)
- RELACIÓN DE SOPORTE DE CALIFORNIA (ASTM D1883-99)
- PROCTOR SEGÚN:AASHTO T-180/ASTM D1557
- COMPRESIÓN INCONFINADA EN MUESTRAS DE SUELOS (ASTM D2126 AASHTO T208)
- DETERMINACIÓN DEL PH DE LOS SUELOS (ASTM G51).-

Todo esto con el fin de ver las características que presentan dichos materiales.

Por otra parte se analizara el comportamiento del suelo en las cuales se incluirá la ceniza de cascarilla de arroz más cal de manera tal que permita al investigador partir

de la observación de fenómeno o situaciones particulares que enmarcan el problema de investigación y concluir proposiciones y, a su vez, premisas que expliquen fenómenos similares a analizar siguiendo un orden sistemático para poder llevar a cabalidad la investigación.

Plan de trabajo.

Se plantea disponer de muestras de suelos alterados e inalterados concernientes a los bancos de préstamo de la zona de barrio Miraflores de la ciudad de Tarija (Figura 1.1) y el tramo de la avenida Principal en el campus Universitario (Figura 1.2) que presentan un CBR $< 3\%$ y una expansión $> 4\%$ pertenecientes a la clasificación de grupo según AASHTO: A-7 donde la calidad para subrasantes son de regular a mala por su alta plasticidad. Se restringen suelos que tengan presencia de sulfatos de calcio o magnesio u otras sustancias ávidas de agua ya que privan al estabilizante de la humedad necesaria para su respectiva reacción. Las muestras serán guardadas en el Laboratorio de la Universidad Juan Misael Saracho para ser ensayadas posteriormente.

Figura 1.1: Zona 1 de Recolección de muestra



Fuente: Elaboración Propia

Figura 1.2: Zona 2 de Recolección de muestra



Fuente: Elaboración Propia

La cascarilla de arroz acopiada para la investigación será de Montero - Santa Cruz. Para la incineración al no contar con los medios o con hornos para controlar las temperaturas se dispondrá de un turril de lámina de acero.

Para garantizar la calidad de la ceniza de cascarilla de arroz se realizara el análisis químico en el laboratorio químico Spectrolab de la Universidad Técnica de Oruro. Como para su obtención no se cuenta con materiales para controlar la temperatura de incineración, este análisis servirá como respaldo para garantizar su contenido de sílice y alúmina.

El agua es un componente importante en la elaboración de la mezcla (S -CAL-CCA) para lubricar las partículas de suelo y ayudar a obtener la máxima compactación o densidad del material; la cual deberá ser limpia y libre de cantidades perjudiciales de álcalis o de materia orgánica. El agua potable dentro de la U.A.J.M.S. es satisfactoria para los propósitos que persigue la estabilización en el presente trabajo.

El trabajo de investigación y los ensayos para el suelo con y sin el material estabilizante (ceniza de cascarilla de arroz más cal), se lo realizaran en el laboratorio de suelos y hormigones de la “Universidad Autónoma Juan Misael Saracho”.El

análisis de pH en los suelos con y sin estabilizante se lo realizara en el laboratorio de química de la U.A.J.M.S.

El esquema planteado consiste en trabajar con diferentes proporciones de cada material componentes del S+CAL+CCA (suelo, cal y ceniza de cascarilla de arroz) para que en base al análisis de las propiedades físicas y mecánicas más relevantes de cada una de las combinaciones se pueda estimar el contenido adecuado de ceniza de cascarilla de arroz y cal a fin de obtener una buena estabilización del suelo tratado.

Para una simple mejora o para la estabilización, el porcentaje de cal será aquel que consiga reducir la Plasticidad y el Hinchamiento y aumentar el CBR hasta conseguir los valores objetivos. Ese porcentaje se conocerá mezclando el suelo con diferentes porcentajes de cal y realizando los ensayos correspondientes.

Esa será, entonces, la fórmula de trabajo es decir para la mejora suele ser suficiente un porcentaje de cal inferior al 3% y para la estabilización los porcentajes son normalmente superiores a 3% y pueden llegar al 8% con suelos especialmente plásticos. El método más rápido y fiable para conocer el porcentaje de cal antes de realizar otros ensayos y confirmar con ellos ese porcentaje es el conocido “método del pH” (Eades and Grim, 1966) que está reflejado en la Norma ASTM D6276 [Standard Test Method for Using pH Estimate the Soil-Lime Proportion Requirement for Soil Stabilization].

El porcentaje de cal que se determina por el ensayo es aquel que es capaz de liberar sílice y alúmina del material fino para reaccionar con el calcio de la cal y formar los silicatos y aluminatos cálcicos hidratados con propiedades cementantes similares a las del cemento. El porcentaje de consigna es aquel que consigue un valor de pH de 12,4.

Las diferentes cantidades de ceniza de cascarilla de arroz más cal en la mezcla que serán utilizadas para realizar los ensayos de compactación y resistencia, estarán preestablecidas de acuerdo con los resultados obtenidos en la prueba de plasticidad,

es decir, las propiedades de ceniza de cascarilla de arroz más cal que demuestren un significativo cambio en la magnitud de la plasticidad serán tomadas en cuenta para realizar tales ensayos.

Por otro lado también cuando se proceda a someter los especímenes de suelos a pruebas de compactación, CBR y compresión simple y tomando como referencia los resultados de los distintos ensayos se optara como contenido óptimo de (CCA-CAL) al primer valor que proporcione la resistencia de diseño de (10 kg/cm^2), valor apropiado para subrasantes.

Se propone efectuar pruebas preliminares de límites de Atterberg en mezclas de prueba con contenido de cal igual 2,3,4 y 5 % en relación al peso seco del suelo.

Las mezclas con cal ceniza de cáscara de arroz se darán entre un 3 y 10 %.

- Suelo natural
- Suelo natural + CAL (2%)
- Suelo natural + CAL (3%)
- Suelo natural + CAL (4%)
- Suelo natural + CAL (5%)
- Suelo natural + CAL (%) + CCA (3%)
- Suelo natural + CAL (%) + CCA (5%)
- Suelo natural + CAL (%) + CCA (7%)
- Suelo natural + CAL (%) + CCA (10%)

1.4.3 Preparación para la aplicación de instrumentos

1.4.3.1 Descripción de equipos

Son los equipos y materiales estandarizados de Laboratorio de Suelos y Hormigón en la U.A.J.M.S. empleados para la realización de los ensayos del presente trabajo los cuales fueron mencionados anteriormente.

Equipo no normalizado

- **Turril** (de chapa de acero).-Este equipo se utilizara para la incineración de la cascarilla de arroz la cual será previamente calentado y también durante la quema de la cascarilla con ayuda de leña y carbón.

1.4.4 Tratamiento estadístico

1.4.4.1 Confiabilidad

La confiabilidad mayormente es un concepto cuantitativo en todos los procesos de investigación. Por ello para obtenerla en este estudio, en primer lugar, las pruebas de laboratorio para CBR y expansión de los materiales q son los suelos con y sin aditivo serán 3 ensayos por cada porcentaje de CBR por otro lado los resultados obtenidos serán analizados en forma crítica, rigiéndose con base científica, razón por la cual no se entrara en mayor detalle de los mismos y mencionando solo algunos puntos importantes relacionados con el tema.

Manejo de la Desviación de datos experimentales por medio del método de regresión lineal

Nos permite ajustar los datos experimentales conforme a una línea recta o curva, que muestre una cierta tendencia que luego permita sacar conclusiones más reales sobre el comportamiento del sistema estudiado. Pero también pueden existir otras formas polinomiales y ecuaciones funcionales que uno pueda postular para realizar el trabajo de mejor ajuste de curvas, algunas de ellas son las siguientes: regresión lineal, regresión polinómica, regresión logarítmica y regresión exponencial

1.5 Alcance

Esta investigación pretende establecer con claridad la influencia de la actividad puzolánica y la consecuente cementación que esta produce en los suelos finos con contenido de arcilla en dos zonas de la ciudad de Tarija con la mezcla de cal y ceniza

de cascarilla de arroz (material puzolanico). De este modo, se puede optimizar el uso de una técnica muy ventajosa para la estabilización de estos materiales como lo son las mezclas con cal.

Para poder realizar el estudio propuesto en el trabajo de investigación, se pretende abarcar primeramente una parte teórica sobre la estabilización con cal y la reacción puzolánica producida por la cal y ceniza de cascarilla de arroz (CCA) debido al alto contenido en sílice que esta posee.

Por tanto se implanta a elaborar una metodología que nos permita encontrar la dosificación de cal y CCA adecuada en una estabilización de suelos finos por lo que se proyecta explicar y practicar los ensayos en laboratorio de: granulometría, límites, compactación, CBR, compresión inconfiada y ensayos de pH, para la caracterización de cada uno de los suelos en su estado natural tanto como para la mezclas con los aditivos estabilizantes.

Todos los datos y resultados adquiridos de los ensayos de laboratorio serán sometidos a un proceso de análisis para su valoración, lo cual se verá reflejado en la obtención de curvas, cuadros y/o planillas; con dichas herramientas podremos estipular los comportamientos de los suelos naturales y estabilizados respecto a la resistencia y deformación.

2.1 Estabilidad del suelo

Es de todos conocido la variabilidad y complejidad de los suelos. Sin embargo, debido a sus diversas utilidades, el ingeniero tiene grandes oportunidades para desarrollar sus habilidades, al utilizar a los suelos como un material ingenieril. (Del Castillo, 2008).

Desafortunadamente, en Bolivia existen muchos suelos que en su estado natural no son adecuados para su utilización en las obras por no reunir los requisitos especificados. En estos casos los ingenieros deberán tomar una de las tres decisiones siguientes:

- Aceptar el material tal y como esta y efectuar el diseño de acuerdo con las restricciones impuestas por la calidad de la materia.
- Remover y desechar el suelo del lugar y sustituirlo por un suelo de características adecuadas.
- Alterar o cambiar las propiedades del material existente de tal manera que se obtenga un material que reúna la mejor forma los requisitos impuestos, o cuando menos que la calidad obtenida será adecuada.

El objetivo del presente trabajo es considerar solamente lo que representa a la tercera decisión, es decir, que nos referimos solamente a la que se conoce como Estabilización de Suelos.¹

Por tanto se denomina estabilización de suelos al proceso de someter a los suelos naturales a ciertos tratamientos para aprovechar sus mejores cualidades, siempre buscando una mejoría sustancial en el comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos y/o de la estructura que se coloque sobre ellos, a lo largo de su vida útil²; obteniéndose una capa de asiento del firme estable y durable, capaz de soportar los

¹ Ing. Erick Oliver Cervantes Gutiérrez "Estabilización de Suelos Arcillosos elaborados con precursores nano-métricos" _Morelia, Mayo de 2010.

² <http://www.docstoc.com/docs/137461162/Estabilizaci%C3%B3n-de-Suelos>

efectos del tránsito y las condiciones del clima más severas y por ende asegure geotécnicamente el comportamiento de la explanada.

Para el proceso de estabilización de los suelos existen dos opciones de ejecución, mezcla en central o plantas móviles y mezclas in situ.³

Se define un suelo estabilizado “in situ” a la mezcla homogénea y uniforme de un suelo con cal o con cemento, y eventualmente agua, en la propia traza de la carretera, la cual convenientemente compactada, tiene por objeto disminuir la susceptibilidad al agua o aumentar su resistencia, para su uso en la formación de explanadas.⁴

Figura 2.1: Estabilización en planta y estabilización in situ con cemento



Fuente: <http://www.firmesecologicossoltec.com/>

2.2 Importancia de la estabilización de suelos

Es importante la estabilización para mejorar varias propiedades esenciales de los suelos; pero también puede aparecer el caso de que algunas de estas propiedades lleguen a deteriorarse inmediatamente o con el paso del tiempo. Para evitar esta

³ Wilfredo Alfonso Valle ,”Estabilización de suelos arcillosos plásticos con mineralizadores en ambientes sulfatados o yesíferos” Proyecto Fin de Master, Madrid Septiembre de 2010.

⁴ Artículo 512 (O.C. 10/2002)-Carreteros

situación, es importante elegir o especificar un sistema de estabilización y ver que sea el más correcto posible. Además, es necesario determinar el porcentaje óptimo de estabilizante, y tener la seguridad que sea el adecuado para cada caso particular. Por otro lado es importante realizar la investigación del comportamiento de los materiales estabilizados, analizando a corto y largo plazo las propiedades que se mejoran y se mantienen al paso del tiempo, estando consientes del costo que implica la tarea, de las múltiples propiedades del suelo, las más importantes que se buscan mejorar con las estabilizaciones son las siguientes:

a) Disminuir la Plasticidad.

La plasticidad del suelo está relacionada con el concepto de límites de Atterberg, término conocido en la mecánica de suelos. Estos parámetros relacionan la capacidad que tienen los suelos cohesivos para adsorber agua sobre la superficie de sus partículas, ya que cuanto mayor es la cantidad de agua que contiene un suelo, menor es la interacción entre sus partículas adyacentes y mas se aproxima el suelo en su comportamiento al de un material liquido; por lo tanto, una alteración en los valores de estos límites indicara una modificación del agua adsorbida por el suelo.

El término limoso se aplica cuando las fracciones de finos del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menor. El término arcilloso se aplica cuando las fracciones de finos tienen un índice de plasticidad de 11 o mayor (BRAJA M. DAS).

Diversos autores han demostrado que puede lograrse un cambio de los límites de Atterberg modificando químicamente la capacidad del mineral de arcilla para captar las moléculas de agua en ese sentido, la estabilización química se ha usado con gran eficacia para modificar esta propiedad.

b) Estabilidad Volumétrica.

Esta propiedad se refiere al apreciable cambio de volumen que sufren los suelos, debido al cambio de humedad y los esfuerzos internos afectados por el agua.

Cuando un suelo saturado se seca, cambia su volumen (retracción). Esta pérdida de volumen se debe a la desecación ocurrida en el suelo, que provoca una modificación en la tensión capilar del menisco formado en cada, poro de la superficie. Luego se produce una tracción en el agua del suelo y la correspondiente compresión en la estructura del mismo, siendo ésta última bastante considerable e inclusive actúa como una carga en el mismo.

Se produce la expansión o hinchamiento cuando un suelo seco, cohesivo aumenta su humedad; este fenómeno se debe a diversos factores como la atracción del agua por los minerales arcillosos, la repulsión eléctrica de las partículas de arcilla y de sus cationes absorbidos.

La estabilidad volumétrica está íntimamente relacionada con la composición mineralógica de los suelos y los cambios climatológicos de la región, esta propiedad es propia de los suelos que contienen un alto porcentaje de minerales arcillosos.

La estabilidad volumétrica se modifica cementando el material de modo que disminuya la capacidad del material de absorber agua, siendo más efectivos en las arcillas profundas.

c) Compresibilidad.

La compresibilidad es una propiedad que está relacionada íntimamente con el cambio volumétrico del suelo, el cual se manifiesta a través de un asentamiento. Este asentamiento es producido por el peso propio del material o por cargas externas superficiales que originan un cambio en la relación de vacíos, flexión y la distorsión o, cambio de formas de la fase sólida del suelo inmediatamente debajo de la carga. Asimismo, la estructura de los sólidos especialmente en los puntos de contacto de un factor irreversible con la compresibilidad de todos los suelos no cohesivos. Sin embargo, en las arcillas el factor más importante de la compresibilidad es la repulsión eléctrica entre sus partículas que tienen cargas iguales o, que están rodeadas de cationes con cargas semejantes que las mantienen apartadas.

La reducción de la compresibilidad del suelo puede lograrse llenando los poros del mismo, es decir, cementando los granos con un material rígido. Pero también, es posible reducir esta propiedad cambiando las fuerzas del agua absorbida por el mineral de arcilla.

En términos generales, todos los métodos de estabilización revisados en anteriores secciones pueden incluir en esta propiedad, pero frecuentemente la compactación y la estabilización química son las que más se utilizan.

d) Resistencia o Capacidad Portante.

Esta propiedad se refiere a la capacidad que tiene el suelo de soportar cargas continuas de tráfico, para no sufrir fallas y deformaciones inadmisibles en su estructura.

En general, todas las formas de estabilización química revisadas anteriormente, pueden mejorar en mayor y menor grado de resistencia del suelo; pero mucho depende de la cantidad de materia orgánica que contiene el mismo, ya que el efecto de la materia orgánica en el suelo estabilizado por medios químicos, reduce la reacción con el aditivo empleado y disminuye considerablemente la resistencia normalmente adquirida.

2.3 Tipos de estabilización

Son muchos los procedimientos que pueden seguirse para lograr esa mejoría de las propiedades de los suelos, con vistas a hacerlos apropiados para algún uso específico, lo que constituye la estabilización. La siguiente lista de técnicas de estabilización no agota seguramente la amplia gama existente, aunque resume las más conocidas en nuestro medio.

- a) Estabilización mecánica
- b) Estabilización Física o granulométrica
- c) Estabilización química o por medios químicos

- d) Estabilización Físico-Química
- e) Estabilización por medios eléctricos

La gran variabilidad de los suelos y sus composiciones hacen que cada técnica de estabilización resulte sólo aplicable a un número limitado de tipo de ellos; en muchas ocasiones esa variabilidad se manifiesta a lo largo de algunos metros, en tanto que en otras a lo largo de algunos kilómetros, pero en cualquier caso suele ser frecuente que para aplicar una técnica de estabilización económicamente hayan de involucrarse varios tipos de suelos.

De esta manera una optimizada estabilización de suelos, abre la posibilidad de una utilización eficaz de los materiales locales, para la construcción y conservación de una vía.⁵

2.3.1 Estabilización química o por medios químicos.

En estos casos, la estabilización se hace a través de un compuesto químico que reacciona con el suelo produciendo cambios irreversibles en este ,tanto físicos como en su estructura química ,dando lugar a que la capa tratada mejore sus propiedades físicas y mecánicas.⁶

Dentro de este grupo de estabilización, las sustancias químicas más comunes son: cal y cemento.

- Cal: Disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica.
- Cemento portland: Aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.

Otros productos también utilizados son:

⁵ Ing. Marcelo Segovia Cortez ;Apuntes y copias de la materia Carreteras III –Unidad 1 : Estabilización de suelos.

<http://www.docstoc.com/docs/137461162/Estabilizaci%C3%B3n-de-Suelos>

⁶ Revista ingenierías, Números 1-5 _Pág. 78

- **Productos Asfálticos:** Es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.
- **Cloruro de sodio:** Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- **Cloruro de calcio:** Impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.
- **Escorias de fundición:** Se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- **Polímeros:** Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.
- **Caucho de Neumáticos:** Este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.⁷

2.4 Sustancias cementantes

Son materiales aglomerantes que tienen las propiedades de adherencia y cohesión requeridas para unir fragmentos minerales entre sí, formando una masa sólida continua, de resistencia y durabilidad adecuadas.

Los principales materiales cementantes son:

- La arcilla
- Los cementos
- El yeso
- Los asfaltos y alquitranes
- La cal
- Los monómeros polimerizados

⁷ Wilfredo Alfonso Valle , "Estabilización de suelos arcillosos plásticos con mineralizadores en ambientes sulfatados o yesíferos" Proyecto Fin de Master, Madrid Septiembre de 2010. Pag. 15-16

2.4.1 Puzolanas.-

La norma ASTM C 618 define las puzolanas de la siguiente forma:

“Las puzolanas son materiales silicios o silicios y aluminosos, los cuales por si solos tienen muy poco o ningún valor cementante, sin embargo, finamente divididas y ante la presencia de humedad, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio a la temperatura ambiente para formar compuestos que poseen propiedades cementantes”.⁸

Una puzolana es un material, natural o artificial, que contiene fundamentalmente silicio (SiO_2) o silicio y aluminio (Al_2O_3) (el conjunto sílice más alúmina varía a menudo entre el 70 y el 80 %), esto les da un carácter ácido y, por tanto, una gran afinidad por la cal (tendencia a combinarse con la cal en presencia de agua a temperatura ambiente). además la puzolana está compuesta de fase vítrea en su mayor parte, siendo la fase cristalina muy pequeña, lo que hace que sean materiales de alta reactividad.

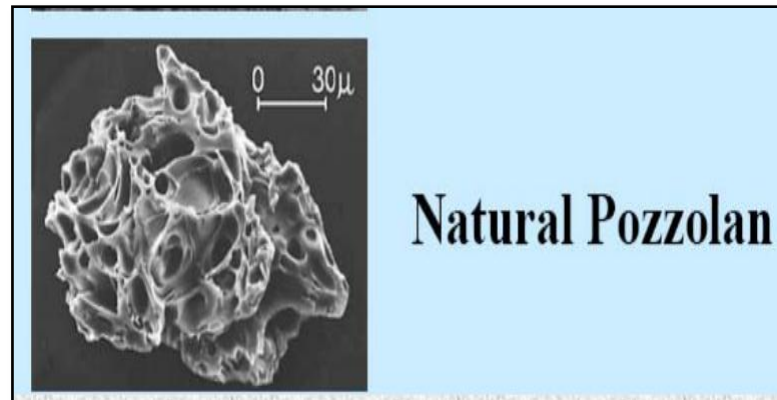
La puzolana por si misma posee un valor cementante nulo o muy pequeño. Sin embargo finamente molida y en presencia de humedad reacciona con el hidróxido cálcico (activador) a temperatura ambiente, dando lugar a una nueva formación de compuestos estables, poco solubles en el agua y que poseen características cementantes, es decir capaces de desarrollar resistencia por endurecimiento hidráulico bajo el nombre de puzolanas se incluyen productos que son bastante diferentes en cuanto a su origen, estructura, composición química y mineralógica y que tienen en común lo que se denomina “actividad puzolánica” definida anteriormente.⁹

Las puzolanas pueden reemplazar de 15 a 40% del cemento portland sin reducir significativamente la resistencia del concreto.

⁸ Norma ASTM C 618

⁹ <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.Reaccion.PUZOLANICA.pdf>

Figura 2.2: Puzolana Natural



Fuente: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.Reaccion.PUZOLANICA.pdf>

La mayoría de materiales puzolánicos descritos aquí son subproductos de procesos industriales o agrícolas, que son producidos en grandes cantidades, constituyendo un problema de desperdicio, si permanecen sin utilizar. Incluso si no hubiera otros beneficios, sólo este aspecto justificaría un incremento del empleo de estos materiales. Comparado con la producción y empleo del cemento portland, estos materiales contribuyen a ahorrar costos y energías, ayudan a reducir la contaminación ambiental y, en la mayoría de los casos, mejoran la calidad del producto final.

2.4.1.1 Tipos de Puzolanas

Básicamente hay dos tipos de puzolana, llamadas puzolanas naturales y artificiales.

Las puzolanas naturales esencialmente son cenizas volcánicas de actividades volcánicas geológicamente recientes.

Las puzolanas artificiales son el resultado de diversos procesos industriales y agrícolas, generalmente como subproductos. Las puzolanas artificiales más importantes son arcilla cocida, cenizas de combustible pulverizado, escoria de altos hornos granulada y molida y ceniza de cascarilla de arroz.¹⁰

¹⁰ <http://ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms09.htm>

El Bureau of Reclamation, entidad norteamericana con mayor experiencia en la materia, considera los siguientes tipos:

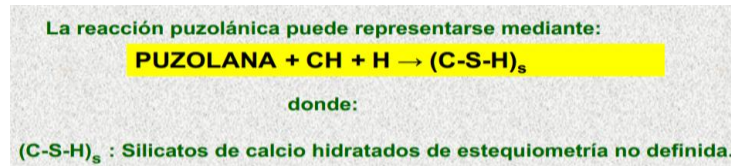
- a) Arcillas y Pizarras (que requieren calcinarse para ser activas)
 - Caolinita
 - Montmorillonita
- b) Materiales Opalinos (en los cuales la calcinación puede o no ser necesaria)
 - Tierra de diatomeas, semiopalos y pizarras
- c) Tobas volcánicas y pumicitas (en las cuales la calcinación puede o no ser necesaria)
 - Riolíticos
 - Andesíticos
 - Fenolíticos
- d) Sub Productos Industriales
 - Escoria de alto horno
 - Ceniza volante
 - Humo silíceo¹¹

2.4.1.2 Reacción Puzolánica

La denominada reacción puzolánica es principalmente la que se da entre el óxido de Silicio o sílice (SiO_2), la cal o hidróxido de Calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, conocido como portlandita) y el agua, para producir silicatos de calcio hidratados (CSH). Es una reacción equivalente a la que se da en el cemento portland y se obtiene un producto muy similar.

¹¹ <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10834/8/CAPITULO%201.pdf>

Por su parte la reacción puzolánica tendría la siguiente forma:



Fuente: <http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion4.Reaccion.PUZOLANICA.pdf>

Es decir, no produce cal, sino que la consume, siendo el CSH su principal producto de reacción.

Por tanto se puede decir que:

- La reacción puzolánica consume CH en lugar de generarlo, lo que hace más resistentes a las mezclas en ambientes ácidos.
- Debido a su pequeño tamaño de grano las puzolanas rellenan muy eficientemente los espacios muertos dificultando la formación de los poros capilares que se generan en la hidratación del cemento.
- Es una reacción lenta, por lo que la liberación de calor también lo será, aportando estabilidad, pero retrasando el fraguado.¹²

2.4.1.3 Reacción Puzolánica y cementante

Esta reacción se produce debido a la reacción entre el calcio de la cal, con la sílice y alúmina que son los minerales liberados por el suelo arcilloso y conocidos comúnmente como material puzolánico.

La combinación de los tres componentes, más el agua, produce un gel de silicato y aluminato de calcio hidratado, que es un agente cementante natural que cubre y liga las partículas de arcilla; luego este gel va cristalizando gradualmente hasta cementar las partículas de arcilla de manera similar a aquella producida por la hidratación del

¹² Ing. Antonio Gómez Gonzales "Caracterización y utilización de puzolanas como aditivos minerales activos en cementos ", Proyecto fin de carrera, Valencia 15 de abril de 2009. Pág. 25

cemento portland, pero con la diferencia de que en la cal, este proceso es más lenta y progresiva en el tiempo.

Estudios realizados por diversos autores, concluyen que la razón de cementación está influenciada por la cantidad y tipo de puzolana, así como también del mineral de arcilla y del tipo y cantidad de cal.

2.4.2 Producto residual : Ceniza de Cascarilla de arroz (CCA)

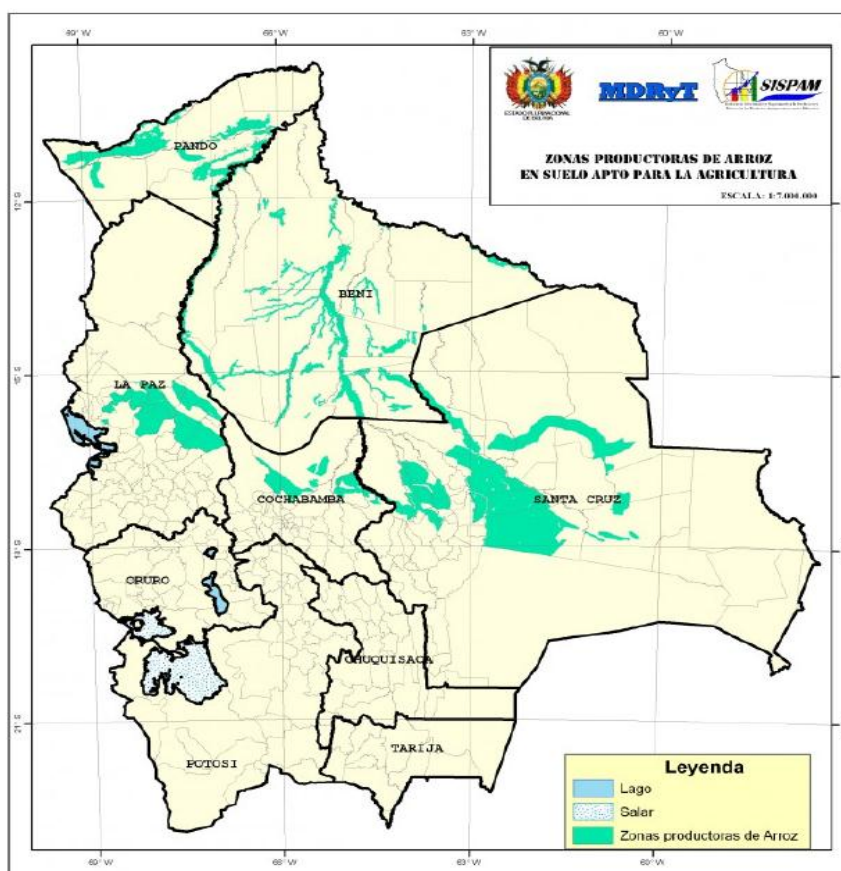
Es bien sabido que el arroz constituye uno de los pilares de la alimentación mundial, siendo el segundo alimento más consumido en el mundo, después del trigo y constituyendo la base de la alimentación en Asia y América Latina. Esto implica una producción que satisfaga estas necesidades, y por tanto un área cosechada que permita alcanzar esta producción. Ante la necesidad de desarrollar alternativas tecnológicas que permitan la utilización de elementos desechados en procesos productivos para aprovechar su potencial y contribuir a la disminución del impacto ambiental que puedan generar por una inadecuada disposición, surge la oportunidad de aprovechar productos vegetales de desecho que permitan innovar en el área de los materiales de ingeniería, es caso de la “cáscara o cascarilla de arroz”.

2.4.2.1 Producción de cascarilla de arroz en Bolivia

La cascarilla de arroz es el mayor residuo resultante de la producción agrícola de granos y su disposición final es uno de los mayores problemas existentes en los países productores de arroz. Cada 4 toneladas de arroz producidas, 1 tonelada es cascarilla de arroz (Ali et al., 1992). Velupillai et al. (1996) estimaron que más de 100 millones de toneladas de cascarilla de arroz son generadas cada año en el mundo. En Uruguay la producción de arroz ha aumentado de 391.188 ton en la zafra 1987-88 hasta 1.214.490 ton en la zafra 2004-05 (ACA, 2006), estimándose que sólo en esta última zafra se generaron 300.000 ton de cascarilla. La producción anual de arroz en Brasil se ha mantenido próxima a 10.000.000 tn, siendo la cantidad de cáscara generada más significativa aun.

En Bolivia, las zonas potenciales de cultivo de arroz se presentan en siete departamentos de Bolivia (Oruro y Potosí, son la excepción), siendo Beni, Santa Cruz, La Paz y Cochabamba las zonas que la explotan para venta comercial intensiva, quedando los demás departamentos, como zonas de producción dispersa, particularmente para consumo. Los principales productores son Santa Cruz (60%) y Beni (29%), que en conjunto constituyen el 89% de la producción total de arroz en Bolivia. El arroz con cascarilla para consumo, debe ser procesado en los llamados “ingenios arroceros”, siendo el secado, la principal operación de conservación en el proceso de beneficiado del arroz. Esta operación permite un almacenamiento de producto de hasta 2 años antes de su beneficiado.

Figura 2.3: Zonas potenciales de cultivo de arroz en Bolivia



Fuente: “Análisis y pertinencia de la devolución del afrecho de los ingenios arroceros hacia los productores de arroz” - 2011

Los departamentos más importantes de producción son Santa Cruz y Beni, que producen más del 90 % del arroz nacional.

En Bolivia se identifican dos tipos de formas de cultivo, el seco y el que se realiza con riego. Los rendimientos varían de acuerdo a su aplicación, desde 2,74 toneladas por hectárea en el cultivo seco, hasta 6 toneladas por hectárea en el cultivo con riego. Se estima el 80% de cultivo seco y 20% cultivo a riego.

De acuerdo a estimaciones del FENCA (Federación Nacional de Cooperativas Arroceras) al 2005, en Bolivia existirían alrededor de 300 unidades de procesamiento de arroz: 147 ingenios y 153 peladoras, distribuidas en las zonas de mayor producción: Santa Cruz, Trinidad y La Paz. Es necesario también hacer notar que la mayor concentración de las mismas, específicamente en el Departamento de Santa Cruz, se encuentra en las zonas de Yapacaní y Montero.

Los rendimientos en el proceso de beneficiado del arroz en chala, de acuerdo al estudio técnico de ASPAR (Asociación de Productores de Arroz) 2006, presentadas en el libro “El Arroz en Bolivia”, en función a los productos originados del beneficiado del arroz, son los siguientes:

Tabla 2.1 Rendimiento del arroz

PRODUCTOS Y SUBPRODUCTOS	PORCENTAJE
Arroz entero	49,45%
Tres cuartos	6,17%
Granillo	10,27%
Colilla	3,37%
Afrecho	5,97%
Chala	24,77%
Total	100,00%

Fuente: “Análisis y pertinencia de la devolución del afrecho de los ingenios arroceros hacia los productores de arroz” - 2011

Los niveles de producción que se verifican en Bolivia son los siguientes:¹³

Tabla2.2: Evolución de la producción de arroz con cascarilla en Bolivia

Descripción	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Superficie cultivada (has)	198,688	205,178	166,743	178,533	200,448	193,82
Producción (Tn)	513,653	531,969	376,97	435,96	489,205	449,458
Rendimiento	2,585	2,593	2,261	2,442	2,441	2,319

Fuente: “Análisis y pertinencia de la devolución del afrecho de los ingenios arroceros hacia los productores de arroz” - 2011

Con el crecimiento de la producción agrícola e industrial, la cascarilla de arroz que representa aproximadamente el 25 % en peso con relación al peso total, en tal sentido habrá que tomar en cuenta la deposición de la cáscara para evitar problemas de contaminación

La disposición final de tales cantidades de cáscara es un auténtico problema sin solución definitiva, para reducir el volumen de residuo a depositar la cáscara de arroz es quemada, intentando darle una utilidad económica, como energético en calderas de secado del propio arroz (proceso de parbolización), combustible para la producción de cemento Portland, para la generación de energía eléctrica, estabilización de suelos, etc.

2.4.2.2 Ceniza de cascarilla de arroz (CCA)

En 1934 algunos científicos japoneses ya habían descubierto que el silicio era beneficioso para el crecimiento del arroz, pero no fue hasta 1938 cuando se confirmó la presencia de la sílice en la estructura de la planta.

Dependiendo de la parte de la planta que estemos considerando, el contenido en sílice es distinto, variando entre un 2.63% y un 13.3%, presentándose los mayores porcentajes en la cascarilla. Uno de los factores positivos que presenta la cascarilla de

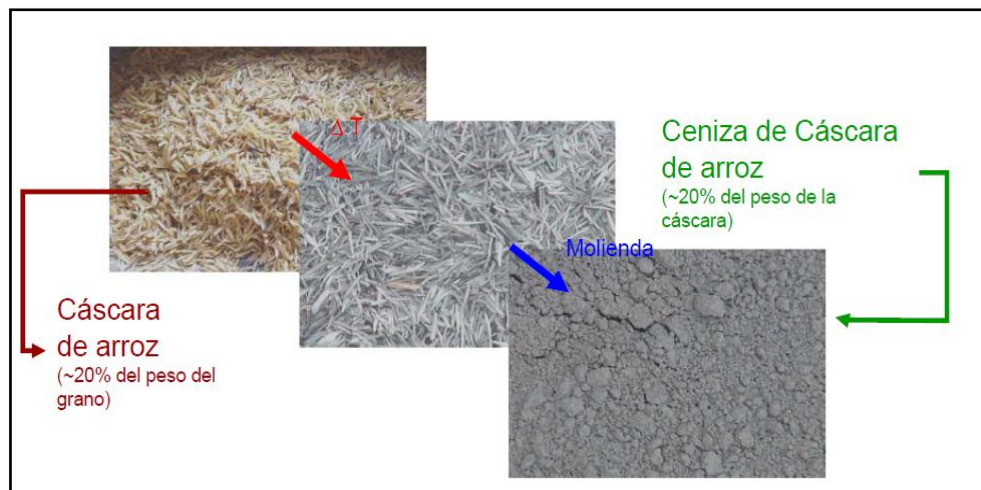
¹³ Análisis y Pertinencia de la Devolución del afrecho de los ingenios arroceros hacia los productores de arroz AEMP(Autoridad de fiscalización y control social de empresas)

arroz es que al ser calcinada produce una gran cantidad de ceniza, entre el 13% y el 29% del peso inicial, y el contenido de sílice que presenta es altísimo, entre el 87% y el 97%.

➤ **Combustión.**

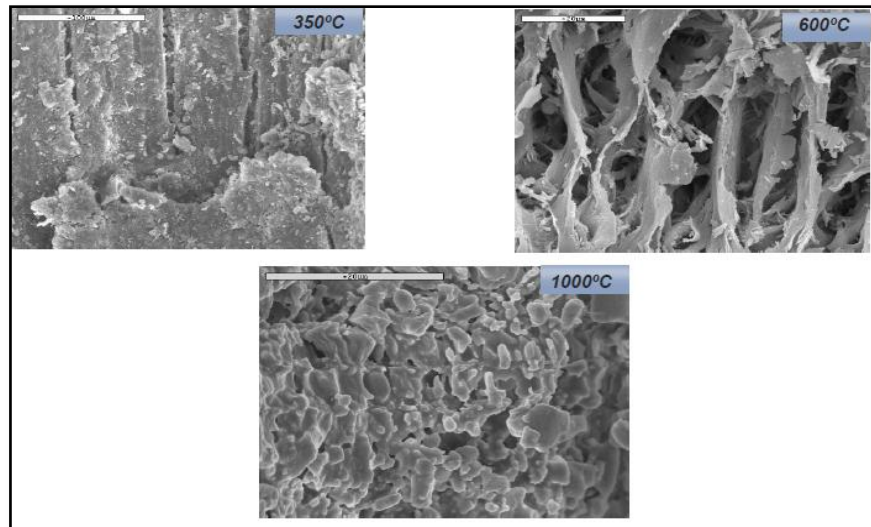
La combustión de los residuos agrícolas elimina la materia orgánica y, en la mayoría de los casos, produce una ceniza rica en sílice. Como el tema que tratamos de los residuos agrícolas comunes, la cascarilla de arroz produce la ceniza de mayor cantidad, alrededor del 20% del peso, que también tiene el mayor contenido de sílice, alrededor del 93% del peso. Es su gran contenido de sílice lo que le da a la ceniza sus propiedades puzolánicas. Sin embargo, sólo la sílice amorfa (no cristalino) posee estas propiedades, es por esta razón que la temperatura y duración de la combustión son importantes en la producción de la ceniza de cáscara de arroz (CCA). La sílice amorfa se obtiene quemando la ceniza a una temperatura menor de 700°C. Una combustión sin control de las cascarillas de arroz, por ejemplo: Cuando son usadas como combustible o quemada en un montón, generalmente a temperaturas mayores de 800°C, genera la cristalización de la sílice, que es menos reactiva.

Figura 2.4: Combustión: Ceniza de cascarilla de arroz



Fuente: “Materiales y tecnologías constructivas no convencionales: uso en países en vías de desarrollo”

Figura 2.5: Combustión: Ceniza de cascarilla de arroz a diferentes temperaturas



Fuente: “Materiales y tecnologías constructivas no convencionales: uso en países en vías de desarrollo”

La ceniza reactiva es de color gris oscura a blanca, dependiendo del carbón residual en ella, que no tiene efecto negativo si es menor de 10%. Para mejorar su reactividad, la ceniza es pulverizada en un molino de bolas por aproximadamente una hora, o más si contiene sílice cristalina. La ceniza puede reemplazar hasta 30% del cemento de un mortero o concreto. Alternativamente, puede ser mezclada con 30 a 50% de cal hidratada para ser empleada como cemento en morteros, enlucidos y concreto en masa.

2.4.2.3 Propiedades de la Ceniza de Cascarilla de Arroz

La cascarilla de arroz es de consistencia quebradiza, abrasiva y su color varía del pardo rojizo al púrpura oscuro. Su densidad es baja, por lo cual al apilarse ocupa grandes espacios. El peso específico es de 125 kg/ m³, es decir, 1 tonelada ocupa un espacio de 8 m³ a granel (Varón 2005). La composición química de la cascarilla de arroz y de sus cenizas se muestra en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Composición química de la cascarilla de arroz y de las cenizas de la cascarilla de arroz

CASCARILLA DE ARROZ		CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ	
Componente	%	Componente	%
Carbono	39,1	Ceniza de Sílice(SiO ₂)	94,1
Hidrógeno	5,2	Oxido de Calcio (CaO)	0,55
Nitrógeno	0,6	Oxido de magnesio (MgO)	0,95
Oxígeno	37,2	Oxido de Potasio (K ₂ O)	2,10
Azufre	0,1	Oxido de Sodio(Na ₂ O)	0,11
Cenizas	17,8	Sulfato	0,06
		Cloro	0,05
		Oxido de titanio (TiO ₂)	0,05
		Oxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)	0,12
		Otros componentes (P ₂ O ₅ , F ₂ O ₃)	1,82
Total	100,0	Total	100,0

Fuente: Varon CJ. Diseño, construcción y puesta a un punto de un prototipo de quemador para la combustión continua y eficiente de la cascarilla de arroz. El hombre y la maquina 2005,25.128-135

Tabla 2.4: Composición química de las cenizas de cascarilla de arroz

Composición (%)	Ceniza calcinada a:		
	350°C	400°C	900°C
Al ₂ O ₃	0.08	0.07	0.20
CaO	0.20	0.23	0.26
Fe ₂ O ₃	0.09	0.08	0.08
MgO	0.28	0.28	0.32
K ₂ O	3.09	3.08	2.80
Na ₂ O	0.29	0.29	0.39
SiO ₂	91.78	92.92	93.80
Carbón	5.69	4.72	0.39

Fuente: "Las cenizas de cáscarilla de arroz, adición puzolánica en cemento y concreto" – Perú

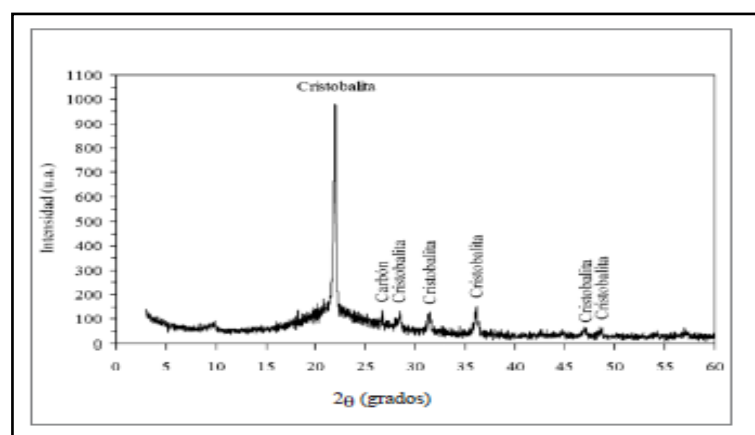
El poder calorífico de la cascarilla es de 3.281,6 Kcal/kg. Debido a la estructura cerrada, la combustión se dificulta, y, por el alto contenido de sílice (el 20 %), es de muy baja biodegradabilidad en condiciones del ambiente natural. La temperatura máxima que se obtiene al ser quemada varía de acuerdo con su condición: 970°C (seca), 650°C (con algún grado de humedad) y hasta los 1000°C (mezclada con combustible). La cascarilla de arroz al quemarse, genera 17.8 % de ceniza rica en Sílice (94.5 %), (Varón 2005, Valverde, 2007)¹⁴

Tabla 2.5. Propiedades de la Ceniza de Cascarilla de Arroz

Distribución Granulométrica	
Pasa Tamiz No. 4 (4760 µm)	99,6%
Pasa Tamiz No. 200 (74 µm)	11,8%
Pasa 2 µm	0,8%
Materia Orgánica	18,7%
Gravedad Específica	1,81

Fuente: <http://www.scielo.cl/pdf/ric/v23n1/art04.pdf>

Figura 2.6: Difractograma de rayos x de la ceniza de cascarilla de arroz



Fuente: <http://www.scielo.cl/pdf/ric/v23n1/art04.pdf>

¹⁴ http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0121-37092010000300013&script=sci_arttext

La tabla 2.4.2.3.2 y la figura muestran la mineralogía de la CCA por medio del difractograma de rayos-x. Se observan picos característicos de cristobalita (un tipo de sílice) y de carbón, que marcan que parte de la ceniza tiene estructura cristalina, lo que afecta su actividad puzolánica. Sólo la sílice amorfa es capaz de reaccionar químicamente con los iones calcio de la cal, formando los productos cementantes que estabilizan los suelos. La presencia de carbón es otra causa más de baja actividad puzolánica de la CCA, como ya se indicó anteriormente.

2.4.3 Cal

En su etimología, se refiere al óxido de calcio proveniente de la calcinación del carbonato de calcio, más en general, se emplea este término para designar no solo este óxido sino también sus derivados.

2.4.3.1 Tipos de cal

La palabra cal es un término general con el que se designan formas físicas y químicas de las diferentes variedades en que pueden presentarse los óxidos e hidróxidos de calcio y magnesio. A efectos de clasificación se distinguen los siguientes tipos de cal:

- Cales aéreas.

Cales que se componen principalmente de óxido e hidróxido de calcio y magnesio, los cuales endurecen lentamente al aire por la acción del CO₂ de la atmósfera. No presentan propiedades hidráulicas, es decir, no endurecen con el agua y se obtienen a partir de rocas calizas con contenidos en carbonatos superiores al 95%.

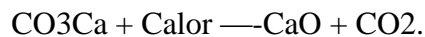
- Cales hidráulicas.

Endurecen en contacto con el agua, obtenidas a partir de calizas que contienen arcillas (Sílice y Alumina). Durante la calcinación y la posterior hidratación se forman silicatos y aluminatos cálcicos de propiedades hidráulicas.

2.4.3.2 Cales utilizadas para la estabilización de suelos.

Las cales utilizadas en la estabilización de suelos son cales aéreas. Estas presentan las siguientes formas:

- **Cales vivas.** Son cales aéreas que se componen principalmente de óxido de calcio y óxido de magnesio producidas por calcinación de la caliza.



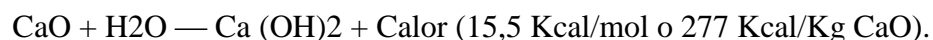
Se comercializan en grano (diferentes granulometrías) o molidas, incluso micronizadas. En contacto con el agua se hidratan siendo la reacción fuertemente exotérmica.

Cuando se utilizan calizas que también contienen en su composición carbonato de magnesio, una vez calcinadas se obtienen a la vez óxidos de calcio y de magnesio.

Si el porcentaje de óxido de magnesio es $> 5\%$, la cal se denomina “cal dolomítica o dolomía calcinada” (hay que tener en cuenta en la estabilización de suelos, que la hidratación de la cal dolomítica es más lenta que el de la cal viva con porcentaje de óxido de magnesio $< 5\%$).

- **Cales hidratadas.**

Son cales aéreas que se componen principalmente de hidróxido de calcio. Proviene de la hidratación controlada de cales vivas.



Este tipo de cal presenta menor reacción exotérmica que la cal viva al entrar en contacto con el agua.

- **Cal en forma de lechada.**

Es la suspensión de cal hidratada en agua, también puede obtenerse a partir de la cal viva que al mezclarla con agua dará cal hidratada, formándose a continuación con el

resto del agua la suspensión de lechada de cal.

La cal puede ser utilizada bajo forma de lechada en el tratamiento de los suelos cuando se quieran conseguir las siguientes ventajas:

- Supresión del polvo producido en el extendido de la cal,
- Humidificación de los suelos secos.

La lechada de cal puede ser preparada en la fábrica o in situ, en depósitos o cubos equipados de un sistema de agitación, a partir de cal viva o de cal hidratada. Una vez preparada la misma, ésta se aplica directamente sobre el suelo.¹⁵

2.4.3.3 Especificaciones técnicas de la cal

La American Society for Testing and Materials (ASTM), en el año 1995 realizó la última revisión de la norma con designación C-997: “Especificación estándar para cal viva y cal hidratada para la estabilización de suelos”. Esta norma abarca la cal viva y la cal hidratada para la estabilización de suelos, y en el fondo indica las características químicas y físicas que se requieren en ella para trabajos de estabilización de suelos.

En su composición química la cal hidratada debe consistir esencialmente de hidróxido de calcio o de una mezcla de hidróxido de calcio, óxido de magnesio o hidróxido de magnesio, que son los ingredientes activos de la cal. Pero para formar la cal estabilizante, no es preciso tener una pureza total, sino que pueden tolerarse algunas impurezas. La norma ASTM (American Society for Testing and Materials) indica los requisitos mínimos en cuanto a la composición química que se exigen en la cal estabilizante, de acuerdo a los siguientes parámetros:

a) Óxidos Totales.- Este ensayo determina la concentración de cal y su aplicación sirve tanto para la cal con alto contenido de calcio como para la cal hidratada dolomítica. Para estos tipos de cal, la especificación ASTM C977 indica que se

¹⁵ Heber Manrique Huezo Maldonado “ Guía para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en el Salvador” ;San Salvador, Febrero de 2009

requiere un mínimo de 90 % del total de contenido óxido (Ca O + Mg O) en una base libre.

b) Dióxido de Carbono.- Si se ejecuta el anterior ensayo y el muestreo se realiza en la misma planta, el hidrato no debe tener más de 5 % de dióxido de carbono; pero si el muestreo se realiza in situ no debe exceder más de un 7 %.

c) Humedad Libre: La cal hidratada no debe contener más del 2 % de humedad libre, si el muestreo se hace en planta

En sus características físicas, es necesario obtener una cal cuya granulometría sea lo suficientemente fina, para ello la cal hidratada y la cal viva debe obedecer los siguientes requerimientos en cuanto al tamaño de sus partículas.

a) Cal hidratada.- La cal hidratada deberá tener como máximo un 3 % de material retenido en el tamiz # 30 (590 μm), y no más del 25 % de material retenido en el tamiz # 200 (74 μm).

b) Cal viva.- La cal viva debe pasar el 100 % por el tamiz de 1" (25.4 mm.). Asimismo la cal viva empleada en la estabilización de suelos deberá elevar una temperatura mínima de 30 °C en 20 minutos.

c) Residuos de cal viva.- La cal viva para la estabilización de suelos no deberá tener más de un 10 % en peso de residuos.

Aparte de las anteriores especificaciones, existen también normas europeas como las UNE que indican también los requerimientos mínimos en cuanto a las características químicas y físicas que se exigen en la cal para la estabilización de suelos.

Además se deberán tomar en cuenta aspectos como:

a) Finura del molido.- Es una característica importante en la medida que interviene en las condiciones de almacenamiento, transporte y mezcla con el suelo. El apagado o hidratación de la cal viva con agua da lugar, a una auto pulverización

muy fina, incluso micronizada, del producto. Por otra parte, la finura puede intervenir en la reactividad de la cal.

La finura de la cal se evalúa mediante un análisis granulométrico. Más del 98% de las partículas deben ser inferiores a 0,2 mm.

b) Reactividad de la cal.- esta característica es muy importante debido a un doble motivo. Por un lado, refleja la calidad de la cal en cuanto a su capacidad de reacción, indicando que las reacciones buscadas se producirán en forma rápida. Y por otro lado cuando se emplee para el secado de suelos húmedos, permite estimar su eficacia para este tratamiento.

El ensayo se realiza sobre la cal viva, y permite medir la rapidez de reacción de este con el agua. Se evalúa midiendo el tiempo en que se tarda alcanzar una temperatura de 60°C al agitar una muestra de cal viva en agua.

Dicho tiempo deberá ser menor a 15 minutos, siendo más reactiva la cal cuanto menor sea el tiempo.¹⁶

2.5 El agua

El agua es un componente importante en la elaboración de las mezclas suelo-cal. Pues la misma sirve para dos propósitos: (1) para lubricar las partículas de suelo y ayudar a obtener la máxima compactación o densidad del material; (2) para la hidratación de la cal, de tal forma que permita la reacción puzolánica la cual proporciona la resistencia en la mezcla. Una mezcla suelo-cal bien dosificada debe contener suficiente agua para ambos propósitos.

Es importante que el agua a utilizar en la estabilización de suelos sea relativamente limpia y libre de cantidades perjudiciales de álcalis, o de materia orgánica. El agua potable es satisfactoria para los propósitos que persigue una estabilización con cal. Es por eso que se emplea en este trabajo.

¹⁶ 15. Ing. Marcelo Segovia Cortez; Apuntes y copias de la materia de Carreteras III CIV 651 - Unidad 1: Estabilizaciones.

En una estabilización con cal debe evitarse el uso de agua ácida para prevenir la disminución del pH de la mezcla, ya que la acidez del agua es perjudicial a la reacción puzolánica.

La cantidad de agua a emplearse en una estabilización con cal está regida por los procedimientos de compactación, pero si se usa cal viva puede ser necesario agregar cantidades adicionales de agua en suelos con menos del 50 % de humedad natural.

2.6 Suelos arcillosos

2.6.1 Definición

Se puede entender a los materiales arcillosos como aquéllos que poseen una parte relevante de suelos cohesivos y que como tales condicionan su comportamiento., frente a los restantes materiales existentes en las obras o en el terreno.

2.6.2 Arcillas

La arcilla es un tipo de roca natural sedimentaria que engloba a los minerales filosilicatos, cuyas propiedades dependen de su estructura y tamaño de grano. Está constituida por agregados de silicatos de aluminio hidratado, procedentes de la descomposición de minerales de aluminio.

Surge de la descomposición de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de años. Físicamente se considera un coloide de partículas extremadamente pequeñas y superficie lisa.

2.6.3 Características de las arcillas

- Material de estructura laminar
- Sumamente higroscópico
- Su masa se expande con el agua
- Con la humedad se reblandece y se vuelve plástica
- Adquiere gran dureza al ser sometida a temperaturas mayores a 600°C.

2.6.4 Clasificación de las arcillas

Desde el punto de vista geológico: Se pueden distinguir entre primarias las cuales son de tipo hipogénico y que permanecieron en el mismo lugar de su formación, y las secundarias que fueron acarreadas a lugares diferentes al de su origen.

- Fluviales: Depositadas por ríos y siendo depósitos de baja calidad
- Lacustres: Asentados en lagos y estando en capas uniformes de buena calidad
- En deltas: Son arenosas y de composición irregular
- Glaciales: Formadas por la acción de grandes masas de hielo sobre rocas cristalinas

2.6.5 Clasificación de los minerales arcillosos

Mineral de arcilla caolinita: Se encuentra entremezclada en las arcillas sedimentarias. Es el constituyente más abundante de los depósitos residuales de arcilla. Son estables, inexpansibles y de mediana plasticidad.

Mineral de Arcilla Ilita: Es el grupo más abundante en los depósitos arcillosos marinos modernos y en los sedimentarios antiguos. Son medianamente estables, medianamente inexpansibles y de mediana plasticidad.

Mineral de Arcilla Montmorilonita: Son especialmente abundantes en arcillas derivadas de cenizas volcánicas intemperizadas. Son muy inestables, medianamente inexpansibles y de alta plasticidad.¹⁷

Clasificación de las arcillas en base a su estabilidad

- Arcillas Caolinitas:

Formadas por una lámina de silicio y una de aluminio. La unión de estas arcillas no permite la penetración de moléculas de agua entre ellas (se les considera estables).

¹⁷ Juárez Badillo-Rico Rodríguez .Mecánica de Suelos Tomo “ Fundamentos de la mecánica de suelos “ Editorial: Limusa_Mexico. Pag.43

- Arcillas Ilicas:

Formadas por una lámina de aluminio entre dos de silicio. Son menos expansivas que las montmorilonitas y su comportamiento es más favorable para el ingeniero civil.

- Arcillas Montomorilonitas:

Formadas por una lámina de aluminio entre dos de silicio. Su unión es débil por lo que las moléculas de agua pueden introducirse en la estructura con facilidad, por lo que son inestables en presencia de agua y pueden producir problemas en las construcciones que se cimienten en este tipo de arcillas.

2.6.6 Arcillas en la ingeniería civil:

En general el estudio de suelos en la ingeniería civil incluye mineralogía y comportamiento bajo condiciones diversas.

La determinación mineralógica es importante porque permite predecir su comportamiento y la forma de controlarlo. La mineralogía permite estimar características de un suelo pero no calcular los valores absolutos representativos de su comportamiento actual. De aquí que se hagan una serie de pruebas características entre las cuales se encuentran:

Tamaño del grano: El orden del tamaño arcilloso varía desde 0.005mm hasta dimensiones coloidales, teniendo muchas partículas arcillosas un diámetro inferior a 0.0002mm.

En el cuadro que se adjunta se destaca la división adoptada para los distintos sistemas de clasificación que actualmente utilizamos los ingenieros en nuestros proyectos.

Tabla 2.6. Definición del tamaño de partículas

Nombre de la Organización	Tamaño de los granos (mm)			
	Grava	arena	limo	arcilla
Massachusetts Institute of Tec.	> 2	2 a 0,06	0,06 a 0,002	<0,002
U.S. Dep. of Agriculture	> 2	2 a 0,05	0,05 a 0,002	<0,002
AASHTO	76,2 a 2	2 a 0,075	0,075 a 0,002	<0,002
Sistema Unificado de Clasif. US Army Corp. Of Engineering US Bureau of Reclamation ASTM	76,2 a 4,75	4,75 a 0,075	<0,075	

Nota: El tamaño correspondiente a 76,2 mm corresponde al tamiz US de 3".

El tamaño correspondiente a 4,75 mm corresponde al tamiz US N° 4.

El tamaño correspondiente a 2 mm corresponde al tamiz US N° 10.

El tamaño correspondiente a 0,075 mm corresponde al tamiz US N° 200.

Fuente: <http://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2010/10/distribucion-del-tamano-de-particulas.html>

Plasticidad: Esta propiedad se debe a que el agua actúa como una envoltura en las partículas laminares de la arcilla, produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento sobre otras partículas. Esto se debe a la morfología laminar y la capacidad de hinchamiento de la arcilla.

Es la más importante en el estudio del suelo. Se determina en función del límite de plástico (humedad mínima), límite líquido (humedad como porcentaje de suelo que fluye) y el índice de plasticidad o diferencia entre los límites líquido y plástico.

El Índice de Plasticidad (IP): Es una medida de cuánta agua puede absorber un suelo antes de disolverse en una solución. Mientras más alto es este número, el material es más plástico y más débil. Generalmente la cal reacciona con suelos plástico que tengan un IP entre 10 a 50, reduciendo así significativamente el IP, creando de esta manera un nuevo material con resistencia estructural. Suelos con IP menores a 10, usualmente, no reaccionan tan fácilmente con la cal.

Resistencia mecánica.

En los suelos la humedad es muy importante porque determinan la capacidad de estos para resistir las cargas y mantener su estructura en condiciones estables de trabajo hasta ciertas humedades, los suelos pueden mantener resistencias aceptables pero cuando hay excesos de agua se debilitan y pierden la resistencia, que se manifiestan en hundimientos, grietas, cuarteamientos, hinchamientos, etc.

En la época húmeda (invierno) los suelos se vuelven débiles, ya que el agua que absorben los hace perder resistencia hasta llegar a la saturación. En la época seca (verano) pierden humedad y se vuelven muy duros o muy resistentes pero en la superficie donde los vehículos circulan, la acción abrasiva de las llantas hace que se genere la soltura de las partículas de suelo abundantemente para producir capas de polvo, con lo cual el deterioro superficial llega a ser severo

Resistencia a compresión inconfiada: Se pueden distinguir entre suelos:

Muy blandos.- resistencia menor de 0.25kg/cm²

Blandos.- resistencia entre 0.25 y 0.50 kg/cm²

Medios.- resistencia entre 0.50 y 1kg/cm²

Rígidos.- resistencia entre 1 y 2 kg/cm²

Muy rígidos.- resistencia entre 2 y 4 kg/cm²

2.6.7 Incidencia de arcillas en obras viales

La incidencia de las arcillas, radica en que constituyen en alto porcentaje los suelos naturales (subrasantes), con mayor énfasis en los que geológicamente aún se encuentran en formación.

Todas las estructuras viales que el hombre ha diseñado, desde siempre, incluyendo las actuales, se basan en dos premisas: la 1º de ellas considera las cargas que deberá

soportar la vía, durante el tiempo de vida útil que requerimos. Es un dato estadístico muy difícil de modificar.

La 2° premisa es la capacidad portante del suelo natural sobre el que debemos soportar nuestra vía. En la medida en que mayor sea la capacidad portante de este estrato menor será el espesor de la estructura requerida, para una carga o esfuerzo determinados, lo que redundará en economía, en todos los aspectos y menor deterioro ambiental.

Cuando la capacidad portante del suelo natural no es la adecuada o es muy baja, se busca mejorar la calidad del suelo ya sea adicionando materiales que le ayuden a mejorar las características de mencionado estrato o sustituyéndolo por otro, de ahí nace la idea de estabilizarlo.

Son suelos inadecuados para su empleo en subrasantes los suelos orgánicos o con materia orgánica (hojas, hierba, raíces, desechos orgánicos y otros materiales putrescibles), por ello no se empleará la capa de tierra vegetal, ni materiales procedentes turberas, etc., tampoco es conveniente emplear escombros y vaciados heterogéneos, que pueden dar lugar a asentamientos diferenciales en servicio.

En cambio es conveniente estudiar la posibilidad de empleo de subproductos y desechos industriales locales, que en algunas zonas presentan problemas ecológicos y de acopio; cenizas volantes, desechos de cantera, ciertos materiales minerales subproductos de industrias químicas, materiales puzolánicos, etc.

2.7 Estabilización de suelos con sustancia cementante (CCA + CAL)

Los suelos para realizar las mezclas de estabilización tienen mejor comportamiento cuando son reactivos, es decir, aquellos que al mezclarse con algún producto estabilizante producen cambios en mayor proporción en sus características físico-mecánicas que aquellos suelos que son menos reactivos.

En la mayoría de los casos los materiales de mejor características de calidad generalmente se encuentran lejos de los caminos vecinales de salida de la producción de arroz, resultando su uso una alternativa que elevan los costos de construcción por el elevado costo de transporte. La evaluación de la estabilización de suelos arcillosos con adición de CCA y cal es una alternativa que se debe tomar muy en cuenta para utilizar los suelos naturales existentes en el lugar.

2.7.1 Mezclas de Cal-Puzolanas para Suelos con cantidades bajas de arcilla

La cal por sí misma puede reaccionar con suelos que contienen tan poca arcilla como 7% e Índices de Plasticidad tan bajos como 10. Si el suelo no es suficientemente reactivo, la cal puede ser combinada con una fuente adicional de sílice y alúmina. Tales puzolanas incluyen la ceniza de cascarilla de arroz CCA. La sílice y alúmina adicional de las puzolanas reaccionan con la cal para formar la fuerte matriz cementante que caracteriza a una capa estabilizada con cal. Las mezclas correctamente proporcionadas de cal y puzolanas pueden modificar o estabilizar casi cualquier suelo, pero comúnmente se usan para suelos con plasticidad de baja a media.

2.7.2 pH del medio

En el estudio de las propiedades de las arcillas y su reacción de la cal se ha citado que aquéllas necesitan un medio básico, con pH alto, para asegurar el intercambio iónico y promover la reacción puzolánica que justifica en última instancia todos los fenómenos del tratamiento de suelos con cal.

En este tipo de tratamientos, este medio básico lo proporciona la cal, que es capaz de elevar los valores del pH en la mezcla hasta entornos del 12,45. Por tanto, esta elevación del pH no sólo es un indicador del proceso sino que también es un factor condicionante de su progreso. Es preciso, si se quiere asegurar el mantenimiento de las reacciones y su estabilización, asegurar el del pH del medio. Hay pues que evitar

que posibles disoluciones o alteraciones por agentes externos lo reduzcan y provoquen la paralización de los fenómenos perseguidos.

Hay que citar que el valor del pH, por estas características citadas, suele ser usado en ocasiones como indicador indirecto de la idoneidad de la mezcla y de la efectividad del tratamiento, bien realizado en laboratorio bien in situ. Así un valor alto del pH asegura que resta cal libre y que, por tanto, se deben haber producido las reacciones perseguidas.¹⁸

2.7.3 Características de la resistencia mecánica

A pesar que depende de varios parámetros, la resistencia de la mezcla suelo-cal puede ser analizada considerándose las condiciones de curado del suelo estabilizado. La adición de CAL+CCA a un suelo fino es responsable por acciones de intercambio catiónico, floculación y cementación a través de las reacciones puzolánicas. Las dos primeras son responsables por pequeños incrementos inmediatos de resistencia, y la tercera, por el desarrollo de la resistencia a largo plazo.

Por consiguiente, se puede usar el curado en el análisis de la resistencia del suelo estabilizado en resistencia de mezcla no curada.

2.7.4 Resistencia de mezcla no-curada

La determinación de la mejoría de las características de resistencia mecánica sobre condiciones de mezclas no curadas interesa en las situaciones en que los efectos inmediatos de adición de cal son necesarios como un expediente constructivo, esto es en los casos de suelos muy plásticos que por su reducida capacidad de soporte, cuando están húmedos, dificultan los trabajos de ingeniería. En general, se evalúa la resistencia de las mezclas de S+CAL+CCA por medio de los ensayos de compresión no confinada y CBR, que posteriormente se verá en el proceso de ensayos de laboratorio.

¹⁸ Marta Liliana Jiménez González, "Evaluación de las propiedades mecánicas de suelos de grano fino estabilizados con cal", Guatemala, Abril de 2010

2.7.5 Variaciones volumétricas

La adición de cal a las arcillas expansivas ocasiona, en general, caídas sensibles en sus variaciones volumétricas por el secado. Se verifica un aumento en el límite de retracción, lo que demuestra la capacidad de absorción del agua de la mezcla suelo cal sin expansión posterior superior al suelo.

2.7.6 Plasticidad.-

El grado en que la plasticidad es afectada depende de varios factores, de entre los cuales se destacan: el tipo de suelo, el tipo y la cantidad de cal usada y el tiempo y las condiciones de curado de la mezcla.

Son comunes las modificaciones en los límites de plasticidad (LP) y los límites líquidos (LL) de los suelos, apareciendo frecuentemente, reducciones en los índices de plasticidad (IP). Se sabe según anteriores trabajos de investigaciones que la adición de cal a los suelos produce aumentos en el límite plástico (LP) y reducciones en el Límite Líquido (LL). Más a pesar de que el decrecimiento en el Límite Líquido (LL) sea usual, el mismo no ocurre para todos los suelos. En general, el LL aumenta en los suelos menos plásticos y disminuye en los más plásticos, habiéndose verificado reducciones en el IP de arcillas altamente plásticas por la adición de pequeños porcentajes de cal.

En las primeras horas después de la adición de la cal, se nota una reducción sensible del índice plástico. Usualmente el efecto de la cal viva en la reducción de la plasticidades más rápido que el de la cal hidratada, y se ha descubierto que el primer proceso de adición de la cal es el más eficiente, en nuestro caso la reacción se produce como en el caso de la cal hidratada.

2.7.7 Mezcla

De modo general, buenas mezclas minimizan las posibilidades de mezclas extensivas, resultantes de una mala distribución vertical y lateral del estabilizante en el suelo, o localizadas.

En lo que se refiere a la mezcla, algunos autores recomiendan para mezclas S+CAL la secuencia que se adopta como válida para la mezcla S+CAL+CCA que es la siguiente:

- a) Que se especifique, en general, el porcentaje de cal como un porcentaje de masa en seco del suelo.
- b) Que el material suelo-cal sea preparado por la mezcla en seco de los componentes, con la posterior adición de agua a la mezcla.
- c) Que se trabaje con la humedad óptima, admitiéndose pequeños desvíos, determinados por medio de los ensayos AASHTO T-180.
- d) Que se deje la mezcla en reposo por una hora, antes de proceder a la ejecución de los Límites de Atterberg o la preparación de los cuerpos de prueba para ensayos de resistencia mecánica.¹⁹

¹⁹ Juan Diego Bauzá Castelló Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, "ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CAL" Madrid, 30 de Enero de 2003

3.1 Ubicación de la zona de estudio

Partiendo desde su macro-entorno el área de estudio para el respectivo muestreo se divide en 2 unidades localizadas dentro del departamento de Tarija (Bolivia) en la zona sur (área urbana) de la Provincia Cercado, ciudad Capital departamental.

La primera unidad se encuentra en el barrio Miraflores sobre la Av. Cuarto Centenario y la calle 8. El terreno está compuesta por material fino con contenido de arcillas de color amarillo blanquecino, seca de textura muy fina.

La segunda unidad está ubicada en la Av. Principal del campus universitario de la universidad Autónoma Juan Misael Saracho en la zona de El Tejar, está compuesto por material fino de arcillas orgánicas, en estado húmedo, con presencia de algunas piedras diminutas. A continuación en la figura 3.1 y 3.2 se visualizan las dos áreas de estudio.

Figura 3.1: Mapa de área de extracción de muestras N° 1: Barrio Miraflores



Fuente: Programa Google Earth

Figura 3.2: Mapa de área de extracción de muestras N° 2: Av. Principal del campus universitario



Fuente: Programa Google Earth

3.2 Muestreo de materiales

Para la selección de la muestra de los suelos, se tuvo en cuenta que fuera del tipo fino arcilloso y presentara comportamiento plástico y expansivo.

Con este objeto fue necesaria una previsualización de los terrenos y sus aptitudes geotécnicas para la futura estabilidad de las mismas. La muestra se la extrajo cumpliendo las especificaciones y siguiendo los pasos indicados en las guías de laboratorio para la extracción de muestra (ASTM D4220) del manual de carreteras V4C.

3.2.1 Muestreo zona de estudio: Barrio Miraflores

Para este muestreo se procedió a la toma directa del material debido a que la zona se encontraba excavado por maquinaria pesada y por tanto libre de materia orgánica, las muestras tomadas se las colocaron en bolsas de nylon para la caracterización del misma y especialmente para evitar la pérdida de humedad natural del suelo y saquillos para los ensayos de estabilización debido a que se trabajara con muestras

secas. En las siguientes figuras se observa la zona de extracción de las muestras de campo.

Figura 3.3: Zona de procedencia del material extraído: Muestra (arcilla amarilla)



Fuente: Elaboración Propia

3.2.2 Muestreo zona de estudio: Av. Principal del Campus Universitario de la U.A.J.M.S.

El muestreo consistió en la excavación realizada por la retroexcavadora para poder llegar a la capa subrasante, la profundidad del muestreo se realizó aproximadamente a 1.0 m de la capa de rodadura por consiguiente se extrajo material en bolsas nylon y saquillos para sus respectivos ensayos.

Figura 3.4: Zona de procedencia del material extraído: Muestra (arcilla orgánica)



Fuente: Elaboración Propia

3.2.3 Selección de la cascarilla de arroz, proceso de incineración y obtención de ceniza (CCA).

La cascarilla de arroz acopiada para este trabajo de investigación, es de grano largo, traído del ingenio arrocero de Montero -Santa Cruz, el proceso de incineración para la quema de la cascarilla al no contar con los medios o con hornos para controlar la temperatura se la realizo mediante un método rustico en la cual se utilizó un turril de acero elevando su temperatura de abajo hacia arriba a base de quema de leña y carbón.

El proceso consistió primeramente en secar el material eliminando su humedad superficial y de esta manera reducir el tiempo y facilitar la incineración. Posteriormente; se colocó el material dentro del turril asegurándose que este seco y limpio para evitar de esta forma que entre en contacto con algún agente externo y se mezcle, alterando así su composición. El tiempo de incineración aproximadamente fue de 4 hs. Después de obtener lo q es su ceniza se la dejó enfriar para su respectiva molienda y almacenaje en bolsas plásticas cerradas en un ambiente seco y fresco.

A continuación se puede apreciar en la figura 3.5 el proceso antes explicado.

Figura 3.5: Proceso de obtención de ceniza de cascarilla de arroz



Fuente: Elaboración Propia

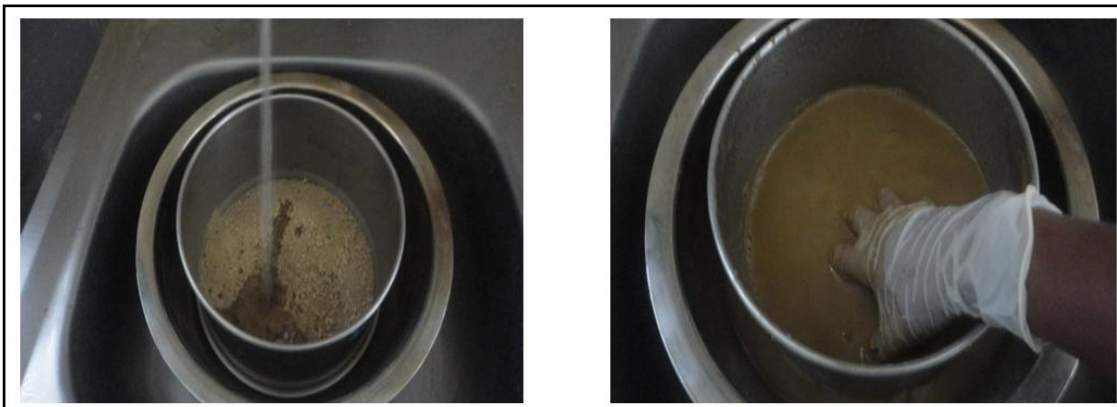
3.3 Caracterización de los materiales a estabilizar.-

Para conocer las propiedades de los suelos utilizados en el proyecto, se tomaron muestras en todo el desarrollo del mismo, posteriormente en el Laboratorio de suelos y Hormigón se determinaron sus propiedades y clasificación de las mismas según la norma AASHTO (ver Anexo 5.1 Clasificación de suelos según AASHTO).

3.3.1 Análisis granulométrico (ASTM D 422 AASHTO T88)

La prueba de granulometría sirve para determinar el porcentaje en peso de las partículas de diferentes tamaños, teniendo una visión de la distribución del tamaño de los granos presentes en un suelo. El ensayo de análisis granulométrico por tamizado se realizó mediante el método del lavado en el cual se pesa 500 gr como peso total, se procede a realizar el lavado por la malla número 200 de acuerdo a la norma AASHTO-T88 (Ver Figura 3.6. Después que el suelo está seco se pesa y se procede al tamizado por la malla N° 40 y 200, desde arriba hacia abajo. El primer tamiz, es el de mayor tamaño y es donde inicia el tamizado. Se tapa con el fin de evitar pérdidas de finos; el ultimo tamiz está abajo y descansa sobre un recipiente (base) de forma igual a uno de los tamices, y recibe el material más fino no retenido por ningún tamiz. Luego proceder a realizar el pesaje del material retenido en cada malla. (Ver Figura 3.7).

Figura 3.6.- Lavando el suelo por la malla N°200



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.7.- Tamizando y pesando lo que quedo retenido en cada malla



Fuente: Elaboración Propia

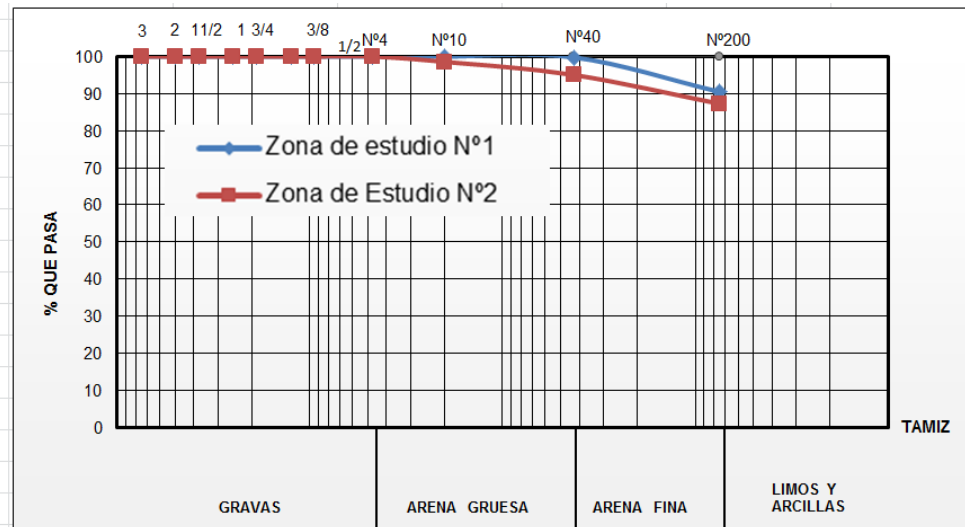
Tabla 3.1 Resultados de granulometría de los suelos naturales

Zona de Estudio	Nº1	Nº2
Tamices	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total
3"	100,00	100,00
2"	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00
1"	100,00	100,00
3/4"	100,00	100,00
1/2"	100,00	100,00
3/8"	100,00	100,00
Nº4	100,00	100,0
Nº10	100,00	98,58
Nº40	99,76	95,02
Nº200	90,48	87,28

Fuente: Elaboración Propia

La granulometría de la zona 1 correspondiente al Barrio Miraflores es más fina que el material de la zona de estudio Nº2 pero de todas formas cumple con las características propias de las arcillas, con una fracción fina de 87%.

Gráfica 3.1. Granulometrías de los suelos a estabilizar



Fuente: Elaboración Propia

3.3.2 Límites de Atterberg (ASTM D4318 AASHTO T90-T89)

Los límites de plasticidad se realizaron conforme a la norma y este corresponde a la humedad, o sea el porcentaje de agua respecto al peso de los sólidos en que los finos de los materiales pasan de una consistencia a otra.

- ❖ **Limite Liquido:** Se determina mediante el método de la cuchara de casa grande (NLT-105). El ensayo se basa en la determinación de la cantidad de agua mínima que se puede contener en una pasta formada de maso menos 100 gr de suelo seco que haya pasado el tamiz N°40. Para ello, se coloca sobre el mencionado artefacto y se acciona el mecanismo de este, contándose el número de golpes necesario para cerrar un surco (realizado previamente con un ranurador normalizado) en una longitud alrededor de 12mm. El ensayo se dará por válido cuando se obtengan determinaciones entre 15-25; 25-30; 30-35; 35-40 golpes. La humedad correspondiente al límite líquido será la correspondiente a 25 golpes, y se determinará interpolando en una gráfica normalizada las cuatro determinaciones obtenidas experimentalmente.

- ❖ **Limite Plástico (NLT-106):** Se determina en base de la menor humedad de un suelo que permite realizar con el cilindros de 3 mm de diámetro que presenten fisuras sin que se desmoronen, realizándose 4 determinaciones y hallando la media .Este ensayo se realiza con aproximadamente 200 gr. De muestra seca y filtrada a través tamiz N°40 ,como en el caso anterior

A la diferencia entre ambos limites se denomina “índice de plasticidad” (IP), y da una idea del grado de plasticidad que presenta el suelo; un suelo muy plástico tendrá un alto índice de plasticidad.

En las Figuras se puede observar parte del desarrollo del ensayo del límite líquido y plástico.

Figura 3.8: Realización del ensayo de límites de Atterberg



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.2 Resultados correspondientes a la plasticidad de las muestras sin estabilizar

Zona de estudio	Nº1	Nº2
Limite Liquido (L.L.) % =	50,00	48,00
Limite Plástico (L.P.)%=	31,00	30,00
Índice de Plasticidad (I.P.)%=	20,00	18,00

Fuente: Elaboración Propia

3.3.3 Contenido de Humedad y Clasificación

El ensayo de contenido de humedad natural (ASTM D2216) se realizó de acuerdo a lo especificado en el Vol.4C del manual de carreteras.

Tabla 3.3 Resultados correspondientes al contenido de humedad natural

Zona de estudio	Nº1	Nº2
W % =	6,62	7,18

Fuente: Elaboración Propia

Cuadro 3.1 Clasificación de los suelos según AASHTO y SUCS

CLASIFICACIÓN DEL SUELO		DESCRIPCIÓN
Nº1:	CL	Arcilla inorgánica de alta plasticidad.
	A-7-6(14)	
Nº2:	-	Arcilla orgánica de alta plasticidad.
	A-7 -6(13)	

Fuente: Elaboración Propia

3.3.4 Compactación (AASHTO T-180/ ASTM D1557).-

El ensayo de proctor se realizó por el método de la norma (AASHTO T-180/ ASTM D1557) modificado y permite conocer el grado de humedad de un suelo para alcanzar una densidad máxima aplicando una energía de compactación determinada, para este caso se utilizó por el tipo de material el método C.

El agua, al actuar como lubricante de las partículas de un suelo facilita la compactación de un suelo seco y encontrar la humedad óptima para alcanzar una densidad máxima seca con una misma energía de compactación. La prueba es importante para controlar la calidad de los procesos de compactación que se le dan a las capas de bases y sub-bases varían entre el 95% y el 100%.

El procedimiento de ensayo consiste en apisonar en 5 capas consecutivas una cantidad aproximadamente de 6 kg de suelo previamente tamizada por el tamiz N°4 y dividida por cuarteo en 5 partes aproximadamente iguales. La muestra se humecta y se introduce en un molde metálico de dimensiones normalizadas (2124 cm³).

Para llevar a cabo el apisonado se emplea un pistón también normalizado, de forma que su peso y altura de caída no varíen, lo que asegura una energía de compactación constante. La normativa estipula una cantidad de 56 golpes con el pistón por cada capa de suelo. Se realizan alrededor de 4 a 5 determinaciones con diferente grado de humedad construyendo la curva “humedad-densidad seca”.

En las siguientes Figuras se muestra la realización del ensayo compactación para el proyecto en estudio.

Figura 3.9: Proceso del ensayo de compactación



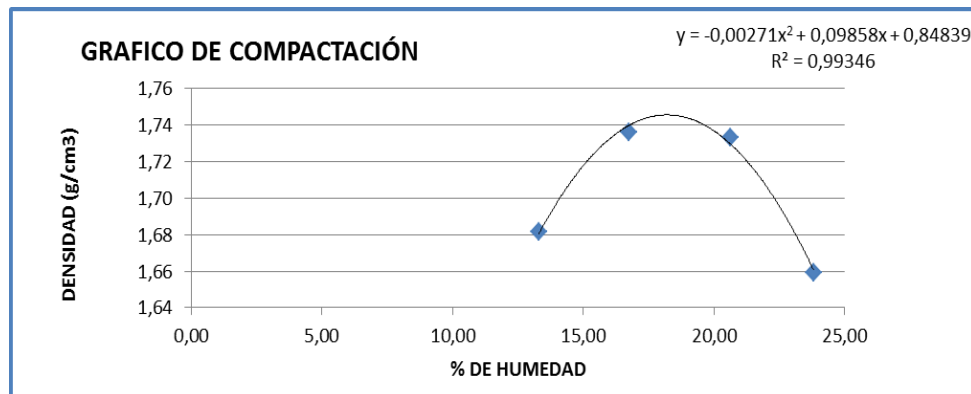
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.4 Resultados del ensayo de compactación sin estabilizar

Zona de estudio	N°1: Barrio Miraflores	N° 2:Tramo Av.Principal Campus Universitario
Densidad máxima (gr/cm ³)	1,74	1,77
Humedad Óptima (%)	18,19	17,86

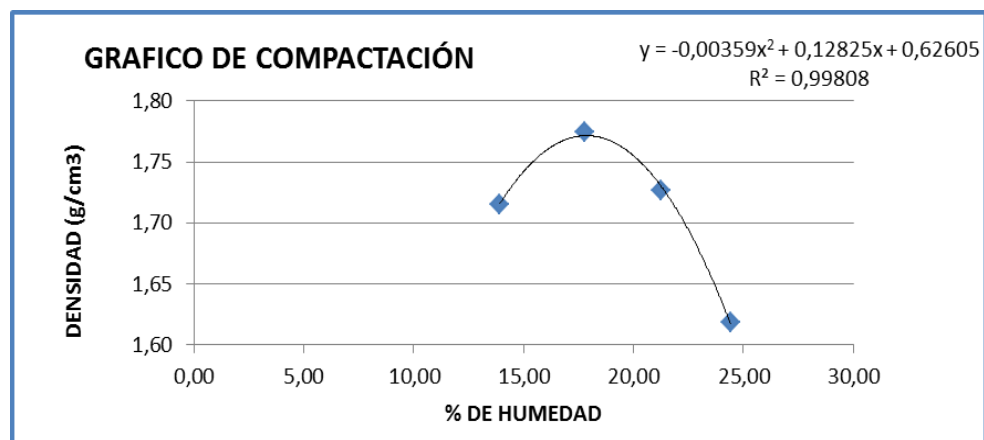
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.2. Curva de compactación de la zona N°1



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.3. Curva de compactación de la zona N°2



Fuente: Elaboración Propia

3.3.5 Relación de Soporte de California CBR (ASTM D 1883_ AASHTO T-193).-

El ensayo C.B.R, se realizó de acuerdo a la norma AASHTO T-193, para obtener la resistencia del suelo, y así evaluar la capacidad de soporte del suelo en la capa de subrasante, base y sub-base de pavimentos.

Para la obtención de los diferentes CBR se efectuaron tres moldes con distinta energía de compactación; la primera con 12 golpes, la segunda con 25 golpes y la tercera, con 56 golpes por cada ensayo de CBR.

Las muestras elaboradas bajo estos procedimientos, se sometieron a un proceso de inmersión en agua para simular las condiciones de saturación a las cuales podrían estar sometidos los suelos como es la subrasante de una carretera, y en esta forma, obtener los C.B.R de los suelos bajo las condiciones más críticas ; esto durante un período mínimo de 96 horas donde se colocan pesas sobre las mismas, con el objeto de simular las cargas tanto vehiculares , como de la estructura de pavimento y por otro lado determinar su expansión efectuando 4 lecturas empleando un extensómetro debidamente calibrado.

El ensayo de penetración se basa en la aplicación de una presión a una velocidad normalizada creciente efectuada mediante la prensa a la que va acopiada un pistón de sección anular sobre la muestra de suelo compactado con la humedad óptima.

Luego de realizar el ensayo de penetración se procede a sacar humedades de cada molde del fondo, superficie y 2” de superficie para determinar sus densidades.

A continuación se gráfica el proceso del ensayo de CBR.

Figura 3.10: Proceso de inmersión y penetración del ensayo de CBR



Fuente: Elaboración Propia

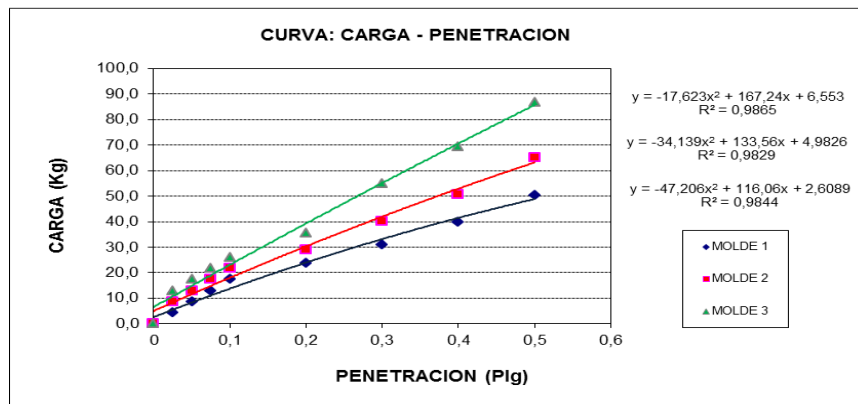
Tabla 3.5 Resultados del ensayo de CBR sin estabilizar

Zona de estudio	Nº1: Barrio Miraflores	Nº 2:Tramo Av.Principal Campus Universitario
CBR 95 % de Dmax	1,6	3
Expansión (%)	4,2	4,52

Fuente: Elaboración Propia

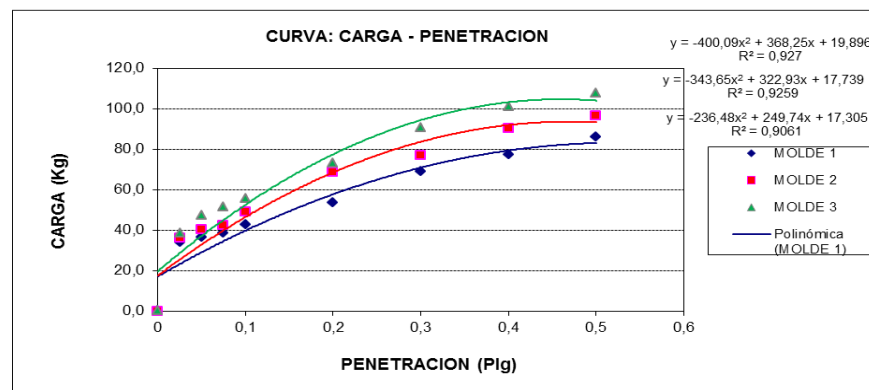
En los resultados se puede observar que los C.B.R son de 1 a 3% lo cual indica que los materiales poseen una baja capacidad de soporte y que son altamente plásticos.

Gráfica 3.4. Curva de Carga Vs Penetración de la zona Nº1



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.5. Curva de Carga Vs Penetración de la zona Nº2



Fuente: Elaboración Propia

3.3.6 Compresión Incofinada en muestras de suelos (ASTM D2126 AASHTO T208).-

El ensayo de compresión incofinada se realizó para probetas compactadas con una humedad y densidad seca prefijados en el ensayo de compactación.

Se hizo uso de un extractor de muestras para no dañar la probeta compactada. Luego se procedió a la medición de la altura y diámetro, posteriormente se registró su peso.

A continuación se llevó la probeta a la prensa para su rotura por compresión controlando en este caso la deformación y registrando la carga total en el momento de la rotura.

Figura 3.11: Realización del ensayo de compresión Incofinada



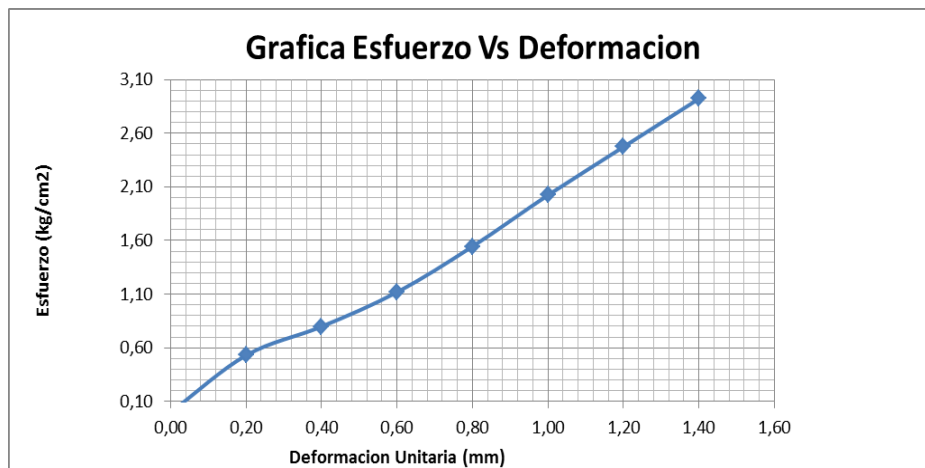
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.6 Resultados de esfuerzo ultimo de compresión inconfinado sin estabilizar

Zona de estudio	N°1: Barrio Miraflores	N° 2:Tramo Av.Principal Campus Universitario
Qu (kg/cm ²)	2,92	2,12

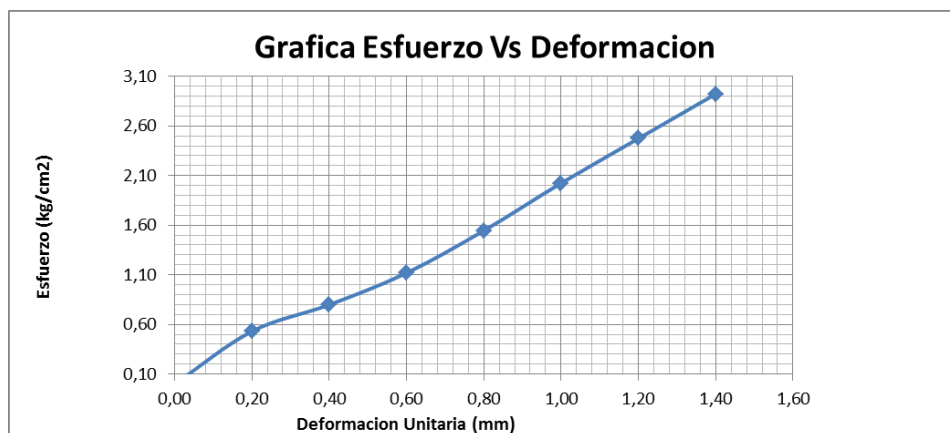
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.6. Esfuerzo Vs Deformación Zona N°1



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.7. Esfuerzo Vs Deformación Zona N°2



Fuente: Elaboración Propia

3.3.7 Determinación del pH de los suelos (ASTM G51).-

Este ensayo se realizó con muestras que pasan el tamiz N°40. El procedimiento para la determinación del pH (potencial de hidrogeno) se realizó pesando 5 gr de muestra en una balanza de 0,0001 gr de precisión, posteriormente se mezcló con 50 ml de agua destilada en una vaso de precipitado durante 10 min con una varilla de vidrio y luego se dejó sedimentar la muestra para después filtrarla en un erlenmeyer con ayuda de un embudo y papel filtro hasta obtener una solución de aproximadamente 20 ml .Ya calibrado el pH metro se llevó la solución para su lectura de pH y temperatura.

Figura 3.12: Proceso del ensayo para determinar el pH de los suelos



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.7 Resultados del ensayo de pH en los suelo naturales

Zona de estudio	N°1: Barrio Miraflores	N° 2:Tramo Av.Principal Campus Universitario
pH	9,65	9,49
Temperatura (°C)	25,5	25,6

Fuente: Elaboración Propia

3.4 Caracterización del estabilizante

3.4.1 Finura de la CCA(Ceniza de cascarilla de arroz)

Tiene como objetivo determinar la finura de la CCA por medio de un tamizado de malla N°40 y N° 200. El procedimiento a seguir es el siguiente: Pesar 50 gr de CCA en un recipiente, luego vaciar la muestra a los tamices N° 40 y N° 200 con base y tapa. Se procede a llevar al rop-tap durante aproximadamente 10 min. Se quita la tapa y se separa la malla N° 40 vaciando la fracción de ceniza sobre un recipiente limpio previamente pesado y se pesa la fracción de muestra obtenida en la malla N° 40. Se realiza lo mismo para las fracciones de muestra retenidas en la malla N° 200 y en la base. Todos los pesos retenidos se anotan en la hoja de registro para el cálculo.

Figura 3.13: Proceso del ensayo de finura para la CCA



Figura 3.13: Proceso del ensayo de finura para la CCA

Tabla 3.8 Finura de la CCA

Muestra CCA	Finura
Tamices	% Que Pasa del Total
N°40	95,1
N°200	63,4

Fuente: Elaboración Propia

3.4.2 Análisis químico de la ceniza de cascarilla de arroz.-

Los resultados del análisis químico de la ceniza indican un máximo de sílice del 51,2% esto es debido a la mala incineración de la cascarilla.

Tabla 3.9. Analisis químico de CCA

Parámetros	Unidades	1	2
Si O ₂	%	51,2	36,4
Al ₂ O ₃	%	0,1	0,06

Fuente: Informe de ensayo (ver Anexol)

3.5 Proceso de estabilización con ceniza de cascarilla de arroz (CCA) y CAL

3.5.1 Preparación de mezclas

Como ya se había mencionado en el marco teórico se utilizó la misma secuencia para la mezclas (S+CAL) y (S+CAL+CCA).

Los porcentajes de CAL y CCA se especificaron como un porcentaje de masa en seco del suelo (Ver Figura 3.14). Por otro lado los materiales suelo-cal y suelo-cal-cca antes mencionadas fueron preparados por la mezcla en seco de los componentes con la posterior adición de agua. (Ver Figura 3.15).

Figura 3.14: Preparación de mezcla S-CAL-CCA



Fuente: Elaboración Propia

Figura 3.15: Proceso de combinado mezcla en seco (S-CAL-CCA) y adición de agua



Fuente: Elaboración Propia

3.5.2 Proceso de estabilización

Las mezclas de suelo-cal-cca se compone básicamente de cuatro materiales fundamentales: suelo, cal,cca y agua, que mezclados bajo una adecuada dosificación nos dará un producto que cumple con las especificaciones necesarias de una buena estabilización.

Para el proyecto se determinó primeramente el porcentaje de cal utilizando el “método del pH”. El porcentaje de cal que se determina por el ensayo es aquel que es capaz de liberar sílice y alúmina de la arcilla para reaccionar con el calcio de la cal y formar los silicatos y aluminatos cálcicos hidratados con propiedades cementantes similares a las del cemento. A continuación se detallan los resultados de pH en suelos con cal donde se puede observar que el porcentaje de consigna es 3% de cal.

Tabla 3.10. Resultados de pH con diferentes % de CAL Zona 1

% Estabilizante	Temperatura °C	pH
2%CAL	25,8	11,64
3%CAL	26	11,67
4%CAL	26	11,67
5%CAL	25,7	12,15

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.11. Resultados de pH con diferentes % de CAL Zona 2

% Estabilizante	Temperatura °C	pH
2%CAL	25,6	11,65
3%CAL	25,9	12,06
4%CAL	25,3	12,19
5%CAL	25,4	12,25

Fuente: Elaboración Propia

Para el porcentaje de CCA se procedió a dar rangos un tanto elevados ya que no se cuenta con mucha información; por tanto la dosificación para hallar el % óptimo de la mezcla S-CAL-CCA es la siguiente:

- Mezcla 1: S-3%CAL-3%CCA
- Mezcla 2: S-3%CAL-5%CCA
- Mezcla 3: S-3%CAL-7%CCA
- Mezcla 4: S-3%CAL-10%CCA

3.5.3 Ensayos de control.-

Los ensayos de control para la estabilización de suelos son los mismos utilizados para la caracterización de las muestras.

El porcentaje de cal varía de 2 a 5 % para mezclas (S-CAL) y luego para mezcla(S-CAL-CCA) se mantiene constante el 3% de cal y varía el contenido de CCA de 3 a 10 %; de esta manera poder comparar los resultados con la máxima adición de cal y los obtenidos con la mezcla (CAL-CCA).

A continuación se detallan las planillas de tablas y gráficas de los resultados de los ensayos obtenidos en laboratorio.

3.5.3.1 Granulometría

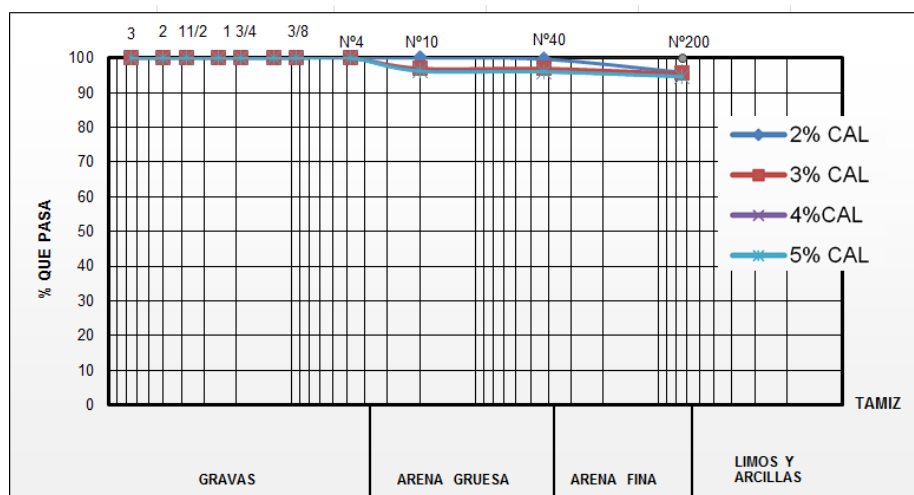
- **Resultados del ensayo de granulometría para la zona del Barrio de Miraflores.**

Tabla 3.12.Resultados de granulometría con 2-3-4-5% de CAL_ Zona 1

% de CAL	2%	3%	4%	5%
Tamices	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total
3"	100,00	100,00	100,00	100,00
2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	100,00	100,00	100,00	100,00
Nº4	100,00	100,00	100,00	100,00
Nº10	100,00	97,00	96,40	96,20
Nº40	99,66	96,96	96,06	96,02
Nº200	95,86	95,56	94,74	94,62

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.7. Ensayo de granulometría con 2-3-4-5 % de CAL_ Zona 1



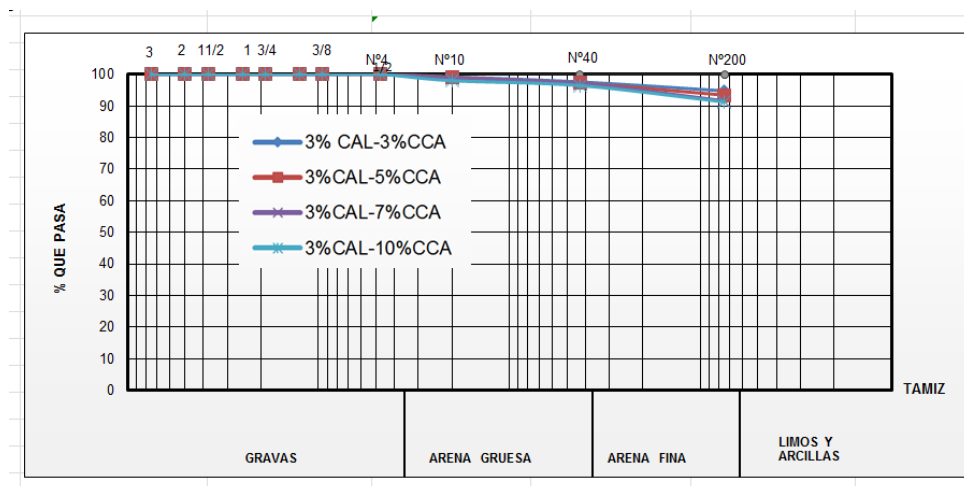
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.13. Resultados de granulometría con 3% CAL (valor cte.) y variación de 3-5-7-10 % de CCA_ Zona 1

% de CAL-CCA	3%CAL-3%CCA	3%CAL-5%CCA	3%CAL-7%CCA	3%CAL-10%CCA
Tamices	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total
3"	100,00	100,00	100,00	100,00
2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	100,00	100,00	100,00	100,00
N°4	100,00	100,00	100,00	100,00
N°10	99,20	99,00	98,80	98,00
N°40	97,60	97,20	97,14	96,42
N°200	94,80	93,44	91,62	91,28

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.8. Ensayo de granulometría con 3% CAL (valor cte.) y variación de 3-5-7-10 % de CCA _Zona 1



Fuente: Elaboración Propia

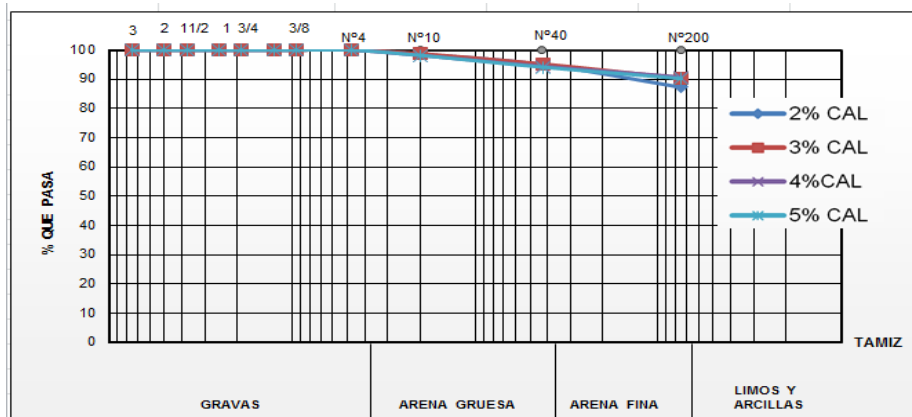
- **Resultados del ensayo de granulometría para la zona del Campus Universitario.**

Tabla 3.14. Resultados de granulometría con 2-3-4-5% de CAL_ Zona 2

% de CAL	2%	3%	4%	5%
Tamices	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total
3"	100,00	100,00	100,00	100,00
2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	100,00	100,00	100,00	100,00
Nº4	100,00	100,00	100,00	100,00
Nº10	98,58	98,76	98,16	98,18
Nº40	95,02	95,22	94,44	94,14
Nº200	87,28	90,36	90,80	90,26

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.9. Ensayo de granulometría con 2-3-4-5 % de CAL_Zona 2



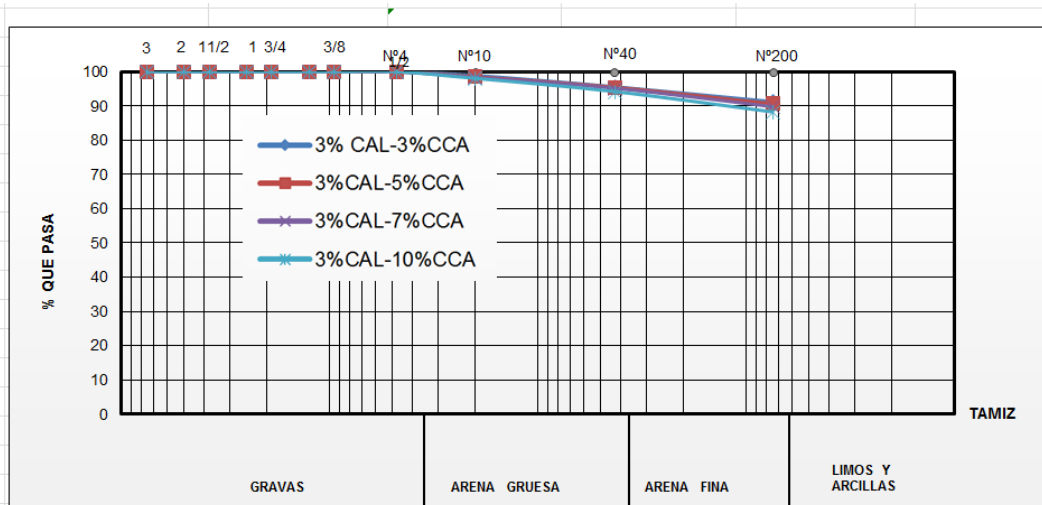
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.15. Resultados de granulometría con 3% CAL (valor cte.) y variación de 3-5-7-10 % de CCA_Zona 2

% de CAL-CCA	3%CAL-3%CCA	3%CAL-5%CCA	3%CAL-7%CCA	3%CAL-10%CCA
Tamices	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total	% Que Pasa del Total
3"	100,00	100,00	100,00	100,00
2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1 1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
1"	100,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	100,00	100,00	100,00	100,00
1/2"	100,00	100,00	100,00	100,00
3/8"	100,00	100,00	100,00	100,00
N°4	100,00	100,00	100,00	100,00
N°10	98,94	98,56	98,40	98,08
N°40	95,60	95,46	95,18	94,20
N°200	91,30	90,68	89,84	88,30

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.10. Ensayo de granulometría con 3% CAL (valor cte.) y variación de 3-5-7-10 % de CCA _Zona 2



Fuente: Elaboración Propia

3.5.3.2 Límites de Atterberg

- **Resultados del ensayo de límite de Atterberg para la zona del Barrio Miraflores**

Tabla 3.16. Resultados de L.L., L.P., e I.P. con agentes estabilizantes _Zona 1

% de CAL	2%	3%	4%	5%
Límite Líquido (L.L.) % =	50,00	40,00	40,00	-
Límite Plástico (L.P.) % =	32,00	32,00	35,00	-
Índice de Plasticidad (I.P.) % =	11,00	7,00	6,00	N.P.

% de CAL-CCA	3%CAL-3%CCA	3%CAL-5%CCA	3%CAL-7%CCA	3%CAL-10%CCA
Límite Líquido (L.L.) % =	-	-	-	-
Límite Plástico (L.P.) % =	-	-	-	-
Índice de Plasticidad (I.P.) % =	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.

Fuente: Elaboración Propia

➤ **Resultados del ensayo de límites de Atterberg para la zona del Campus Universitario**

Tabla 3.17. Resultados de L.L.,L.P.,e I.P.con agentes estabilizantes _Zona 2

% de CAL	2%	3%	4%	5%
Limite Liquido (L.L.) % =	47,00	45,00	-	-
Limite Plástico (L.P.)%=	34,00	37,00	46,00	-
Índice de Plasticidad (I.P.)%=	13,00	9,00	N.P.	N.P.

% de CAL-CCA	3%CAL-3%CCA	3%CAL-5%CCA	3%CAL-7%CCA	3%CAL-10%CCA
Limite Liquido (L.L.) % =	-	-	-	-
Limite Plástico (L.P.)%=	-	-	-	-
Índice de Plasticidad (I.P.)%=	N.P.	N.P.	N.P.	N.P.

Fuente: Elaboración Propia

3.5.3.3 Compactación

➤ **Resultados del ensayo de compactación para la zona del Barrio Miraflores**

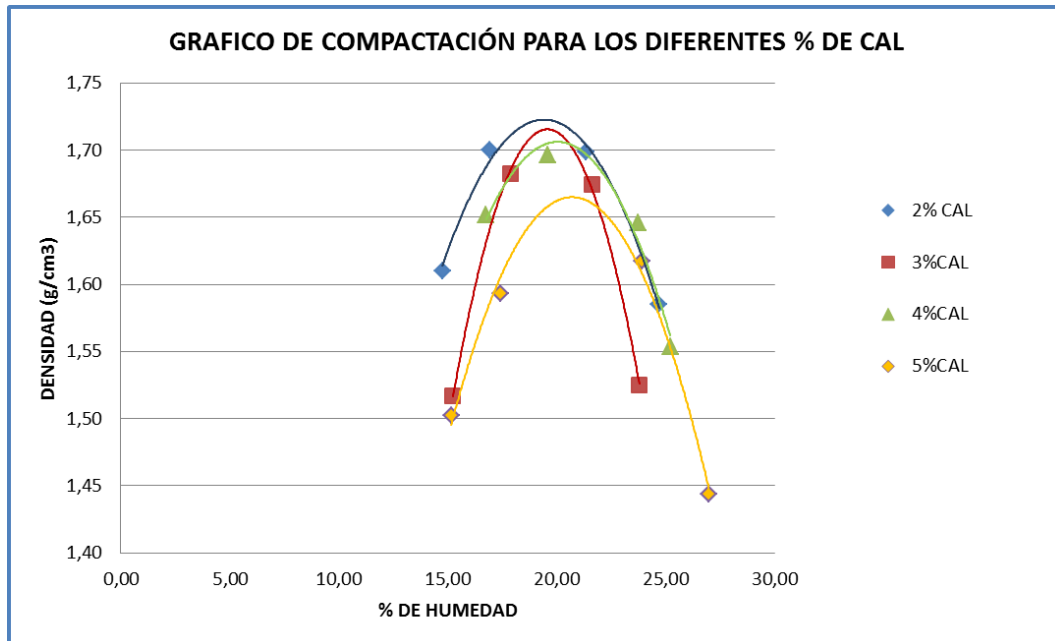
Tabla 3.18.Resultados de compactación con agentes estabilizantes _ Zona 1

% de CAL	2%	3%	4%	5%
Densidad máxima (gr/cm ³)	1,75	1,76	1,80	1,85
Humedad Optima (%)	17,79	17,41	16,80	16,55

% de CAL-CCA	3%CAL-3%CCA	3%CAL-5%CCA	3%CAL-7%CCA	3%CAL-10%CCA
Densidad máxima (gr/cm ³)	1,84	1,87	1,81	1,78
Humedad Optima (%)	17,86	17,07	18,72	19,21

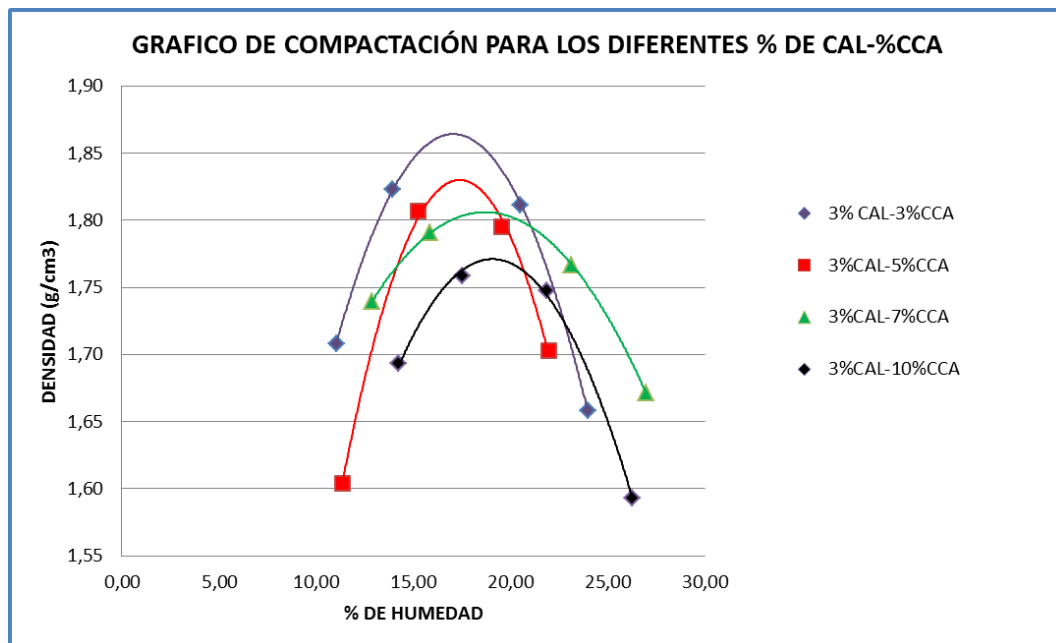
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.11. Curvas de compactación con 2-3-4-5 % de CAL_ Zona 1



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.12. Curvas de compactación con 3% CAL (valor cte.) y variación de 3-5-7-10 % de CCA_ Zona 1



Fuente: Elaboración Propia

➤ **Resultados del ensayo de compactación para la zona del Campus Universitario**

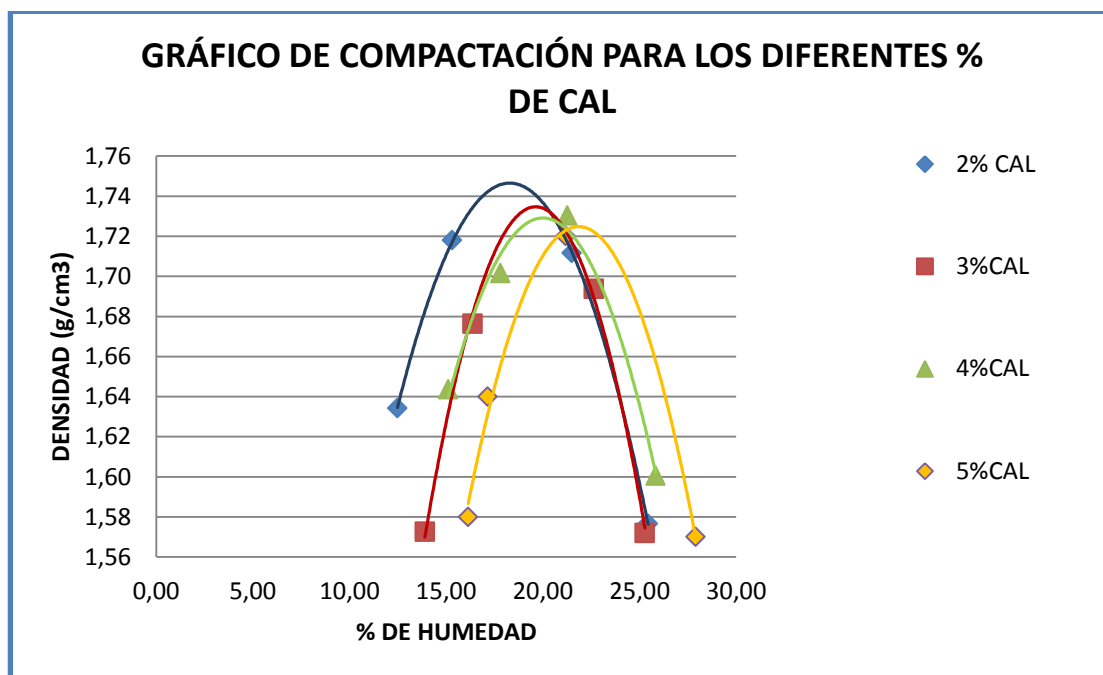
Tabla 3.19. Resultados de compactación con agentes estabilizantes _ Zona 2

% de CAL	2%	3%	4%	5%
Densidad máxima (gr/cm ³)	1,79	1,81	1,82	1,83
Humedad Óptima (%)	17,73	17,19	17,09	16,84

% de CAL-CCA	3%CAL-3%CCA	3%CAL-5%CCA	3%CAL-7%CCA	3%CAL-10%CCA
Densidad máxima (gr/cm ³)	1,69	1,67	1,66	1,65
Humedad Óptima (%)	19,31	19,58	20,88	22,31

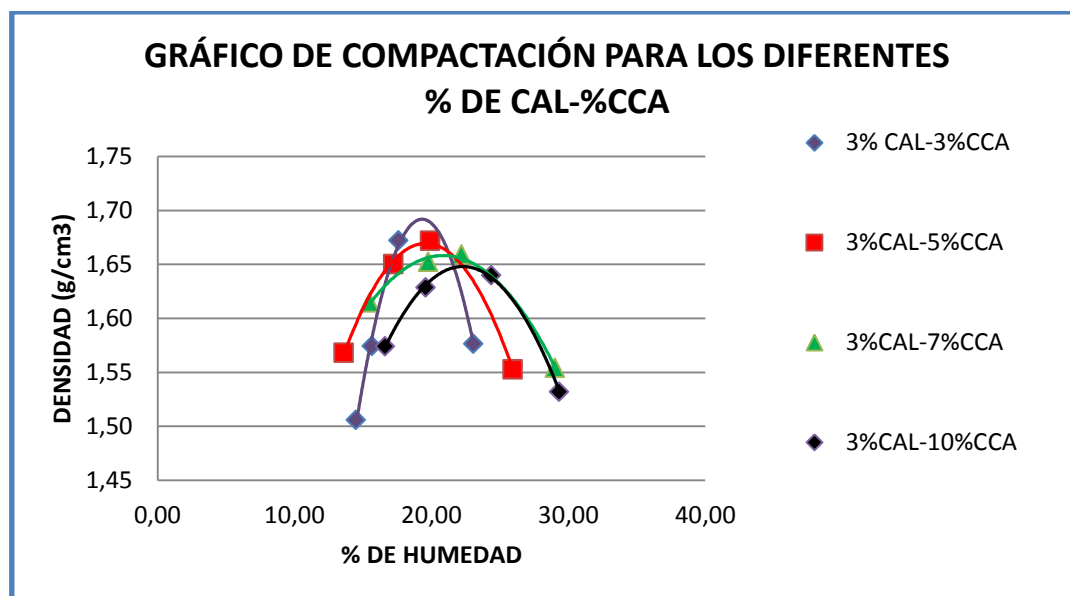
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.13. Curvas de compactación con 2-3-4-5 % de CAL_ Zona 2



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.14. Curvas de compactación con 3% CAL (valor cte.) y variación de 3-5-7-10 % de CCA _Zona 2



Fuente: Elaboración Propia

3.5.3.4 CBR y Expansión

➤ **Resultados del ensayo de CBR para la zona del Barrio Miraflores**

Tabla 3.20. Resultados de % de CBR y expansión con agente estabilizante: CAL para la Zona 1

% de CAL	2%	3%	4%	5%
CBR (%)	16	20	25	28,00
Expansión (%)	2,01	0,44	0,30	0,10

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.21. Tabla 3.20. Resultados de % de CBR y expansión con agente estabilizante: CAL-CCA para la Zona 1

% de CAL-CCA	3%CAL-3%CCA	3%CAL-5%CCA	3%CAL-7%CCA	3%CAL-10%CCA
CBR (%)	33,40	40,00	47,30	76,00
Expansión (%)	0,36	0,35	0,185	0,16

Fuente: Elaboración Propia

➤ **Resultados del ensayo de CBR para la zona del Campus Universitario**

Tabla 3.22. Resultados de % de CBR y expansión con agente estabilizante: CAL para la Zona 2

% de CAL	2%	3%	4%	5%
CBR (%)	8	14	24	26,00
Expansión (%)	1,93	1,07	0,96	0,54

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.23. Resultados de % de CBR y expansión con agente estabilizante: CAL-CCA para la Zona 2

% de CAL-CCA	3%CAL-3%CCA	3%CAL-5%CCA	3%CAL-7%CCA	3%CAL-10%CCA
CBR (%)	19,00	23,00	24,00	24,00
Expansión (%)	0,81	0,78	0,750	0,56

Fuente: Elaboración Propia

3.5.3.5 Compresión Inconfinada

➤ **Resultados del ensayo de compresión inconfinada para la zona del Barrio Miraflores**

Tabla 3.24. Resultados de Compresión Inconfinada con agentes estabilizantes_Zona 1

% Estabilizante	RCI Qu (kg/cm ²)
2%CAL	5,26
3%CAL	5,52
4%CAL	5,87
5%CAL	7,92
3%CAL-3%CCA	5,55
3%CAL-5%CCA	5,61
3%CAL-7%CCA	5,88
3%CAL-10%CCA	6,77

Fuente: Elaboración Propia

- **Resultados del ensayo de compresión inconfiada para la zona del Campus Universitario**

Tabla 3.25. Resultados de Compresión Inconfiada con agentes estabilizantes

Zona 2

% Estabilizante	RCI Qu (kg/cm ²)
2%CAL	3,25
3%CAL	3,74
4%CAL	5,36
5%CAL	5,9
3%CAL-3%CCA	5,59
3%CAL-5%CCA	5,91
3%CAL-7%CCA	6,23
3%CAL-10%CCA	6,36

Fuente: Elaboración Propia

3.5.3.6 Determinación de PH

- **Comportamiento del pH del suelo de acuerdo con el porcentaje cal y cal-cca para la zona del Barrio Miraflores.**

Tabla 3.26. Resultados de pH en los suelos estabilizados Zona 1

% Estabilizante	Temperatura °C	pH
2%CAL	25,8	11,64
3%CAL	26	11,67
4%CAL	26	11,67
5%CAL	25,7	12,15
3%CAL-3%CCA	25,7	12,25
3%CAL-5%CCA	25,7	12,23
3%CAL-7%CCA	25,7	12,19
3%CAL-10%CCA	25,6	12,01

Fuente: Elaboración Propia

- **Comportamiento del pH del suelo de acuerdo con el porcentaje cal y cal-cca para la zona del Campus Universitario.**

Tabla 3.27. Resultados de pH en los suelos estabilizados Zona 2

% Estabilizante	Temperatura °C	pH
2%CAL	25,6	11,65
3%CAL	25,9	12,06
4%CAL	25,3	12,19
5%CAL	25,4	12,25
3%CAL-3%CCA	25,3	11,79
3%CAL-5%CCA	25,3	12,12
3%CAL-7%CCA	25,4	12,01
3%CAL-10%CCA	25,4	12,02

Fuente: Elaboración Propia

3.6 Resumen de resultados.-

3.6.1 Resultados de caracterización correspondientes a los suelos en su estado natural

La caracterización del suelo consistió en la elaboración de una serie de ensayos mostrados en la siguiente planilla donde se determinaron sus características físico-mecánicas y químicas como el contenido de pH.

Tabla 3.28. Resultados de caracterización de las arcillas a estabilizar

Condicion de Suelo	Descripcion de Material	Clasificacion (AASHTO)	Limites de Atterberg (%)			Compactacion T-180		C.B.R. (%)	Expansion (%)	RCI "q_u" (kg/cm²)	pH
			L.L.	L.P.	I.P.	Dens.Max. (gr/cm³)	Hum.Optima (%)				
Natural	Arcilla amarilla	A-7-6(14)	50	31	20	1,74	18,19	1,6	4,2	2,92	9,65
Natural	Arcilla negra	A-7-6(13)	48	30	18	1,77	17,86	3	4,52	2,12	9,49

Fuente: Elaboración Propia

3.6.2 Resultados de los ensayos realizados con las diferentes mezclas realizadas para la estabilización.-

Tabla 3.29. Resultados para los ensayos realizados con las diferentes mezclas para la estabilización en la zona N° 1: Barrio Miraflores

Condicion de Suelo	Descripcion de Material	Limites de Atterberg (%)			Compactacion T-180		C.B.R. (%)	Expansion (%)	RCI "q _u " (kg/cm ²)	pH
		L.L.	L.P.	I.P.	Dens.Max. (gr/cm ³)	Hum.Optima (%)				
Mezcla	2%CAL	50,00	32,00	11,00	1,72	19,42	16	2,01	5,26	11,64
Mezcla	3%CAL	40,00	32,00	7,00	1,71	19,57	20	0,44	5,52	11,67
Mezcla	4%CAL	40,00	35,00	6,00	1,70	20,03	25	0,30	5,87	11,67
Mezcla	5%CAL	-	-	N.P.	1,67	20,74	28,00	0,10	7,92	12,15
Mezcla	3%CAL-3%CCA	-	-	N.P.	1,87	17,07	33,40	0,36	5,55	12,25
Mezcla	3%CAL-5%CCA	-	-	N.P.	1,83	17,37	40,00	0,35	5,61	12,23
Mezcla	3%CAL-7%CCA	-	-	N.P.	1,81	18,72	47,30	0,185	5,88	12,19
Mezcla	3%CAL-10%CCA	-	-	N.P.	1,78	19,21	76,00	0,16	6,77	12,01

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 3.30. Resultados para los ensayos realizados con las diferentes mezclas para la estabilización en la zona N° 2: Av. Principal del campus universitario

Condicion de Suelo	Descripcion de Material	Limites de Atterberg (%)			Compactacion T-180		C.B.R. (%)	Expansion (%)	RCI "q _u " (kg/cm ²)	pH
		L.L.	L.P.	I.P.	Dens.Max. (gr/cm ³)	Hum.Optima (%)				
Mezcla	2%CAL	47,00	34,00	13,00	1,75	18,28	6	1,93	3,25	11,7
Mezcla	3%CAL	45,00	37,00	9,00	1,74	19,64	12	1,07	3,74	12,1
Mezcla	4%CAL	-	46,00	N.P.	1,73	20,00	22	0,96	5,36	12,2
Mezcla	5%CAL	-	-	N.P.	1,72	21,91	25,00	0,54	5,9	12,3
Mezcla	3%CAL-3%CCA	-	-	N.P.	1,69	19,31	19,00	0,81	5,59	11,8
Mezcla	3%CAL-5%CCA	-	-	N.P.	1,67	19,58	23,00	0,78	5,91	12,1
Mezcla	3%CAL-7%CCA	-	-	N.P.	1,66	20,88	24,00	0,75	6,23	12,0
Mezcla	3%CAL-10%CCA	-	-	N.P.	1,65	22,31	24,00	0,56	6,36	12,0

Fuente: Elaboración Propia

3.7 Análisis de resultados.-

3.7.1 Análisis de los resultados de las propiedades de los suelos naturales

A continuación se presentan los análisis de los resultados de los ensayos realizados a cada una de las muestras de suelo antes de ser tratados con CAL y CCA.

Las muestras de suelo utilizadas se han clasificado según el lugar de donde fueron extraídas como Muestra Zona 1 proveniente del Barrio Miraflores y Muestra Zona 2 de la Av. Principal del Campus universitario zona El Tejar; ciudad de Tarija, Bolivia respectivamente.

Para la muestra procedente del Barrio Miraflores, los ensayos realizados muestran algunas particularidades. El análisis granulométrico (ver Tabla 3.1) indica un alto contenido de material fino, se trata de una muestra de suelo arcilloso con un contenido de finos de 90,48 % con ligera presencia de arena fina de 9,52 % por lo que el porcentaje de grava o material grueso es nulo.

En la Tabla 3.27 se observa que al determinarse los límites de consistencia y de acuerdo con el I.P. obtenido se determinó, según el sistema de clasificación AASHTO como un A-7-6 (14) respectivamente. Al realizar la determinación de pH se obtuvo un valor de 9,65 por lo que se considera un suelo muy alcalino. También se puede observar que debido a su condición de suelo arcilloso su porcentaje de CBR es bastante bajo, uno de los parámetros que se desea mejorar al estabilizarlo con cal y CCA.

La segunda muestra analizada fue la procedente de la Av. Principal del Campus Universitario (U.A.J.M.S.) al igual que la muestra 1, en la tabla 3.1 se observa que ésta también posee un alto porcentaje de finos aunque un poco más bajo que la primera ya que el contenido de arena es de 12,72% y el de finos 87,28%. Este suelo se clasificó como un suelo arcilloso con presencia de arena fina y mediana y debido a los resultados obtenidos de los límites, se puede clasificar como un suelo orgánico altamente plástico con un I.P. de 18 y para la clasificación según ASSHTO A-7-6 (13).

El nivel de pH obtenido fue de 9,49 por lo que se define como un suelo alcalino. Los porcentajes de CBR obtenidos en esta muestra son bajos presentando el doble de los resultados con relación a la muestra 1, siendo su índice de CBR igual a 3% respecto al 95% de su densidad máxima, lo cual puede deberse al porcentaje de arena que contiene. Sin embargo la resistencia a compresión simple es baja pero con una diferencia significativa con relación a los valores alcanzados en la muestra 1. (Ver Tabla 3.27)

3.7.2 Análisis de los resultados de las propiedades de los suelos tratados con CAL y CCA.

Después de presentar los resultados de los ensayos realizados a las muestras de suelo sin tratamiento, se presentan ahora los resultados de los ensayos con la adición de CAL y CCA y los cambios producidos en las muestras al ser mezcladas.

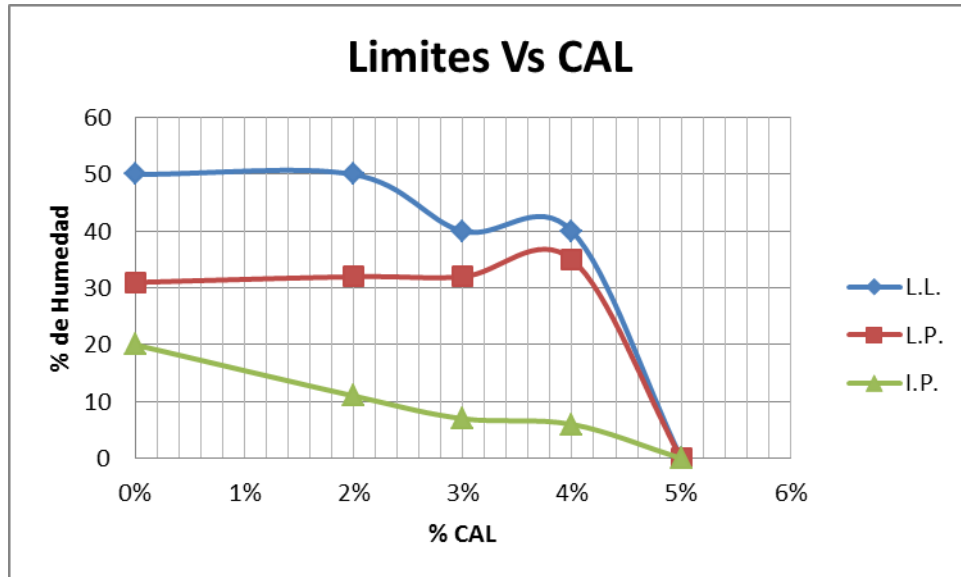
Los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio realizados a las diferentes mezclas que se propusieron para estabilizar los 2 tipos de arcilla, revelaron datos que muestran diferentes comportamientos de cada mezcla, conforme se aplicaban diferentes proporciones de cada una de los % de CAL y CCA.

3.7.2.1 Evaluación del análisis granulométrico

En las muestras mezcladas con cal y CCA se realizó el análisis granulométrico por el método de lavado donde se puede observar cambios no significativos en relación al tamaño de sus partículas, indicando para la muestra 1 un porcentaje de finos de 91,28 con una mezcla (S-3%CAL-10%CCA) siendo la diferencia de 0,8 con respecto al natural (ver Tabla 3.12 y 3.13) y para la muestra 2 con la misma mezcla el porcentaje de fino llega a 88,30% un poco más que el natural (ver tabla 3.14. y 3.15) .

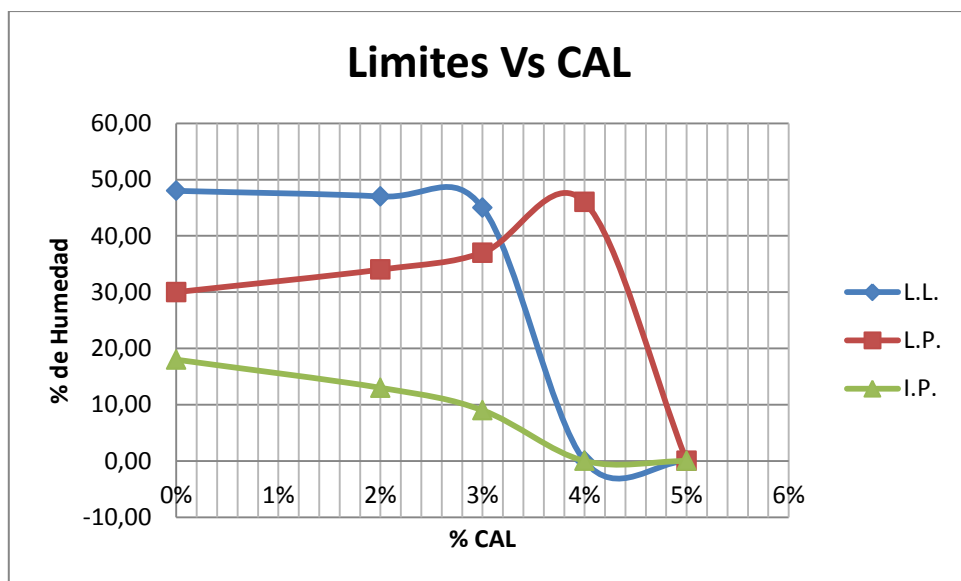
3.7.2.2 Influencia de la mezcla propuesta para la estabilización en los límites de consistencia de un suelo arcilloso

Gráfica 3.15. Influencia de la CAL en los límites de consistencia para la Zona 1



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.16. Influencia de la CAL en los límites de consistencia para la Zona 2



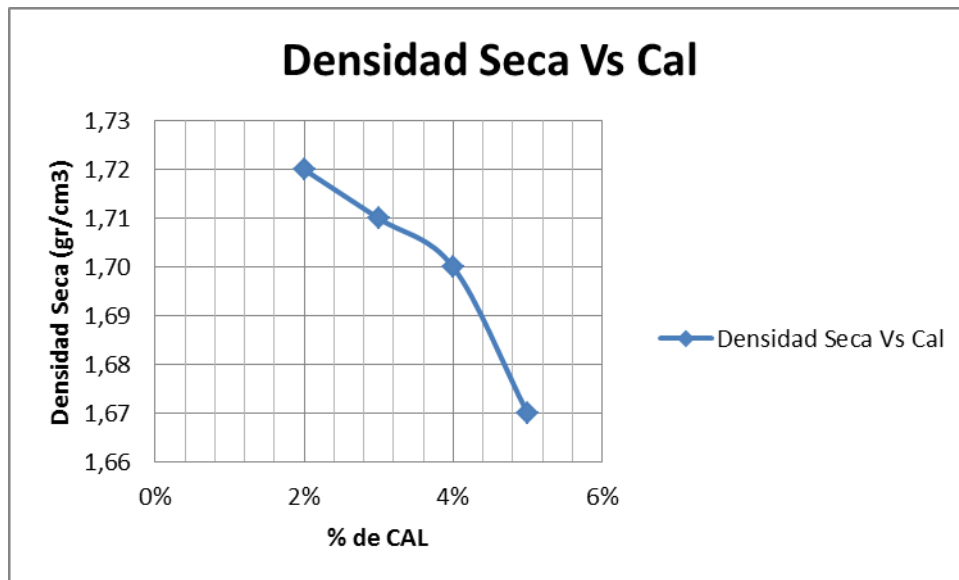
Fuente: Elaboración Propia

Para el caso de la muestra 1 (Gráfica 3.15) el I.P. tuvo un decremento de 20 sin cal a un valor de 6 con 4% de cal. Del mismo modo la muestra 2 (Gráfica 3.16) presentó decremento en su I.P. de un valor igual a 18 sin cal hasta llegar a un I.P. de 9 con 3% de cal, sin embargo cuando se le agregó el 5 % de cal y también con los porcentajes de mezclas (SCAL-CCA) los límites de consistencia no pudieron ser determinados pues la cantidad de cal produjo cambios en la textura del suelo hasta llevarlo a una apariencia arenosa y suelta (Ver Anexo 6).

Por otro lado se puede observar en ambas figuras que el límite líquido tiende a disminuir de manera significativa contraria al límite plástico que aumenta en mayor proporción registrando así una disminución del I.P. de los minerales arcillosos.

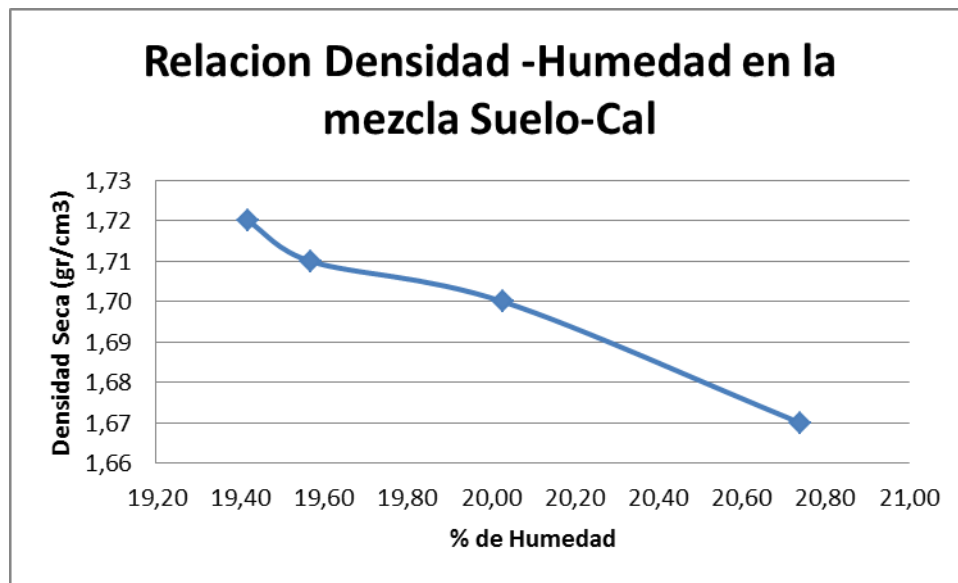
3.7.2.3 Influencia de la mezcla propuesta para la estabilización en los resultados del ensayo de compactación

Gráfica 3.17. Influencia de la CAL en la densidad seca para la Zona 1



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.18. Relación δ_{seca} - %W en la mezcla S-CAL para la Zona 1

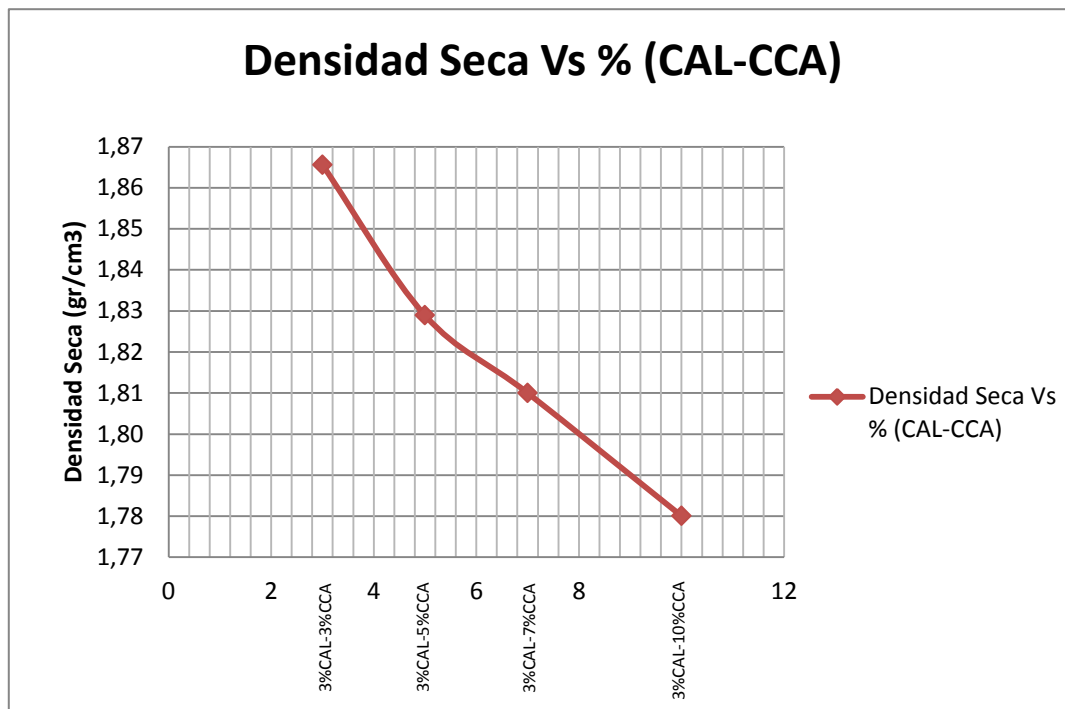


Fuente: Elaboración Propia

Con respecto al ensayo de compactación con adición de cal, la densidad seca del suelo disminuyó con el 2% de cal en relación a su estado natural de $1,74 \text{ kg/cm}^3$ hasta llegar a un valor de $1,67 \text{ kg/cm}^3$ con 5% de cal.

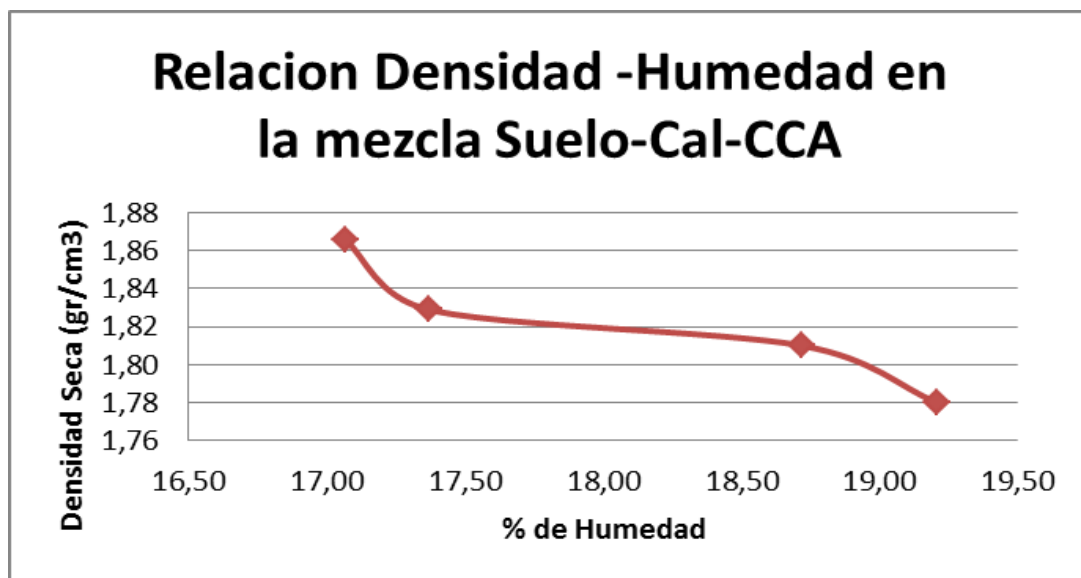
Por otro lado la aplicación de la cal (Gráfica 3.18) en la muestra 1 señala una depreciación en la densidad seca en relación a su contenido de humedad que va aumentando.

Gráfica 3.19. Influencia de la mezcla (S-CAL –CCA) en la densidad seca para la Zona 1



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.20. Relación δ_{seca} - %W en la mezcla S-CAL-CCA para la Zona 1

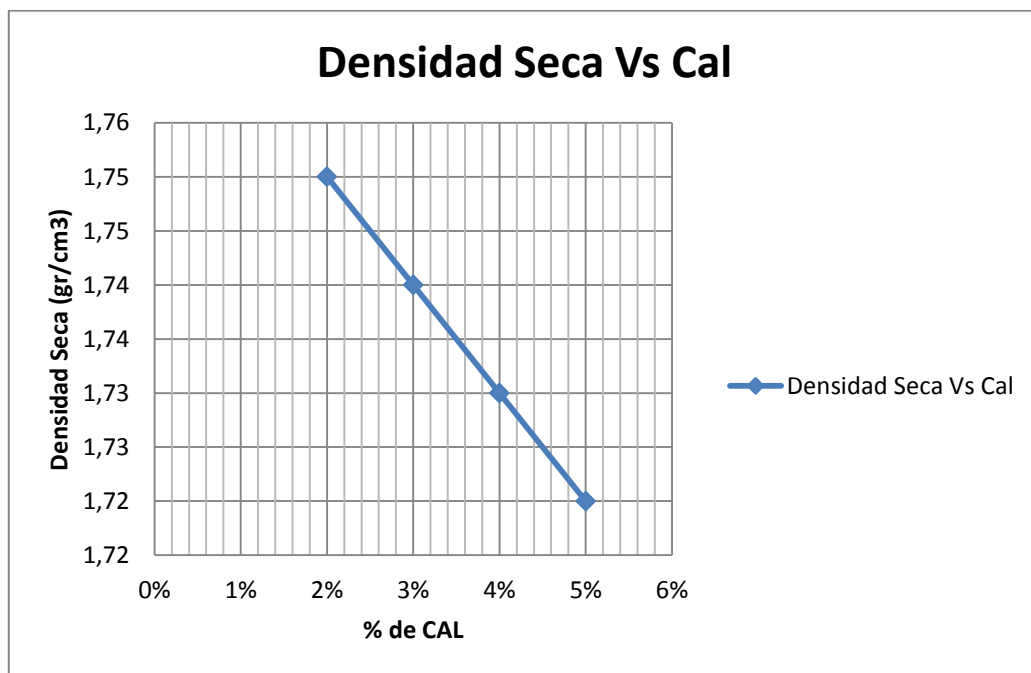


Fuente: Elaboración Propia

Las gráficas 3.19 y 3.20 muestran el efecto de la adición de cal y CCA y sus combinaciones sobre las características de compactación de las muestras ya ensayadas, respectivamente. Estas gráficas muestran que la adición de CAL-CCA aumenta el contenido de humedad óptimo hasta un valor de 19,21 % y disminuyo la densidad seca a 1,78 gr/cm³. Esto se debe a la floculación producida por la reacción de la mezcla (S-CAL-CCA).

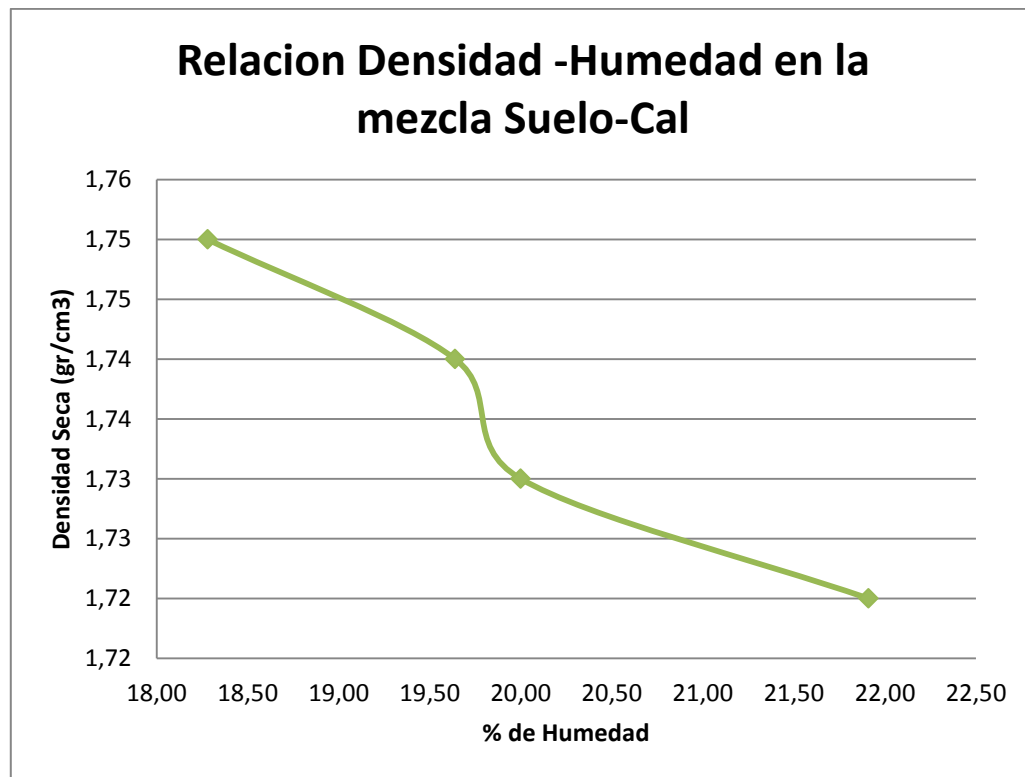
También se deduce que la densidad máxima se consigue con menor energía de compactación, al mismo tiempo que la humedad óptima para esa densidad máxima aumenta.

Gráfica 3.21. Influencia de la CAL en la densidad seca para la Zona 2



Fuente: Elaboración Propia

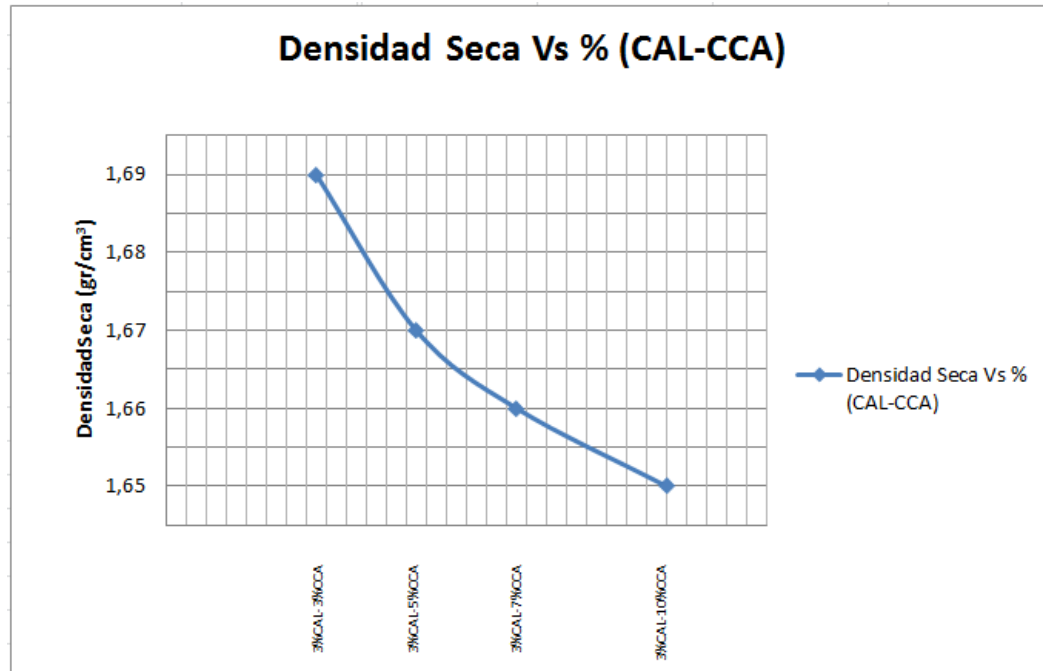
Gráfica 3.22. Relación δ_{seca} - %W en la mezcla S-CAL para la Zona 2



Fuente: Elaboración Propia

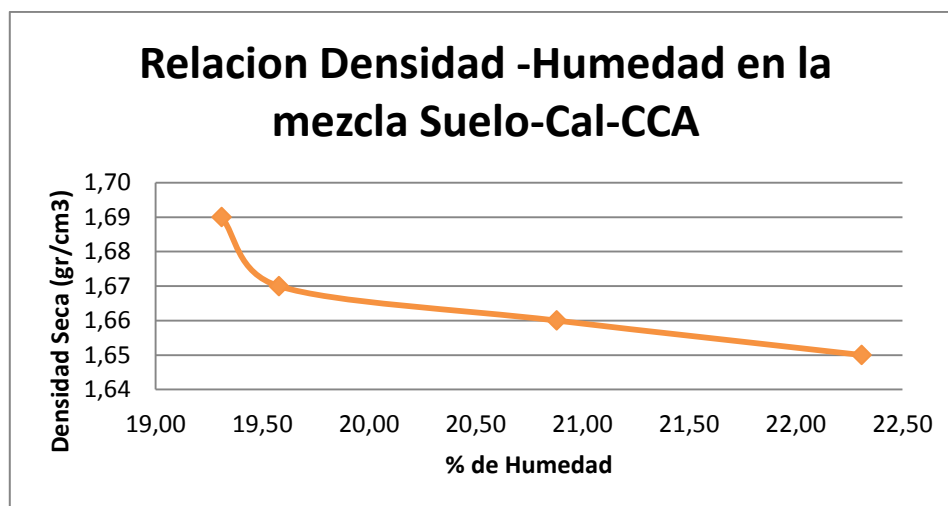
Al igual que los resultados de la gráfica correspondientes a la muestra 1 se observa que la densidad seca disminuye con el contenido porcentual de cal desde $1,77 \text{ gr/cm}^3$ sin cal hasta $1,72 \text{ gr/cm}^3$ con 5% de cal, también la humedad optima tiende a aumentar en relación a la densidad que desciende (Gráfica 3.22) es decir se tiene un valor de humedad de 18,28 % con adición del 2% de cal y aumenta hasta 21,91 % con 5% de cal (Ver tabla 3.19).

Gráfica 3.23. Influencia de la mezcla (S-CAL –CCA) en la densidad seca para la Zona 2



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.24. Relación δ_{seca} - %W en la mezcla S-CAL-CCA para la Zona 2



Fuente: Elaboración Propia

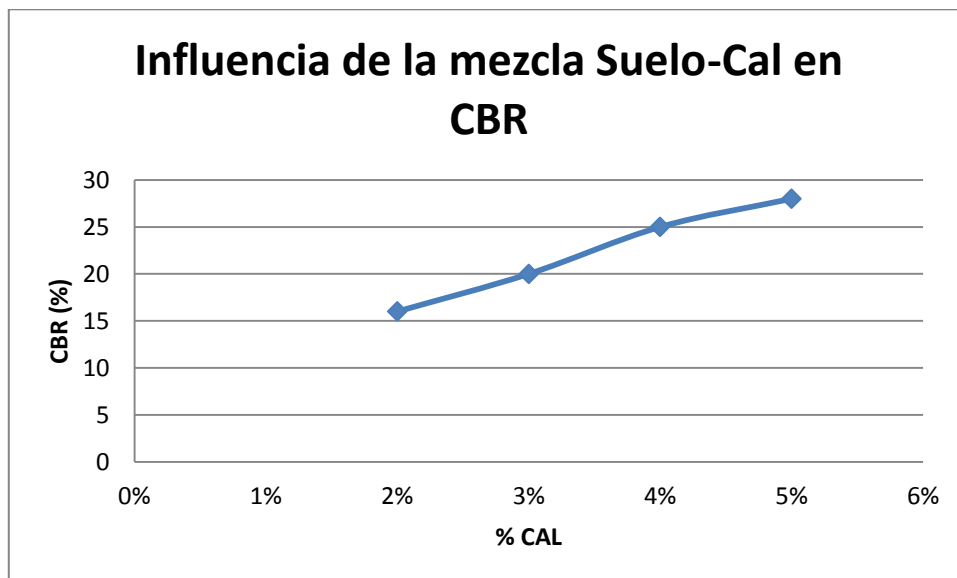
En la Gráfica (3.23) y (3.24) se observa al igual que en las anteriores una rebaja del valor de la densidad seca en los suelos tratados y un aumento en el contenido de

humedad. Es decir se tiene $1,69 \text{ gr/cm}^3$ con un contenido de humedad 19,31% para una mezcla de S-3%CAL-3%CCA y para una mezcla de S-3%CAL-10%CCA disminuye la densidad a $1,65 \text{ gr/cm}^3$ y un aumento del contenido de humedad de 22,31 % (Ver tabla 3.19).

De manera general en las gráficas correspondientes al punto 3.7.2.3 de este capítulo, se observa que tanto la adición de cal hidratada como de CCA produce en todos los suelos un descenso de la densidad seca máxima y un aumento de la humedad óptima de compactación en relación al suelo no tratado esto por la demanda de agua que genera la hidratación de este agente estabilizador (cal y cca). Dichos resultados concuerdan con los obtenidos por Kezdy (1 9 79) y Ayuso (1 982) . Los descensos producidos en la densidad seca máxima son debidos por una parte al menor peso específico de los aditivos empleados en relación al del suelo y por otro a las interacciones físico-químicas que se producen entre éstos y las partículas del suelo. Así, la interacción de la cal con las partículas de arcilla produce una estructura floculada más porosa y de menor densidad (Venuat 1980).

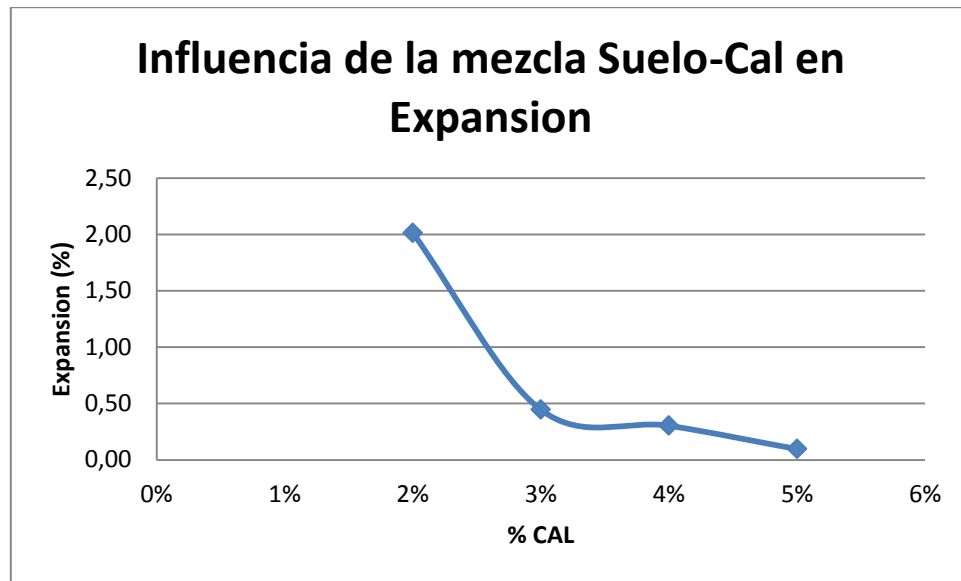
3.7.2.4 Influencia de la mezcla propuesta para la estabilización en los resultados del ensayo de CBR

Gráfica 3.25. Influencia de la mezcla S-CAL en el CBR para la Zona 1



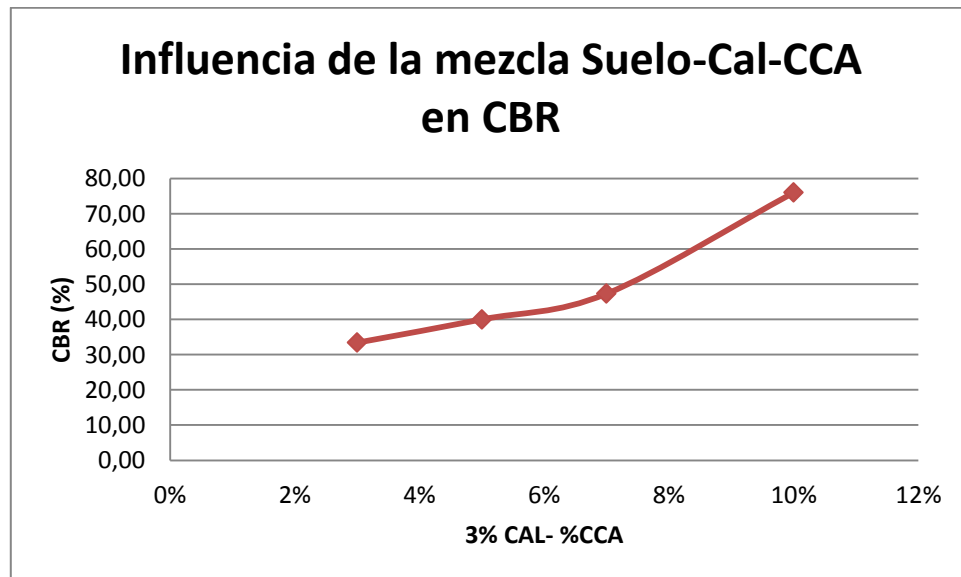
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.26. Influencia de la mezcla (S-CAL) en la expansión para la Zona 1



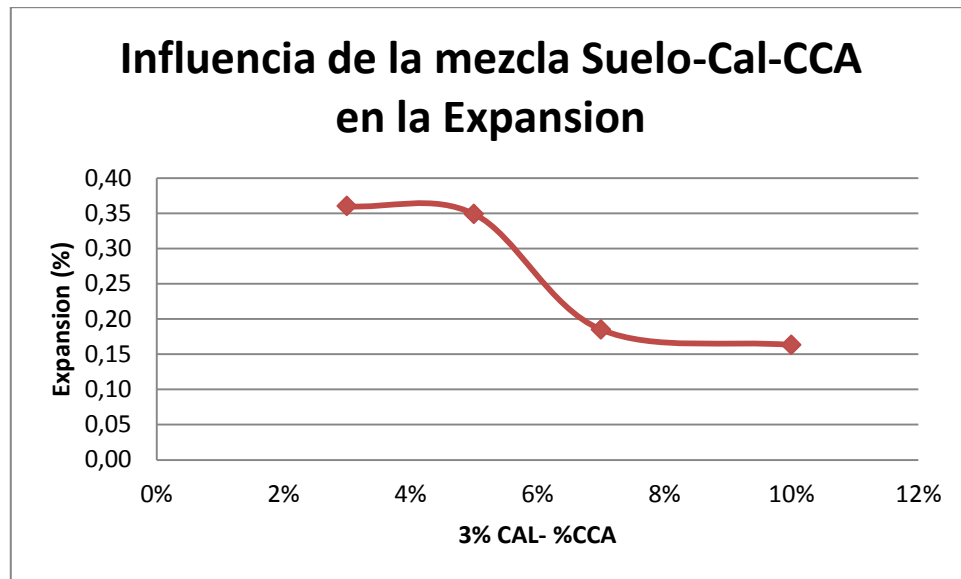
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.27. Influencia de la mezcla(S-CAL-CCA) en el CBR para la Zona 1



Fuente: Elaboración Propia

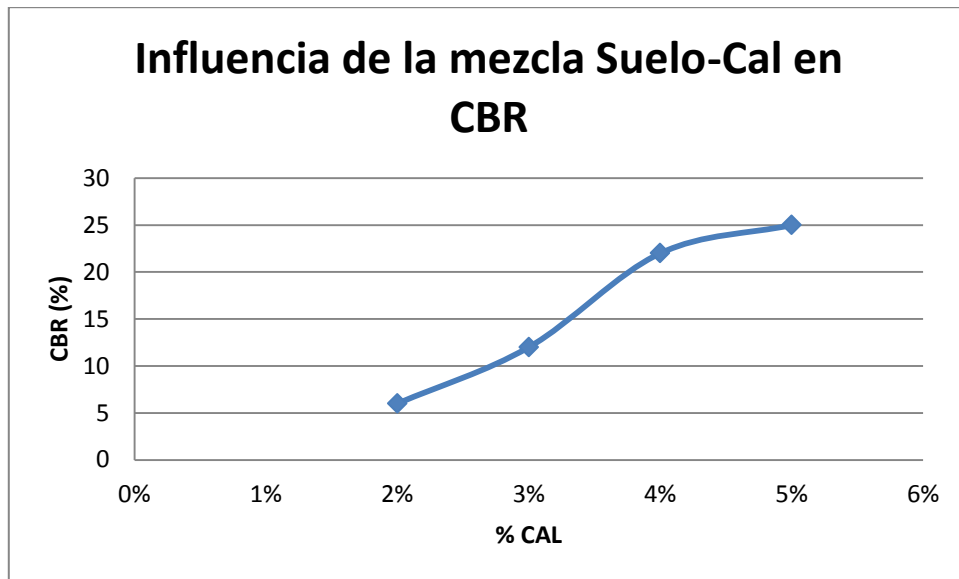
Gráfica 3.28. Influencia de la mezcla (S-CAL-CCA) en la expansión para la Zona 1



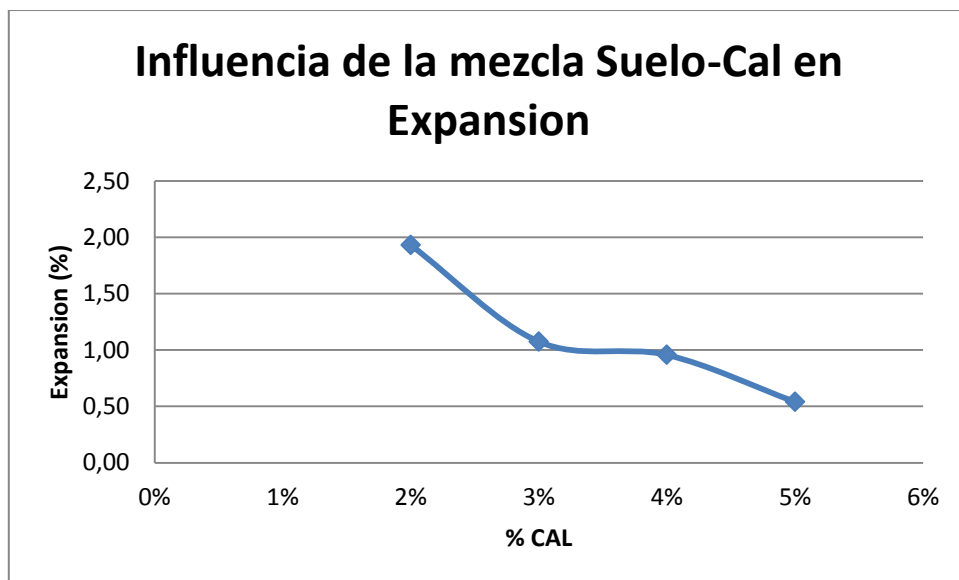
Fuente: Elaboración Propia

En la gráfica 3.25 el índice de CBR a un 95 por ciento de su densidad máxima de compactación asciende hasta un 28% con la muestra preparada con 5% de cal mientras que con la mezcla (S-3%CAL-10%CCA) este índice se eleva a 82% haciendo notable la mejoría en el suelo que se está estabilizando, donde podemos observar el incremento del mismo con forme vamos aumentando el porcentaje de volumen de cal y CCA sobre el suelo cohesivo.

En la Tabla 3.28 se presenta un resumen de los resultados de expansión para el material de la zona 1. En dicha tabla se muestran los valores registrados del índice de CBR y porcentaje de expansión alcanzado, además se pueden observar en las gráficas 3.26 y 3.28 la influencia de la mezcla (S-CAL-CCA) en el porcentaje de expansión para el suelo que tiende a disminuir.

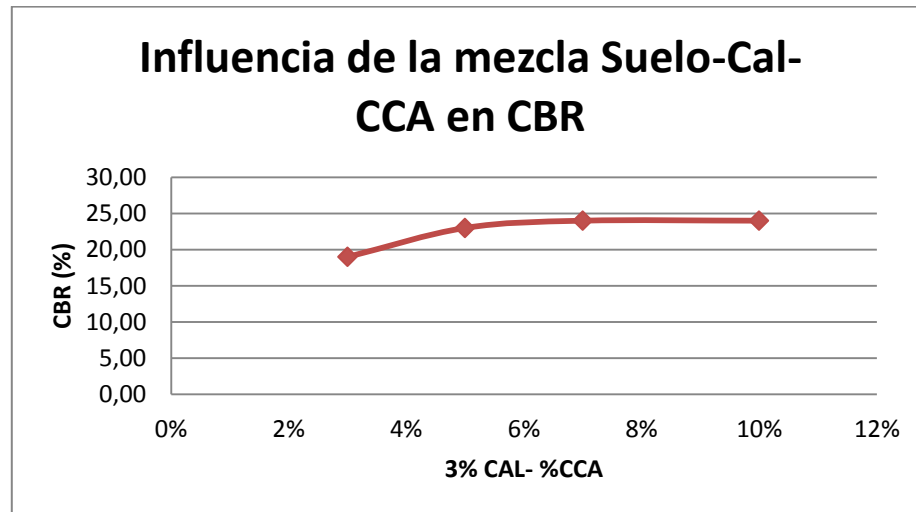
Gráfica 3.29. Influencia de la mezcla S-CAL en el CBR para la Zona 2

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.30. Influencia de la mezcla (S-CAL) en la expansión para la Zona 2

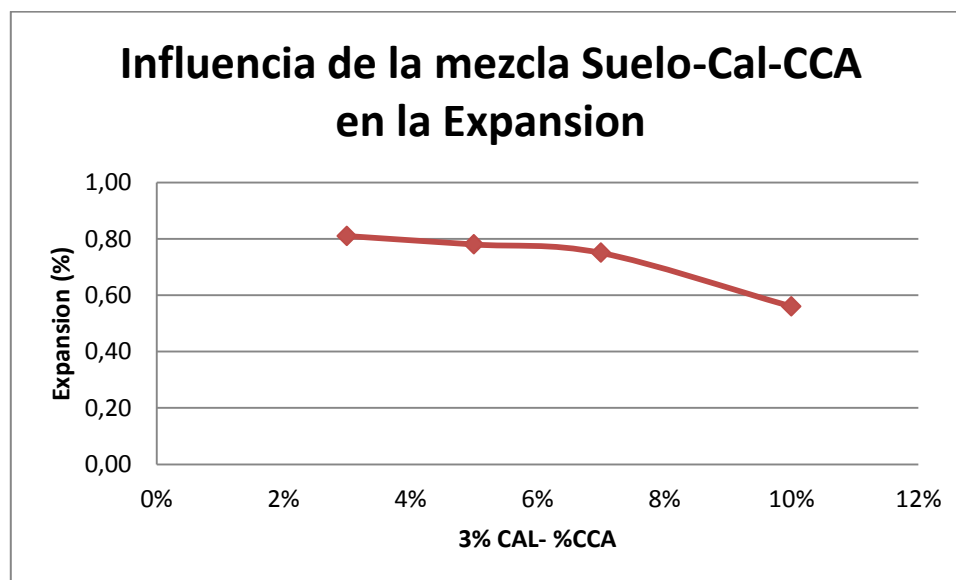
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.31. Influencia de la mezcla (S-CAL-CCA) en el CBR para la Zona 2



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.32. Influencia de la mezcla (S-CAL-CCA) en la expansión para la Zona 2



Fuente: Elaboración Propia

Con los valores obtenidos (Ver Tabla 3.29) de los ensayos realizados podemos graficar los valores los cuales nos muestra la tendencia sobre el incremento del porcentaje del valor CBR en mezclas de suelo con adición de cal (Gráfica 3.29) donde alcanza un máximo de 25 % con 5% de cal y con la mezcla (S-3%CAL-10%CCA) se tiene un índice de CBR de 24 % que sería el valor máximo resultante al igual que el resultado de la mezcla (S-3%CAL-7%CCA) (Gráfica 3.31) donde se puede observar que ya con este último % se logra una estabilización con respecto a su capacidad de soporte del suelo ;alcanzando casi el mismo valor que con él % máximo de cal.

En la Gráficas 3.30 y 3.32 se presenta la influencia de la mezcla (S-CAL) y (S-CAL-CCA) en el porcentaje de expansión que tiende a disminuir hasta 0,54 % con 5% de cal y 0,56 con la mezcla (S-3%CAL-7%CCA).

En las gráficas de las planillas de CBR (ver Anexo 3 y Anexo 4) al aumentar la energía de compactación de aplicada a las mezclas (S-CAL) y (S-CAL-CCA), se produce un incremento en la densidad seca y una disminución en la humedad requerida. Estos resultados confirman que cuanto mayor es el nivel de energía entregada al suelo, la densidad seca es mayor y se obtiene para un contenido de agua de compactación más bajo (Balmaceda, 1991).

También es notorio los resultados de CBR obtenidos en la muestra de la zona 1 con relación a la muestra de la zona 2 posiblemente debido por la presencia de materia orgánica siendo este constituida por partículas complejas que pueden absorber cationes de calcio o reaccionar con el suelo, impidiendo así la reacción superficial de la CAL y CCA con las partículas de arcilla y la reacción puzolánica.

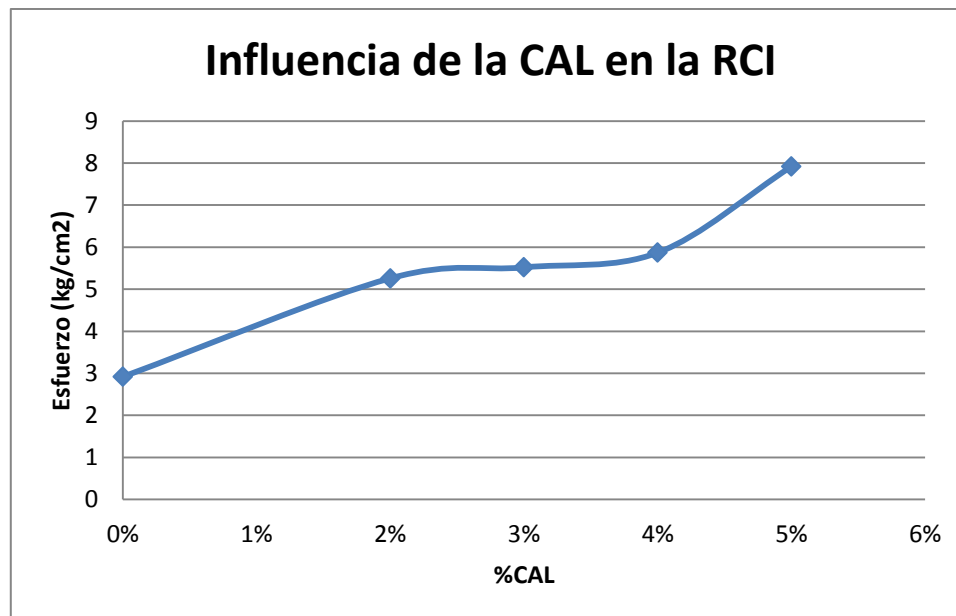
3.7.2.5 Influencia de la mezcla propuesta para la estabilización en los resultados del ensayo de RCI.

Tabla 3.31. Influencia de la mezcla (S-CAL) y (S-CAL-CCA) en relación a la deformación y RCI para la Zona 1

% Estabilizante	Deformación (mm) ΔL	RCI q_u (kg/cm ²)
0%	1,4	2,92
2%CAL	1,6	5,26
3%CAL	2,3	5,52
4%CAL	2,4	5,87
5%CAL	3,2	7,92
3%CAL-3%CCA	2,2	5,55
3%CAL-5%CCA	4,2	5,61
3%CAL-7%CCA	5,2	5,88
3%CAL-10%CCA	6,2	6,77

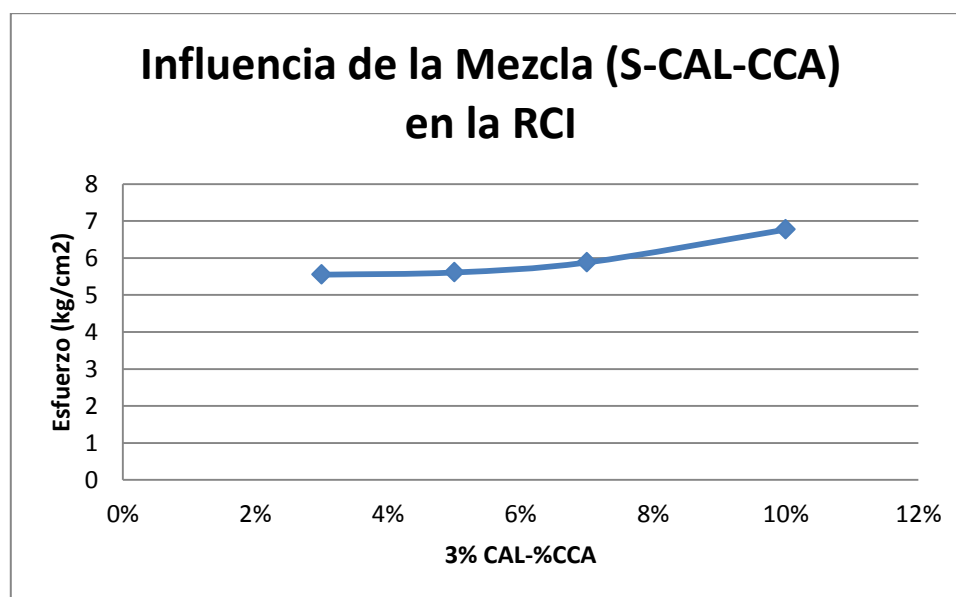
Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.33. Influencia de la mezcla (S-CAL) en la RCI para la Zona 1



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.34. Influencia de la mezcla (S-CAL-CCA) en la RCI para la Zona 1



Fuente: Elaboración Propia

En la Gráfica 3.33 se observa la evolución de la resistencia a la compresión, para especímenes que contenían cal, en primera instancia se observa un ascenso con el 2% de cal igual a $5,26 \text{ kg/cm}^2$ luego este resultado se mantiene casi constante hasta el 4% de cal con un valor de $5,87 \text{ kg/cm}^2$ luego se incrementa a $7,92 \text{ kg/cm}^2$ con 55 de cal añadida.

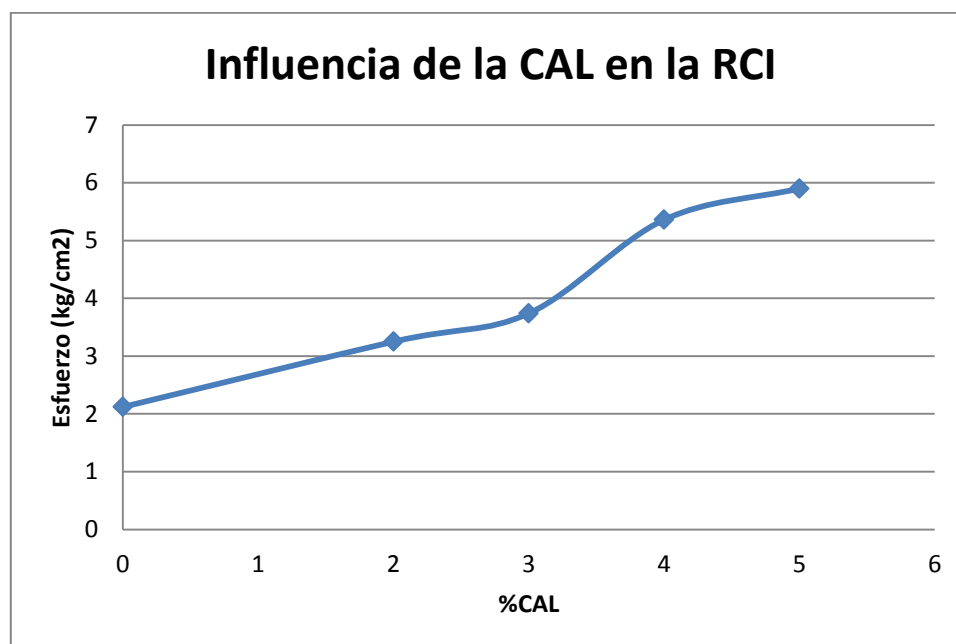
En la Gráfica 3.34 se observa que la resistencia a la compresión, nuevamente tiende a aumentarse de manera muy significativa a medida que se incrementa el contenido de la mezcla (S-CAL-CCA) ; se tienen resistencias de $5,55 \text{ kg/cm}^2$ y $6,77 \text{ kg/cm}^2$, para S-3%CAL-CCA y S-3%CAL-10%CCA respectivamente .

Tabla 3.32. Influencia de la mezcla (S-CAL) y (S-CAL-CCA) en relación a la deformación y RCI para la Zona 2

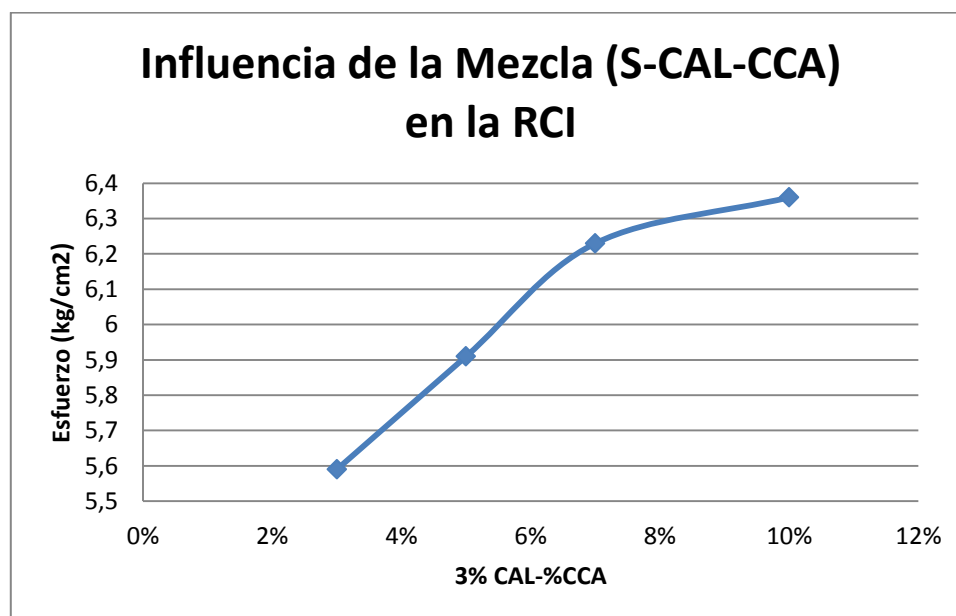
% Estabilizante	Deformación (mm) ΔL	RCI q_u (kg/cm ²)
0%	2,7	2,12
2%CAL	2,7	3,25
3%CAL	2,7	3,74
4%CAL	2,8	5,36
5%CAL	3,2	5,9
3%CAL-3%CCA	1,3	5,59
3%CAL-5%CCA	1,5	5,91
3%CAL-7%CCA	1,6	6,23
3%CAL-10%CCA	2,2	6,36

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.35. Influencia de la mezcla (S-CAL) en la RCI para la Zona 2



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.36. Influencia de la mezcla (S-CAL-CCA) en la RCI para la Zona 2

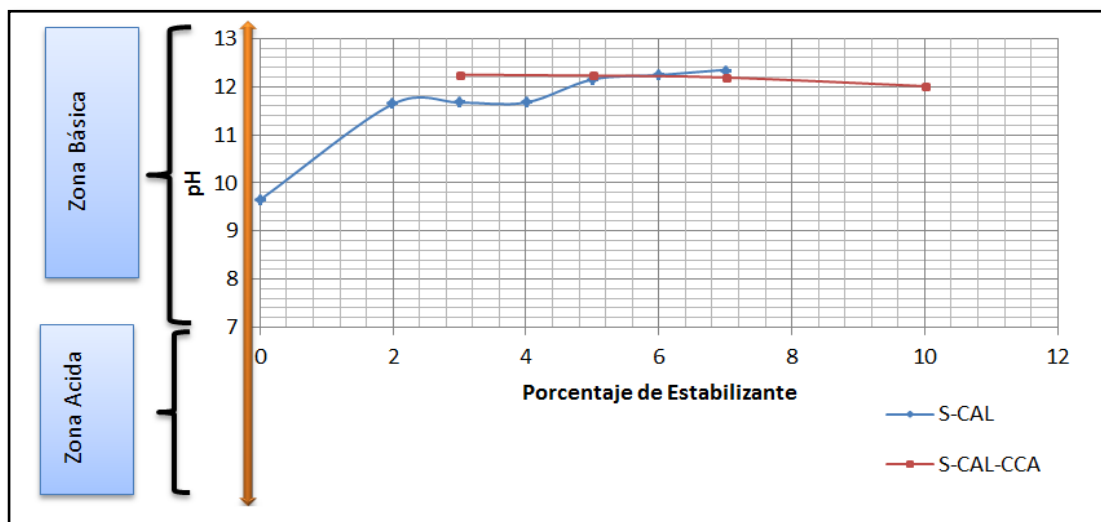
Fuente: Elaboración Propia

En las Gráfica 3.35 y 3.36 se puede observar que la resistencia a compresión incrementa con el contenido de CAL y CCA; así se tiene que el valor para la mezcla (S-5%CAL) es de 5,9 Kg/cm² y para la mezcla (S-3%CAL-10%CCA) llega a 6,36 Kg/cm², lo que representa una mejoría respecto a solo con la mezcla S-CAL.

Comparando los resultados de ambas muestras respecto a la resistencia a la compresión se observa que los valores más altos se registran en el material proveniente del barrio Miraflores.

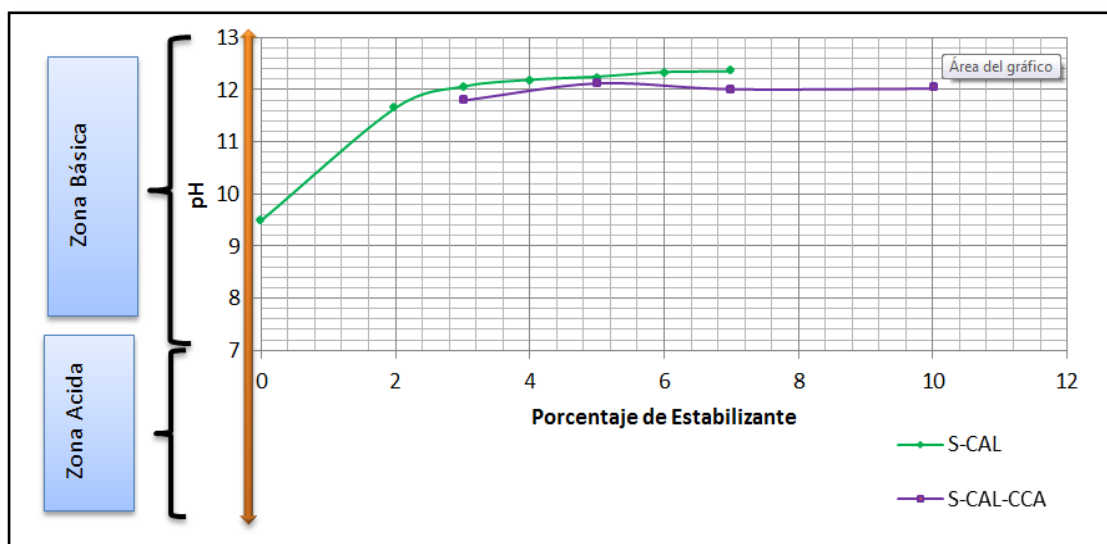
3.7.2.6 Análisis de los resultados del potencial de hidrogeno (pH) en los suelos tratados.

Gráfica 3.37. Resultados de pH en mezclas (S-CAL) y (S-CAL-CCA) para la Zona 1



Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3.38. Resultados de pH en mezclas (S-CAL) y (S-CAL-CCA) para la Zona 2



Fuente: Elaboración Propia

El nivel de pH con 5% de cal alcanzó el nivel de 12,15 para la zona 1 y 12,3 para la zona 2 que significa que el suelo es altamente básico o alcalino pero en relación a la mezcla (S-3%CAL-5%CCA) este nivel de pH con una diferencia significativa alcanzó el mismo valor por tanto se deduce la estabilización de ambos suelos con este último porcentaje.

Conclusiones.-

En función de lo expuesto en los capítulos del presente proyecto de investigación y del análisis de resultado precedente, pueden enunciarse las siguientes conclusiones:

1. El muestreo de campo y la reducción de muestra para cada ensayo en particular, fueron realizados conforme a su norma respectiva.
2. Esta investigación sobre la estabilización con cal y ceniza de cascarilla de arroz, fue realizada en base a información bibliográfica sobre el comportamiento de los suelos y estos agentes estabilizadores cal y materiales puzolanicos, técnica con muy poca divulgación en el departamento de Tarija.
3. Se realizó el análisis químico el cual indico un porcentaje de sílice de 51,2% y 0,19% de alúmina según informe de ensayo del laboratorio de Spectrolab (Ver Anexo 1) lo cual por el procedimiento de incineración no se obtuvieron los resultados esperados pero aun así se consiguió una alta reactividad puzolanica al ser esta mezclada con la cal por otro lado el análisis granulométrico revelo uniformidad con 63% de fino.

Los resultados de los ensayos muestran suelos de baja resistencia a la capacidad de soporte del suelo y a la compresión, además de ser muy plásticos; características propias de los suelos arcillosos.
4. Se realizaron seis ensayos de laboratorio basados en las normas ASTM Y AASHTO a cada una de las muestras de suelo natural. Las dos muestras de suelo aunque poseen características propias diferentes, determinan su aptitud para ser estabilizados. Los índices de plasticidad de los suelos son mayores a 10, poseen un alto porcentaje de finos que pasan el tamiz 200.
5. Se realizaron también seis ensayos a las muestras estabilizadas con hasta un 5% de cal con relación al peso seco del suelo. En teoría, un parámetro importante para determinar los porcentajes adecuados de cal es la determinación del pH de los suelos, sin embargo las dos muestras alcanzaron cambios en su plasticidad y resistencia con el 3% de cal y verificado con los resultados de pH según el nivel recomendado por la norma experimental ASTM D6276 por lo que se define que

este parámetro no es el único determinante para la consideración del porcentaje de cal a utilizar.

A continuación se describen las conclusiones con respecto a la mezcla con cal y ceniza de cascarilla de arroz con diferentes porcentajes:

6. Los ensayos realizados con combinación de cal y ceniza de cascarilla de arroz mostraron cambios bruscos en la plasticidad mostrando resultados nulos al ser las muestras estabilizadas, tomando en cuenta que los valores mínimos en el índice de plasticidad se obtuvieron con el máximo porcentaje de cal.
7. De los ensayos de compactación se pudo observar que las densidades se comportaron de maneras variables pero en general tuvieron disminuciones, mientras que sus porcentajes de humedad óptima fueron en aumento en todos los casos. Este comportamiento se debe a la acción de la cal y la sílice de la cascarilla de arroz que produce una reacción puzolanica sobre los suelos arcillosos, la cual produce floculación de las partículas de arcilla produciendo mayor absorción de agua, razón por la que los porcentajes de humedad aumentan con el incremento en la proporción de la cal.
8. En cuanto a los porcentajes de CBR los resultados fueron variables para las muestras ensayadas, porque para la muestra de la zona 1 éstos aumentaron considerablemente y llegaron a un valor de 82%; en cambio para la muestra de la zona 2 solo alcanzo el 24% con relación al 95% de su densidad máxima.
9. Las resistencias a compresión iconfinada aumentaron favorablemente, por otro lado según el Manual de Carreteras ABC Volumen 4 se pudo calificar las muestras de suelo mediante su consistencia como dura.
10. El método de ensayo utilizado para encontrar el porcentaje óptimo de este agente estabilizador (CAL-CCA), viene dado por los resultados obtenidos de los ensayos realizados y verificados con la medición estándar de pH obteniéndose así una mezcla con S-3%CAL-5%CCA como el porcentaje óptimo para ambos suelos alcanzando diferentes resultados en particular.

Recomendaciones.-

- La aplicación de los ensayos de laboratorio a las muestras de suelos a estabilizar y a las mezclas con la cal y ceniza de cascarilla de arroz, usando de base las mezclas propuestas en la investigación son de gran importancia para corroborar resultados a obtener y confirmar si la proporción que se está utilizando es la adecuada a nuestros requerimientos de no ser así se elegirá otra opción de mezcla la cual se confirmará de la misma forma.
- Con las gráficas obtenidas de los valores de todas las estabilizaciones realizadas a ambas muestras, podemos observar las curvas obtenidas con los diferentes porcentajes los cuales marcan la tendencia de la estabilización mediante una curva sobre la gráfica la cual tiene los valores de (% estabilizante) VRS (% CBR). Con estos datos en las diferentes gráficas podemos interpolar valores si se requiere un número de CBR en específico, este valor se puede encontrar en la gráfica, y así conocer el porcentaje de estabilizante que tenemos que emplear para lograr el valor CBR requerido para un suelo cohesivo similar usando cualquiera de las dos mezclas ya sea “S-CAL” o “S-CAL-CCA” empleadas para las estabilizaciones, estos valores no son exactos pero si aproximados.
- Precedentes a esta investigación, muestran que cuando el suelo presenta una mayor plasticidad y es estabilizado con cal y ceniza de cascarilla de arroz, los resultados obtenidos en sus propiedades son superiores, puesto que se genera una mejor reacción química entre estos, por lo cual se recomienda más estudios de esta técnica de estabilización en nuestro país, donde se involucren distintos suelos con diferentes propiedades plásticas.
- Se recomienda que el material a ser estabilizado con cal y ceniza de cascarilla de arroz, no cuente con más del 1% de materia orgánica; esto porque suelos que contengan cantidades superiores al 1% de materia orgánica pueden requerir porcentajes de cal y ceniza adicionales considerables para obtener resultados más satisfactorios que en este trabajo de investigación realizado.