



**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

***ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD
Y LA GRANULOMETRÍA EN LAS PROPIEDADES DE SUELOS
ESTABILIZADOS CON CEMENTO Y/O CAL***

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

Presentado ante la

UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO

Como parte de los requisitos para optar al título de

INGENIERO CIVIL

REALIZADO POR

Duran Quintero, Eliezer J. G.
Eliezerd73@gmail.com
López Castillo, Emperatriz.
Emperatrizlc28@gmail.com

PROFESOR GUÍA

Ing. Echezuría, Heriberto.

FECHA

Caracas, Junio de 2019



UNIVERSIDAD CATÓLICA ANDRÉS BELLO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD Y LA
GRANULOMETRÍA EN LAS PROPIEDADES DE SUELOS
ESTABILIZADOS CON CEMENTO Y/O CAL**

Este jurado; una vez realizado el examen del presente trabajo, ha evaluado su
contenido con el resultado: *Dieciocho (18)*

PROFESOR GUÍA:

Nombre: *Heriberto Echezuria*

Firma: *[Signature]*

JURADO EXAMINADOR:

Nombre: *Roque GARCIA*

Firma: *[Signature]*

Nombre: *Emperatriz López Castillo*

Firma: *[Signature]*

Realizado por:

Duran Quintero, Eliezer José G.

López Castillo, Emperatriz.

Profesor Guía:

Ing. Echezuria, Heriberto

Caracas, Junio 2019



AGRADECIMIENTOS

Principalmente quiero agradecer a Dios, por ser un guía y permitirme culminar una meta más en mi vida y orientarme en otras.

A mis padres Juan C. Duran y Jannet Quintero, que día a día siguen siendo mis modelos a seguir, sin ellos no habría puesto pruebas en mi vida y no las hubiera logrado, gracias por ser incondicionales en mi vida, ser la cima a la que quiero llegar, no hay mejor ejemplo de vida que ustedes siempre estaré agradecido y orgulloso de ser su hijo. Los Amo.

A mi hermana, que fue y es un apoyo desde el primer día de preescolar hasta hoy, eres un pilar fundamental en mis logros, gracias por ser una amiga, una hermana y una madre, que ninguna medida de distancia nos separe. A mis sobrinas, que tanto amo gracias por apoyarme a su manera y ser parte de esta familia mis logros son de ustedes.

A mi novia que en las buenas y malas siempre estuvo presente, nadie conoce mejor el camino que recorrí que tú, gracias por ser una compañera, amiga, o amante, cuando lo necesite, que sin conocer nada del tema estuviste presente desde el primer día de este viaje hasta el último, no se puede cuantificar cuanto estoy agradecido, pero; Gracias. Te Amo Nena.

A mi abuela Eva María, que hoy no está presente en este mundo terrenal pero donde quiera que estés, sé que estarás orgullosa de que tu niño hoy por hoy ya no es un niño, y está dejando logros por cada paso que da.

Al Ing. Echezuría, Heriberto por aceptar ser nuestro tutor, estar en cada momento para aclarar cualquier duda que se nos presentase, por el apoyo y guiarnos en este corto, pero largo y complicado camino.

Al Ing. Pérez Ayala, Hugo por brindarnos el apoyo necesario con los materiales del Laboratorio de Suelos, y siempre estar presente para encaminarnos durante el trabajo. Al Sr. Villegas, que con su experiencia y conocimiento nos brindó la ayuda necesaria en el proceso.

A la Universidad Católica Andrés Bello, por abrirme sus puertas desde el primer momento que decidí embarcarme en esta carrera, brindarme el conocimiento necesario para emprender nuevos caminos y ser una gran casa de estudio.

A mi compañera de TEG Emperatriz López, por los innumerables momentos que compartimos de estudios y trabajos para alcanzar juntos esta meta, por las incontables peleas, los momentos difíciles, el estrés que esto conllevaba pero que al final nos dio una gran satisfacción.

A mis compañeros de estudios, que conocí a lo largo de este recorrido, con los que compartí buenos y malos momentos. Gracias a todos por formar parte de este proceso.

Eliezer José Gregorio Duran Quintero.

Principalmente quiero agradecer a mi madre Haydee Castillo por todo su apoyo, amor incondicional y sacrificio en el transcurso de esta etapa universitaria y de toda mi vida, a mi padre Oswaldo López (Q.E.P.D) una dedicatoria especial ya que a pesar de no estar presente en el final de esta etapa este logro también es para a él. Gracias infinitas a ambos por apoyarme siempre e inspirarme a cumplir esta meta.

A demás familiares también quiero dar gracias, nuestra familia se caracteriza por estar siempre unida dándonos apoyo. Me complace dedicarles este logro y poder compartirlo con todos ustedes.

A nuestro profesor guía el Ing. Heriberto Echezuría por brindarnos la oportunidad de trabajar uno de sus temas de investigación, gracias por todo su tiempo, atención y dedicación en la realización de este TEG.

A mi compañero de TEG, Eliezer Durán por su disposición y confianza para trabajar juntos, gracias por tanta paciencia y esfuerzo. Ambos sabemos cuánto trabajo nos costó pero juntos pudimos lograrlo.

Al profesor Ing. Hugo Pérez Ayala por permitirnos trabajar en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la UCAB; Gracias por su disposición, asesoría y apoyo a la hora de realizar los ensayos. De igual manera, muchísimas gracias al Sr. Jesús Villegas por su ayuda en el laboratorio.

A demás amigos y compañeros, gracias por la compañía, los momentos de distracción, el apoyo necesario y los consejos compartidos.

Todos han sido parte de este logro y siempre estaré agradecida.

Emperatriz López Castillo.

ÍNDICE

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	I	
ÍNDICE DE TABLAS	IV	
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V	
ÍNDICE DE GRÁFICOS	VI	
SINOPSIS	7	
INTRODUCCIÓN	9	
CAPITULO I.....	EL PROBLEMA	11
I.1	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
I.2	ANTECEDENTES.....	13
I.3	ALCANCES Y LIMITACIONES.....	17
I.4	OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	18
I.4.1	Objetivo General.....	18
I.4.2	Objetivos Específicos	18
CAPITULO II.....	MARCO TEÓRICO	19
II.1	CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN AASHTO.....	19
II.2	PROCESOS DE SEPARACIÓN DEL SUELO	20
II.2.1	Sedimentación.....	20
II.2.2	Decantación	21
II.3	SUELO ESTABILIZADO	21
II.3.1	Tipos de Estabilización	21
II.3.1.1	Estabilización Física	21
II.3.1.2	Estabilización Química.....	21
II.3.1.3	Estabilización Físico-Química.....	22
II.3.2	Suelos Estabilizados en Pavimentos.....	22
II.3.3	Compactación In Situ	23
II.4	MATERIALES ESTABILIZANTES	24
II.5	ESTABILIZACIÓN CON MEZCLA SUELO - CEMENTO	25

II.6	ESTABILIZACIÓN CON MEZCLA SUELO - CAL	25
II.7	HIDRATACIÓN DE LOS MATERIALES ESTABILIZANTES.....	27
II.7.1	Hidratación de la Cal	27
II.7.2	Hidratación del Cemento	28
II.7.3	Relación con la Acidez Relativa (pH)	28
II.8	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL SUELO	29
II.8.1	Gravedad Específica	29
II.8.2	Límites de Consistencia	29
II.8.2.1	Índice de Plasticidad	30
II.8.3	Medida de pH	30
II.9	ENSAYOS PARA CUMPLIR LOS OBJETIVOS PLANTEADOS.....	30
II.9.1	Compresión No Confinada	30
II.9.2	Durabilidad / Disgregabilidad.....	31
II.10	ELABORACIÓN DE BRIQUETAS	31
CAPITULO III.....	MARCO METODOLÓGICO	33
III.1	MATERIALES UTILIZADOS	33
III.2	MUESTRAS EMPLEADAS	33
III.3	MATERIALES CEMENTANTES UTILIZADOS	33
III.4	OBTENCIÓN DEL MATERIAL.....	34
III.5	ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DEL SUELO	34
III.5.1	Granulometría por Tamizado.....	34
III.5.2	Granulometría por Hidrómetro.....	34
III.5.3	Gravedad Específica	35
III.5.4	Límites de Consistencia	35
III.5.5	Medida de pH	35
III.5.6	Procesos de Separación del Suelo.....	35
III.5.6.1	Sedimentación	35

ÍNDICE

III.5.6.2 Decantación.....	36
III.5.7 Elaboración de Briquetas	37
III.5.8 Ensayos para cumplir los Objetivos Planteados.....	38
III.5.8.1 Compresión No Confinada.....	38
III.5.8.2 Disgregabilidad	38
CAPITULO IV.....	DESARROLLO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS 39
IV.1 ENSAYOS DE CARACTERIZACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO.....	39
IV.1.1 Granulometría por Tamizado.....	39
IV.1.2 Granulometría por Hidrómetro.....	41
IV.1.3 Gravedad Específica	42
IV.1.4 Límites de Consistencia	43
IV.1.5 Clasificación de las Muestras Empleadas	44
IV.1.6 Sedimentación.....	44
IV.1.7 Medida de pH	45
IV.2 ENSAYOS PARA CUMPLIR CON LOS OBJETIVOS PLANTEADOS.....	45
IV.2.1 Compresión No Confinada	45
IV.2.2 Disgregabilidad.....	58
CAPITULO V.....	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 61
V.1 CONCLUSIONES	61
V.2 RECOMENDACIONES.....	63
BIBLIOGRAFÍA.....	64
ANEXOS.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación de Suelos según AASHTO.....	19
Tabla 2 Resistencia a la Compresión de Suelos Estabilizados para Pavimentos	23
Tabla 3 Valores Típicos de Gravedad Específica	29
Tabla 4 Granulometría Suelo Limo Arcilloso.....	40
Tabla 5 Granulometría Suelo Arcilloso	40
Tabla 6 Porcentajes Suelo Limo Arcilloso.....	41
Tabla 7 Porcentajes Suelo Arcilloso	41
Tabla 8 Gravedades Específicas	43
Tabla 9 Límite Líquido y Limite Plástico Suelo Limo Arcilloso	44
Tabla 10 Límite Líquido y Limite Plástico Suelo Arcilloso	44
Tabla 11 Medida de pH.....	45

ÍNDICE

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Disgregabilidad Briqueta Suelo Natural	58
Ilustración 2 Disgregabilidad Briqueta Suelo Estabilizado	59
Ilustración 3 Disgregabilidad Briquetas Suelo Arcilloso Estabilizada	60
Ilustración 4 Disgregabilidad Briquetas Suelo Limo Arcilloso Estabilizado	60

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Evolución de la Resistencia de Suelos Tratados con Cal.....	27
Gráfico 2 Curvas Granulométricas.....	40
Gráfico 3 Granulometría por Hidrómetro.....	41
Gráfico 4 Curva Granulométrica Completa	42
Gráfico 5 Relación de Edades Suelo Limo Arcilloso con Cemento (4")	46
Gráfico 6 Relación de Edades Suelo Limo Arcilloso con Cemento (2")	47
Gráfico 7 Relación de Edades Suelo Limo Arcilloso con Cal (4")	48
Gráfico 8 Relación de Edades Suelo Limo Arcilloso con Cal (2")	49
Gráfico 9 Relación de Edades Suelo Limo Arcilloso con Cemento-Cal 1:1	50
Gráfico 10 Relación de Edades Suelo Limo Arcilloso con Cemento-Cal 1:2	51
Gráfico 11 Relación de Edades Suelo Limo Arcilloso con Cemento-Cal 2:1	51
Gráfico 12 Esfuerzo vs. Porcentaje de Cementante Suelo Limo Arcilloso	52
Gráfico 13 Comparación Muestras Estabilizadas con Cemento	53
Gráfico 14 Comparación Muestras Estabilizadas con Cal	54
Gráfico 15 Comportamiento Suelo Arcilloso Estabilizado con Cemento-Cal	55
Gráfico 16 Comparación de los Estabilizantes Suelo Limo Arcilloso	56
Gráfico 17 Comparación de los Estabilizantes Suelo Arcilloso	56
Gráfico 18 Comparación de los Estabilizantes Muestras Arcillosas.....	57

ANÁLISIS DE LA INCIDENCIA DEL ÍNDICE DE PLASTICIDAD Y LA GRANULOMETRÍA EN LAS PROPIEDADES DE SUELOS ESTABILIZADOS CON CEMENTO Y/O CAL

Trabajo Especial de Grado

Autores:

Br. Duran, Eliezer

Br. López, Emperatriz

Tutor:

Ing. Echezuría, Heriberto

SINOPSIS

El suelo estabilizado es un proceso donde al suelo en su estado natural se incorpora algún estabilizante con el fin de mejorar las propiedades mecánicas e hidráulicas del mismo.

Según Rico y Del Castillo (2005) consideran que los suelos limosos-arcillosos, deben ser trabajados con un porcentaje de cal hidratada entre los 2% y 4%. Y el cemento valores de 6% y 8%, ambos valores con respecto al peso de la muestra de suelo.

El profesor Heriberto Echezuría (2019) considera suelos aptos para mezclas de suelo-cemento aquellos cuyo consumos de cemento en peso se encuentran entre 5% y 12% con respecto al peso del suelo.

Es favorable decir que suelos estabilizados con cemento requieren menores porcentajes cuando la presencia de arcilla en los suelos es baja, en presencia de humedad su resistencia aumenta. Para los suelos estabilizados con cal se necesita que el suelo tenga $IP > 10$ para que reaccione adecuadamente, en general las arenas no son recomendables para estabilizar con cal, por ello se recomiendan arcillas.

SINOPSIS

Punto importante es que el suelo-cemento adquiere su resistencia rápidamente, ya que solo se necesita que el cemento se hidrate adecuadamente. En cambio el suelo-cal, necesita la reacción química de los iones calcio y las arcillas, que lentamente adquieren resistencia.

Se requieren suelos estabilizados para uso de pavimentos rígidos en tránsito ligeros, valores mínimos de 35kgf/cm² en bases, y 14kgf/cm² en sub-bases y subrasantes mejoradas.

Por ello, se plantea evaluar diversos suelos con sus respectivos índices de plasticidad para ver el comportamiento de los mismos con la incorporación de los estabilizantes y ver cuál es el que mejor se adhiere a las propiedades de los suelos evaluados en el presente trabajo de grado, evaluando su resistencia en función del tiempo, la estabilidad, y disgregabilidad, este último se observará por la presencia de agua.

INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo de Grado tiene como finalidad analizar la incidencia del índice de plasticidad y la granulometría en suelos estabilizados con cemento y/o cal. Para fines prácticos el siguiente trabajo se encuentra estructurado de la siguiente manera:

CAPITULO I. EL PROBLEMA: En este capítulo se especifica el planteamiento del problema con su respectivo razonamiento, se hacen las referencias correspondientes a las investigaciones tomadas como antecedentes, se incluyen los alcances, limitaciones, el objetivo general y los objetivos específicos que se desean alcanzar.

CAPITULO II. MARCO TEORICO: Se exponen los argumentos teóricos del suelo, los tipos de suelo según la AASHTO y la SUCS, hasta los ensayos que se realizaron y todo lo relacionado al mismo.

CAPITULO III. MARCO METODOLOGICO: En él se especifican los procedimientos e instrumentos que se emplearon en los distintos ensayos que se realizaron en el presente trabajo con el fin de cumplir los objetivos.

Para fines del trabajo se realizarán ensayos de los Límites de Atterberg, Granulometría, Compresión No Confinada y Disgregabilidad, entre otros. El ensayo de granulometría por tamizado se realizará al suelo para saber cuál es la clasificación del mismo por la AASHTO y la SUCS, esta prueba se realiza para la fracción media y fina del suelo, es decir, pasante tamiz #4 y retenido tamiz #200 correspondiente a la fracción media, y el pasante tamiz 200# a la fracción fina que corresponde a los limos, arcillas y coloides.

Se va a trabajar con una muestra de suelo arcillosa, ya que los límites de Atterberg para suelos arcillosos son considerablemente altos y se desea saber cómo es la reacción de las arcillas en presencia de agua cuando se

INTRODUCCIÓN

incorpora algún estabilizante. Además con el análisis granulométrico por hidrómetro se busca conocer la gradación exacta de las partículas de arcillas y a su vez el porcentaje tanto de limos y arcillas.

En base a la granulometría original del suelo, la misma se modificará para obtener las variaciones de la muestra arcillosa y ver cómo se comportan en presencia de estabilizantes sin variar los porcentajes con respecto a las diferentes muestras suelos.

Los ensayos relacionados a los Límites de Atterberg se basaran en el método de Casagrande para el límite líquido y su respectivo ensayo para el límite plástico. Con el cual se quiere conocer el índice de plasticidad y en base a ello trabajar el suelo con los estabilizantes (Cemento y/o Cal), en el límite que mejor se adapte a las condiciones de pavimento rígido.

La compresión no confinada se evaluaría en briquetas previamente elaboradas con los suelos y los estabilizantes en distintos porcentajes de los mismos, con el fin de conocer la opción más óptima y factible empleada en pavimentos para un tránsito ligero o moderado. La disgregabilidad se analizará como la durabilidad que tendrían los suelos estabilizados en presencia de cantidades altas de agua (lluvia), es decir, se observará la estabilidad que adquieren los suelos al incorporar algún estabilizante en presencia de agua.

CAPITULO IV. DESARROLLO Y ANALISIS DE RESULTADOS: Se plantean todos los resultados obtenidos a lo largo del proceso de todos los ensayos realizados con los suelos en estado natural, y además los ensayos realizados con los suelos y la incorporación de los estabilizantes con el fin de conocer la opción más viable.

CAPITULO I. EL PROBLEMA

I.1 Planteamiento del Problema

En la estabilización de suelos en primer lugar se pretende aumentar la resistencia mecánica, consiguiendo una adecuada estabilidad a las cargas y una escasa variación volumétrica. El proceso de estabilización de suelos no solo nos ayuda a la mejora de suelos de mala calidad con problemas de plasticidad y granulometrías finas, si no que se ha extendido a realizar tratamiento con áridos de buena calidad.

Para Heredia la estabilización de suelos (2014) se utiliza para definir los procedimientos para restablecer el equilibrio de taludes naturales o producto de una construcción civil, excavaciones o movimientos de masas, debido a fenómenos naturales o acciones conscientes o inconscientes en labores de ingeniería. (p. 17).

El tratamiento de terrenos arcillosos permite su utilización, evitando los mayores costos y afecciones ambientales que supondría su retirada y posterior re-emplazamiento por otros suelos de mejores características geotécnicas y mecánicas.

Según Heredia el mejoramiento del suelo (2014)

Es toda acción que involucra compactación o densificación, sea estática o dinámica, agregando o no, productos químicos, electroquímicos o material puzolánico (natural o artificial), que permita lograr un mejor desempeño, en lo referente a resistencia

CAPÍTULO I

mecánica y química, propiedades plásticas, reducción o aumento de la permeabilidad entre otros. (p. 17).

Los suelos se pueden estabilizar de dos formas, una de ellas de forma mecánica, mezclando dos o más suelos y gravas de características complementarias, la otra forma es empleando el uso de aditivos, algunos de los más conocidos son la cal, cemento, polímeros, enzimas que actúan de forma física y/o química.

Con el uso del cemento se busca mejorar el suelo de la obra para transformarla es una superficie uniforme impermeable con buena capacidad de soporte y durabilidad.

El cemento es adecuado para tratar tanto los suelos granulares como los de granos finos, salvo que estos sean muy plásticos o se encuentren muy húmedos. En este caso puede ser conveniente un tratamiento previo con cal o su estabilización con cal, ya que la cal nos permite una formación de barreras impermeables que impiden la penetración de aguas de lluvia o el ascenso capilar de aguas subterráneas.

Para estabilizar un suelo, el conglomerante debe ser cemento si el suelo es poco plástico, mientras si es fino y cohesivo debe utilizarse cal, en ocasiones son tratamientos mixtos, uno con cal para restar plasticidad y luego con cemento para dar mayor soporte o alcanzar resistencias.

Con suelos muy finos y arcillosos suele resultar más adecuado realizar un tratamiento mixto cal-cemento; la aplicación de la cal logra reducir la plasticidad y consigue agrupar los finos en granos de mayor diámetro sobre

CAPÍTULO I

los que sí puede actuar el cemento, lográndose obtener una resistencia apreciable. Análogamente se puede emplear este doble tratamiento en suelos muy húmedos, donde la cal actúa secando.

Teniendo en consideración lo antes mencionado se plantea el análisis de la incidencia del índice de plasticidad y la granulometría en las propiedades de suelos estabilizados con cemento y cal para la construcción de pavimentos. Las vías sin pavimentos en zonas rurales se ven considerablemente afectadas en épocas de lluvia y con el suelo estabilizado se desea aumentar la durabilidad y disminuir la frecuencia de reparaciones viales.

Las mezclas del suelo con distintos estabilizantes resultan mezclas homogéneas, compactas y duras, muy resistentes con procedimientos fáciles y rápidos de ejecutar. El proceso de estabilización transforma el suelo en una superficie uniforme, impermeable, con buena capacidad de soporte y alta durabilidad. De esta manera se obtiene un suelo estabilizado aplicable como pavimento de bajo costo que mejora las condiciones de operación comparables a los pavimentos convencionales.

I.2 Antecedentes

➤ Da'SilvaPuesme, Gregory; *Evaluación de la estabilización de base y sub-base del pavimento con suelo cemento*. Nueva Esparta, Venezuela (2006).

Resumen: El presente trabajo de grado tuvo como objetivo determinar las condiciones necesarias que debe presentar un suelo para estabilizar la base y la sub-base de un pavimento, mediante el uso de mezcla Suelo-Cemento. Además de, los beneficios que puede brindar la implementación del método de Estabilización con Suelo-Cemento. Las características granulométricas de

CAPÍTULO I

un suelo son elementos determinantes que pueden originar una falla de carácter estructural en un pavimento. Esta se presenta cuando los materiales que conforman su estructura interna, al ser sometida a repeticiones de carga por acción del tránsito, sufren un agrietamiento estructural, relacionado con la deformación o la tensión horizontal por tracción en la base de cada capa; en este sentido la falla relaciona la deformación o la tensión producida con el número de repeticiones admisibles. La incursión de los pavimentos a base de suelo-cemento en la construcción y en la rehabilitación de carreteras venezolanas, se ha presentado en la mayoría de los casos para aeropuertos y zonas rurales, sin tomar en consideración que la implementación de este método puede ser una eficaz alternativa en el diseño de una carretera pavimentada.

➤ Dayselis M, Marquez F; *Comportamiento mecánico y físico de mezclas de lodo-cemento con bajo contenido de materia orgánica para su uso como material de construcción*. Caracas, Venezuela (2009).

Resumen: En este trabajo se elaboraron y ensayaron mezclas de lodo-cemento con bajo contenido de materia orgánica y así describir el comportamiento de las mezclas para fines de construcción. Estas mezclas de lodo-cemento se han planteado en busca de soluciones para reutilizar el lodo proveniente del proceso de potabilización. Se seleccionaron 10 muestras de lodo provenientes de los sedimentadores de plantas de potabilización cuyas fuentes de abastecimiento fueran principalmente ríos, a las cuales se le determinó el contenido orgánico mediante tres ensayos: colorimétrico, método de Walkley-Black y el Análisis Termogravimétrico. El lodo proveniente de la Planta de San Felipe resultó ser el que poseía menor

CAPÍTULO I

contenido orgánico. Este lodo fue secado y pulverizado para luego producir mezclas lodo-cemento. Fueron realizados ensayos de resistencia a la compresión, tracción indirecta, absorción y erosión para su caracterización mecánica y ensayos de granulometría, peso específico y peso unitario compacto para su caracterización física. Se realizaron tres mezclas, lodo-cemento (M1-LC), lodo-cemento y piedra (M2-LCP) y lodo-cemento y suelo (M3-LCS), siendo esta última (M3-LCS) la que obtuvo el mejor comportamiento de las tres mezclas estudiadas con una resistencia a la compresión a los 28 días de 5,73 kgf/cm², de donde se deduce que la adición de suelo le confiere al lodo-cemento mayor resistencia y durabilidad. Este lodo-cemento suelo (M3-LCS) es posible compararlo con otros materiales de construcción, confiriéndole a este nuevo material factibilidad para su uso en el campo de la construcción con fines no estructurales, tomando en cuenta las dificultades en su manejo (recolección, traslado, secado y pulverizado).

➤ Gonzalo Brazzini S.; *Suelos Estabilizados, una buena alternativa para la conservación de caminos no pavimentados*. Lima, Perú. (2011).

Resumen: El objetivo de esta presentación es ofrecer una alternativa de solución para la conservación de nuestra red vial, específicamente de los caminos a nivel de afirmado. Nuestra realidad vial es que por falta de un mantenimiento oportuno la vida de los caminos parece estar sometida a un ciclo inexorable de construcción - conservación insuficiente o inexistente - degradación - destrucción -reconstrucción y así sucesivamente. Es sabido que el mantenimiento de caminos a nivel de afirmado son los que generan mayores costos, estos caminos generalmente se deterioran al poco tiempo después de su mantenimiento, lo cual se traduce en una pesadilla para el usuario y una inversión constante para las entidades encargadas del

CAPÍTULO I

mantenimiento. Dos causas dan origen a la situación actual: La primera es la falta crónica de financiamiento y la segunda la escasa eficacia y eficiencia de los organismos encargados del mantenimiento de los caminos, especialmente aquellos a nivel de afirmado que tienen pocas posibilidades de ser pavimentados.

➤ Rocío del Carmen Pérez C.; *Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como sub-rasante mejorada y/o sub-base de pavimentos*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú. (2012).

Resumen: Esta investigación estudia el efecto que produce la adición de cenizas volantes de carbón en un suelo arcilloso, con el fin de evaluar en sus obras de pavimentación. La ceniza volante es un residuo que proviene de la planta termoeléctrica ubicada en Ilo, Moquegua. La disposición de éste, genera un problema ambiental. Se realizaron ensayos de laboratorio para caracterizar la ceniza volante, las mezclas suelo- ceniza volante y suelo - ceniza volante - cemento para evaluar su comportamiento geotécnico. Se comprueba que la mezcla de ceniza volante con el suelo arcilloso en estudio, como también la adición de cemento, presenta un mejor comportamiento que el suelo puro para su empleo como capa de sub-base y sub-rasante mejorada de pavimentos. Se examinó factores como; tiempo de curado, tiempo de compactación, contenido de agua y otros factores que influyen en el comportamiento de la mezcla final. Los diseños de estructuras típicas de pavimento rural, tanto con un suelo natural arcilloso y con suelo estabilizado, se relacionaron mediante el método NAASRA (National Association of Australian State Road Authorities). La investigación concluye que existe viabilidad técnica y económica para la construcción de pavimentos

CAPÍTULO I

empleando cenizas volantes de carbón como material estabilizador de suelos.

➤ María A. Sánchez A.; *Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del Cantón Tosagua Provincia de Manabí*. Universidad Católica del Ecuador. Quito, Ecuador. (2014).

Resumen: El trabajo se centra en la investigación del comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas del suelo del sector Calcical del Cantón Tosagua, el cual se caracteriza como un material de tipo CH (S.U.C.S) arcillas de alta plasticidad, con un potencial expansivo alto. El estudio se basa en la adhesión de un agente estabilizador al suelo, tal es el caso de la cal viva y el cemento portland puzololánico; con el fin de analizar la variación en el comportamiento expansivo del suelo. Para realizar el estudio se realizaron ensayos para determinar las propiedades índices del suelo, así como su presión de hinchamiento y el porcentaje de expansión que este presenta, tanto en estado natural como con la presencia de porcentajes de estabilizante de 3,5 y 7%.

I.3 Alcances y Limitaciones

Los alcances y limitaciones en este Trabajo Especial de Grado se basan en:

➤ Análisis de la plasticidad y granulometría del suelo en las propiedades mecánicas e hidráulicas del suelo estabilizado con cemento y cal aplicable para la construcción de pavimentos.

CAPÍTULO I**I.4 Objetivos de la Investigación****I.4.1 Objetivo General**

Analizar la incidencia del índice de plasticidad y la granulometría en las propiedades de suelos estabilizados con cemento y cal para la construcción de pavimentos.

I.4.2 Objetivos Específicos

- Establecer la incidencia de la plasticidad en mezclas con diferentes granulometrías sobre la resistencia a la compresión no confinada de los suelos estabilizados con cemento y/o cal.
- Establecer la incidencia de la plasticidad en mezclas con diferentes granulometrías sobre la disgregabilidad de los suelos estabilizados con cemento y/o cal.

CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

II.1 Clasificación de Suelos según AASHTO

La American Association of State Highway and Transportation Officials adoptó este sistema de clasificación de suelos (AASHTO M 145), en el que “los suelos se agrupan en función de su comportamiento como capa de soporte”. Es el sistema más utilizado en la clasificación de suelos en carreteras.

En esta clasificación los suelos se clasifican en siete grupos (A-1 hasta A-7), según su granulometría y plasticidad. Más concretamente, en función del porcentaje que pasa por los tamices #200, 40 y 10, y de los Límites de Atterberg de la fracción que pasa por el tamiz #40.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos pasa el tamiz #200)							Materiales limoarcillosos (más de 35% pasa el tamiz #200)			
Clasificación de grupo	A-1		A-3 ^A	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7 A-7.5 A-7.6
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Tamizado, % que pasa											
No. 10 (2.00mm)	50 máx.	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 40 (425µm)	30 máx.	50 máx.	51 mín.	...	...	...	...	...	...	...	...
No. 200 (75µm)	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Consistencia											
Límite líquido	...		...	B				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		N.P.	B				10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín. ^B
Tipos de materiales característicos	Cantos, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limoarcillosas				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calificación	Excelente a bueno							Regular a malo			

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

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

Tabla 1 Clasificación de Suelos según AASHTO

Fuente: AASHTO.

CAPÍTULO II

Para Leet y Judson (2000) el suelo es:

Un material superficial natural, que sostiene la vida vegetal. Cada suelo, posee ciertas propiedades que son determinadas por el clima y los organismos vivientes que operan por periodos de tiempo sobre los materiales de la tierra y sobre el paisaje de relieve variable (p.98-99).

II.2 Procesos de Separación del Suelo

II.2.1 Sedimentación

Según Carme Gonzales (2005) la sedimentación “es el proceso mediante el cual se acumulan partículas de tierra o suelo en el fondo de los cuerpos de agua haciendo que disminuya el espacio disponible para el almacenaje de agua en ríos, lagos y quebradas”.

En este proceso se dejan sedimentar por gravedad las partículas y se realiza la separación de las partículas más densas que el agua, y que tengan una velocidad de sedimentación tal que permita que lleguen al fondo del tanque sedimentador en un tiempo determinado.

La teoría de la sedimentación se basa en el hecho de que las partículas grandes en suspensión se asientan más rápidamente que las partículas pequeñas, asumiendo que todas las partículas tienen densidades y formas similares. Si las partículas son aproximadamente esféricas, la relación entre la velocidad de caída (V) y el diámetro de las partículas (D) se da por la Ley de Stokes.

II.2.2 Decantación

La decantación es un proceso que se ocupa de la separación de un sólido o líquido denso de otro fluido que se caracteriza por ser menos denso donde este ocupará la parte de arriba de la mezcla que forman ambos. Es ampliamente usado para separar mezclas de tipo heterogéneas que están conformadas por una sustancia sólida y una líquida o bien por dos sustancias líquidas densas.

II.3 Suelo Estabilizado

Es el proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento (estabilizantes) de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un suelo firme y estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas. Se dice que es la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno, disminuyendo su plasticidad.

II.3.1 Tipos de Estabilización

II.3.1.1 Estabilización Física

Se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos en el mismo. Es de amplio uso pero por si sola no logra conseguir los efectos deseados, es decir, se necesita por lo menos la compactación como complemento.

II.3.1.2 Estabilización Química

Se refiere a la utilización de ciertas sustancias químicas como lo son la cal, el cemento, productos asfálticos, entre otros, cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso.

CAPÍTULO II

II.3.1.3 Estabilización Físico-Química

La misma conlleva la combinación de los métodos estabilizantes tanto físicos como químicos, lo significa que se debe usar la compactadora y simultáneamente incorporar los materiales cementantes que ayuden con el objetivo.

Por otra parte Boris Dorfman (1988) define que “existen cuatro (4) tipo de de estabilizaciones; mecánica es un proceso de compactación, física es la granulometría y/o suelo betún; físico-química corresponde al suelo cal; química siendo el suelo-cemento”. (p. 94).

II.3.2 Suelos Estabilizados en Pavimentos

Está comprobado que los suelos estabilizados sirven de base a firmes de carreteras, ya que en ellos el grado de humedad es muy superior al que correspondería a las condiciones climáticas, incluso en años realmente secos, lo que hizo sospechar que en climas templados, bajo los firmes de carreteras, los suelos mantienen un estado de equilibrio de humedad que puede llegar a las proximidades del límite plástico.

Como principio general cabe establecer que la estabilidad de un suelo crece con la densidad, pero que esta densidad, que en definitiva es disminución de volumen de poros, alcanza, en el caso de las arcillas muy plásticas, un límite relativamente bajo debido a que las partículas de aire ocluido actúan como neumáticos y contrarrestan, con su elasticidad, el efecto mecánico de los compactadores.

Cuando la arcilla no es muy plástica, un exceso de energía de compactación puede romper los constituyentes secundarios formados por aglutinación de las partículas elementales, y este cambio de estructura puede originar descensos en la capacidad resistente del suelo. Debe aceptarse, igualmente, como principio aplicable a cualquier estabilización por compactación, que los resultados que no son aceptables en determinado clima pueden, no obstante, ser suficientes si las condiciones ambientales son distintas.

USO	Pavimento Flexible	Pavimento Rígido
Base	50 Kg/cm ²	35 Kg/cm ²
Subbase o Subrasante Mejorada	17,5 Kg/cm ²	14 Kg/cm ²

Tabla 2 Resistencia a la Compresión de Suelos Estabilizados para Pavimentos

Fuente: Soil Stabilization for Pavements - US ARMY.

II.3.3 Compactación In Situ

La compactación es el procedimiento de aplicar energía al suelo suelto para eliminar espacios vacíos, aumentando así su densidad y en consecuencia, su capacidad de soporte y estabilidad entre otras propiedades. Su objetivo es el mejoramiento de las propiedades de ingeniería del suelo.

Los suelos más aptos para la compactación son aquellos que tienen una cierta cohesión y no son demasiado plásticos; pero, una vez logrado un cierto grado de densificación, la estabilidad del conjunto depende de la propia estabilidad de los componentes de la arcilla y del equilibrio de humedad en el interior del macizo, ambos muy ligados entre sí y relacionados también al nivel freático y al régimen de lluvias.

CAPÍTULO II

II.4 Materiales Estabilizantes

Según Winterkorn y Pamukcu citado por Fang (1991) los agentes estabilizantes del suelo caen dentro de dos categorías:

Activos y no activos o inertes; es activo, cuando reacciona químicamente con los componentes del suelo u otros adictivos, dentro de esta categoría esta el cemento, la cal, las cenizas volantes, los electroquímicos, entre otros; y es no activo o inerte, cuando no reacciona con las partículas del suelo, solo interactúan como aglomerante o cementante, es el caso de los ligantes asfálticos, emulsiones y otros derivados.

Son compuestos químicos empleados para aumentar o mantener las propiedades físicas y la estabilidad de una masa de terreno que no posee las características deseadas para una construcción particular. Cada estabilizador puede cumplir uno (o a lo sumo dos) de las siguientes funciones:

- Incrementa la resistencia a la comprensión y al impacto de la construcción de tierra, y también reduce su tendencia a la dilatación o contracción, aglomerando las partículas de suelo unas a otras.
- Reduce o elimina completamente la absorción de agua (que causa dilataciones, contracciones y erosión) sellando todos los vacíos y poros, y cubriendo las partículas de arcilla con una película impermeable.
- Reduce el agrietamiento dándole flexibilidad la cual permite que el suelo se expanda o contraiga en algún grado.

II.5 Estabilización con Mezcla Suelo - Cemento

La estabilización de suelo con cemento, es la más utilizada en el mundo. Es muy sencilla de realizar y no se necesita equipo especial de construcción. El suelo-cemento consiste en mezclar suelo con cemento, y compactarlo en su contenido óptimo de humedad. Se le usa principalmente como base en los pavimentos de carreteras.

La función del cemento es aglutinar el material y convertirlo en una masa endurecida de carácter estable. El agua hidrata el cemento y ayuda a obtener la máxima densidad lubricando los granos y partículas de suelo. Una vez que el suelo y el cemento han sido mezclados y compactado, inicia la acción del cemento la cual provoca el endurecimiento de la masa.

Esta estabilización no es tan sensible a la humedad como la hecha con asfalto. Pueden usarse todos los suelos para efectuarla, excepto los altamente orgánicos, aunque los más convenientes son los granulares, de fácil disgregado. Los limos, las arenas limosas y arcillas, todas las gravas y las arenas, son agregados adecuados para producir la mezcla suelo-cemento.

La cantidad de cemento necesaria varía con el tipo de suelo, siendo menor si el suelo es poco arcilloso. El criterio de diseño de las mezclas suelo-cemento es para obtener un material de mayor resistencia. No sólo se debe pensar en disminuir plasticidad.

II.6 Estabilización con Mezcla Suelo - Cal

El uso de cal para mejorar suelos con plasticidad, aparte de conseguir ese fin, aumenta también su resistencia a la compresión en función del tiempo. La cantidad de cal varía en función de la necesidad que se tenga y de las propiedades del suelo utilizado en la estabilización. Generalmente los

CAPÍTULO II

porcentajes de cal utilizados en una estabilización variaran de un 2 a 8% en peso.

Para que la cal reaccione adecuadamente se necesita que el suelo presente plasticidad ($IP > 10$), y se pueda lograr así la acción puzolánica, que aglomerará adecuadamente las partículas del suelo.

El suelo - cemento adquiere su resistencia rápidamente, ya que solo se necesita que el cemento se hidrate adecuadamente. En cambio el suelo-cal, necesita la reacción química de los iones calcio y los minerales arcillosos, que lentamente adquieren resistencia. Una ventaja del suelo - cal es que su periodo de curado puede iniciarse más tarde, en cambio, el suelo-cemento requiere curado inmediato.

Por lo general, las arenas no reaccionan favorablemente con la cal y no pueden estabilizarse con ella. El éxito de la estabilización con cal, no solo para disminuir plasticidad, sino para adquirir resistencia, es el tipo de suelo o el tipo de mineral arcilloso que contenga. El criterio para diseñar en el laboratorio las mezclas suelo-cal, depende del papel que vaya a desempeñar la cal, si es como modificador de plasticidad o humedad, o como proporcionador de resistencia.

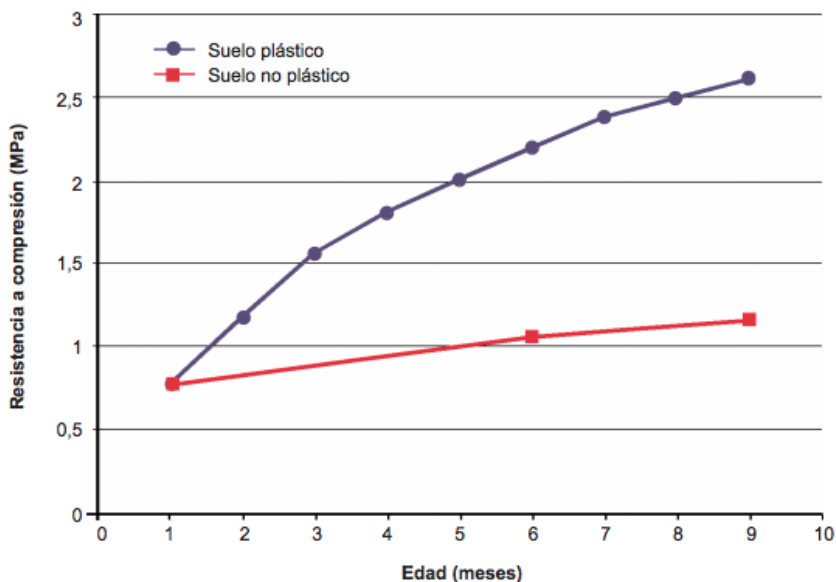


Gráfico 1 Evolución de la Resistencia de Suelos Tratados con Cal

Fuente: Manual para la Estabilización de Suelos con Cemento y Cal (ANCADE-
anter- IECA).

II.7 Hidratación de los Materiales Estabilizantes

Según Heredia (2014) la hidratación “es la reacción que se produce cuando los iones del agua (H^+ y OH^-) actúan sobre una red cristalina y ocupan los espacios de intercambio disponibles de los materiales”. (p. 40).

II.7.1 Hidratación de la Cal

La cal viva debe ser capaz de combinarse con el agua, para transformarse de óxido a hidróxido y una vez apagada (hidratada), se aplique en la construcción. El proceso de adición de agua al óxido de calcio para producir hidróxido de calcio se conoce como hidratación de la cal viva. El proceso de hidratación de la cal es un proceso de tipo exotérmico, y que genera una gran cantidad de calor.

CAPÍTULO II

Las reacciones químicas del proceso de hidratación de la cal son las siguientes:

- Cal viva (CaO): $\text{CaCO}_3 + \text{Calor} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
- Cal apagada (Ca(OH)₂): $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + \text{Calor}$

II.7.2 Hidratación del Cemento

La hidratación del cemento es el proceso mediante el cual este material, al mezclarse con el agua, reacciona y empieza a generar enlaces o estructuras cristalinas, que lo convierten en un material aglutinante. Los componentes principales del Clinker se pulverizan conjuntamente con el yeso y otras adiciones que le proporcionan características particulares en cuanto a su color, fraguado y progreso en las resistencias a la compresión. Cada uno de los constituyentes tiene diferentes comportamientos en cuanto a generación de calor de hidratación, fraguado y su reacción ante la presencia de agua.

II.7.3 Relación con la Acidez Relativa (pH)

Para Soren Sorensen (1909) “el pH es una medida de acidez o alcalinidad de un suelo, determinada a partir de un estrato o solución del mismo, utilizando instrumentos digitales”. (p. 47).

Se ha demostrado que la capacidad de intercambio catiónico se relaciona con la acidez relativa (pH) del agua contenida en el suelo. Si la solución es ácida ($\text{pH} < 7$) se forman zona cargadas positivamente por la absorción de iones de hidrogeno en los bordes de las láminas octaédricas, resultando en

una reducción de la capacidad de intercambio catiónico y transformando al mineral en bipolar, las caras de las láminas quedan con carga residual negativa por sustituciones isomórficas en el conjunto de láminas y los bordes quedan cargados positivamente.

Si la solución es básica o alcalina ($\text{pH} > 7$) los iones de Hidrogeno (H^+) se disocian de los Hidroxilos ($(\text{OH})^-$) en las láminas octaédricas, resultando en una carga neta negativa en los bordes, la capacidad de intercambio catiónico se incrementa y los bordes se repelen con las caras, resultando en orientaciones y ligas aleatorias entre las partículas.

II.8 Ensayos de Caracterización del Suelo

II.8.1 Gravedad Específica

La Gravedad Específica de una muestra de suelo representa el promedio ponderado de los minerales presentes en el suelo, esta varía entre 2,55 y 2,75 para los componentes más comunes.

GRAVEDAD ESPECIFICA TIPICA	
ARENAS	2,63 - 2,67
LIMOS	2,65 - 2,70
ARCILLAS Y ARCILLA LIMOSA	2,67 - 2,90

Tabla 3 Valores Típicos de Gravedad Específica

Fuente: Guía de Laboratorio de Suelos del Profesor Pérez Ayala.

II.8.2 Límites de Consistencia

Los límites de Atterberg o también llamados límites de plasticidad o límites de consistencia, se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir cuatro estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido cuando está seco. Al

CAPÍTULO II

agregársele agua poco a poco, va pasando sucesivamente a los estados de semisólido, plástico y, finalmente, líquido. Los contenidos de humedad en los puntos de transición de un estado al otro son los denominados límites de Atterberg.

II.8.2.1 Índice de Plasticidad

Se define como la diferencia numérica entre el límite líquido y el límite plástico. Es el campo plástico de un suelo y representa el porcentaje de humedad que debe contener el suelo para conservarse en estado plástico.

Cuando el límite líquido o el límite plástico no se pueden determinar, o cuando el límite plástico resulta igual o mayor que el límite líquido, el índice de plasticidad se informará con la abreviatura NP (No Plástico).

II.8.3 Medida de pH

Es la graduación de pH cuando el suelo se pone en una solución líquida. Así, un suelo será ácido cuando su pH esté por debajo de 7 y será básico cuando esté por encima de 7. A medida que el pH se va separando de la neutralidad el suelo es más fuertemente ácido o más fuertemente básico.

II.9 Ensayos para cumplir los Objetivos Planteados

II.9.1 Compresión No Confinada

Este ensayo también conocido como ensayo de compresión simple tiene por finalidad determinar la resistencia a la compresión no confinada de una probeta cilíndrica de suelo, de manera de poder obtener de forma indirecta la

resistencia al corte de la muestra. Para lo anterior se somete una muestra de suelo a un esfuerzo vertical con la deformación controlada, y se mide la máxima carga que resiste.

La resistencia a la compresión, es uno de los parámetros primordiales de análisis en la estructura de un pavimento, el cual se determina mediante la realización de probetas cilíndricas elaboradas con una energía de compactación determinada según sea la especificada y su respectiva humedad óptima.

II.9.2 Durabilidad / Disgregabilidad

Son aquellos factores que se refieren a la resistencia al intemperismo, a la erosión o a la abrasión del tráfico, de esta manera, los problemas de probabilidad en las vías terrestre suelen estar muy asociados a suelos situados relativamente cerca de la superficie de rodamiento.

Se basan en el procedimiento a seguir para determinar la resistencia a la desintegración del suelo expuesto a cambios climatológicos por medidas de tiempo, con el fin de demostrar el aporte o estabilidad que obtiene el suelo mediante el uso de estabilizantes o en caso contrario la inestabilidad del mismo sin los estabilizantes. Nos provee la información necesaria para establecer la resistencia de la muestra sujeta a cambios climáticos.

II.10 Elaboración de Briquetas

Se utilizaron como referencia las normas del equipo Harvard Miniatura. La compactación en el equipo Harvard Miniatura se realiza aplicando presión a la muestra mediante un vástago compactador, el mismo está calibrado para transmitir por la punta del vástago 20 o 40 libras por cada aplicación.

CAPÍTULO II

El número de capas y aplicaciones por capa queda a criterio del usuario, dependiendo de la densidad o peso unitario seco que se desee alcanzar en el molde cilíndrico. Para el caso de este Trabajo Especial de Grado se utilizaron de 4 capas en cada briqueta, escarificando cada una de ellas para una mayor cohesión de las mismas y aplicando posteriormente 25 golpes por capa con el vástago compactador.

CAPITULO III. MARCO METODOLÓGICO

III.1 Materiales Utilizados

- Suelo Original: Material obtenido directamente del sitio de la obra.
- Limos y Arcillas: Material pasante del tamiz #200.
- Arcilla pura: Material obtenido mediante decantación, a partir del material pasante del tamiz #200.

III.2 Muestras Empleadas

- Muestra 1: Suelo Limo arcilloso.

Para fines de la muestra, se consideró como suelo limo arcilloso el material pasante por el tamiz #4 ya que no se deseaba trabajar con material grueso.

- Muestra 2: Suelo Arcilloso.

Establecida a partir de una modificación del suelo limo arcilloso con el fin de crear una muestra con mayor contenido de arcilla. Esta muestra se creó agregando 25% de arcilla pura a la muestra 1, es decir, se mezcló 75% de suelo limo arcilloso y 25% de arcilla pura.

III.3 Materiales Cementantes Utilizados

- Cemento: Cemento Portland Gris Ordinario utilizado en la construcción.
- Cal: Cal comercial utilizada en la construcción, obtenida de la ferretería.

CAPÍTULO III

III.4 Obtención del Material

El suelo utilizado para la realización de todos los ensayos fue obtenido directamente del sitio de una obra de Ingeniería Civil, en la localidad de Colinas de Valle Arriba en Caracas, Venezuela. El material necesario fue transportado personalmente en varios sacos desde la obra hasta el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad.

III.5 Ensayos de Caracterización del Suelo

III.5.1 Granulometría por Tamizado

Este ensayo fue ejecutado de acuerdo al procedimiento al procedimiento establecido en la guía de Laboratorio de Mecánica de Suelos del Profesor Ing. Hugo Pérez Ayala, además de también cumplir con lo establecido en la norma ASTM D 422. El ensayo fue realizado para la muestra de suelo limo arcilloso.

III.5.2 Granulometría por Hidrómetro

Este ensayo fue ejecutado de acuerdo al procedimiento al procedimiento establecido en la guía de Laboratorio de Mecánica de Suelos del Profesor Ing. Hugo Pérez Ayala, además de también cumplir con lo establecido en la norma ASTM D 422. El ensayo fue realizado para la muestra de suelo limo arcilloso.

III.5.3 Gravedad Específica

Este ensayo fue ejecutado de acuerdo a lo establecido en la guía de Laboratorio de Mecánica de Suelos del Profesor Ing. Hugo Pérez Ayala, además de también cumplir con el procedimiento establecido en la norma ASTM D 854. El ensayo fue realizado para la muestra de suelo limo arcilloso, la muestra de suelo arcilloso y los materiales por separado (arenas, limos y arcillas).

III.5.4 Límites de Consistencia

Los ensayos de límites fueron ejecutados de acuerdo al procedimiento establecido en la guía de Laboratorio de Mecánica de Suelos del Profesor Ing. Hugo Pérez Ayala, además de también cumplir con lo establecido en la norma ASTM D 4318. Los ensayos fueron realizados para la muestra de suelo limo arcilloso y la muestra de suelo arcilloso.

III.5.5 Medida de pH

Este ensayo fue ejecutado de acuerdo a un procedimiento establecido en el Laboratorio de Química por la Profesora Antonietta Melone, además de también cumplir con lo establecido en la norma ASTM D 4972 y D 4976. El ensayo fue realizado para la muestra de suelo limo arcilloso y para los materiales cementantes.

III.5.6 Procesos de Separación del Suelo

III.5.6.1 Sedimentación

Este ensayo fue ejecutado de acuerdo al procedimiento establecido en la guía de Laboratorio de Mecánica de Suelos del Profesor Ing. Hugo Pérez Ayala. El ensayo fue realizado para la muestra de suelo limo arcilloso y

CAPÍTULO III

basándose en la aplicación de la Ley de Stokes para la estimación de los tiempos de sedimentación.

Los tiempos de sedimentación en los que se basa este ensayo fueron tomados como referencia al momento de realizar el ensayo de decantación.

III.5.6.2 Decantación

Este ensayo fue realizado para la muestra de suelo limo arcilloso tomando como referencia los tiempos de sedimentación en los que se basa el ensayo descrito anteriormente. El ensayo de decantación fue ejecutado con el fin de lograr separar los materiales más finos (Limos y Arcillas) a mayor escala que la sedimentación, siguiendo un procedimiento establecido en el laboratorio.

Procedimiento:

- Se colocó la muestra de suelo en una tolva, mezclándola con gran cantidad de agua y dejándola reposar por 5 minutos aproximadamente. De esta manera se logra decantar el material más grueso y las arenas medias; en este momento el material que queda en el agua serían las partículas de arena fina, el limo y la arcilla.
- Se traspasó el material que queda en el agua de la tolva #1 a la tolva #2 y se dejó reposar por 2 horas aproximadamente. De esta manera se busca que sedimenten las partículas de arena fina y quede en el agua el material más fino como lo son los limos y las arcillas.
- Se traspasó el material que queda en el agua de la tolva #2 a la tolva #3 y se dejó reposar por 4 horas aproximadamente, para que sedimenten las partículas más gruesas dentro de este material fino (Arenas muy finas y Limos Gruesos).

- Se traspasó el material que queda en el agua de la tolva #3 a la tolva #4, y se dejó reposar por 10 horas aproximadamente, para que sedimenten los limos finos; en este momento el material que queda en el agua serían las partículas de arcilla.
- Se traspasó el material que queda en el agua de la tolva #4 a los tobos de plástico y bandejas de aluminio y se dejó reposando por 24 horas aproximadamente, para que sedimenten las partículas de arcilla.
- Todo el material fino obtenido en cada uno de los recipientes fue expuesto al sol por varios días para secarlo.

III.5.7 Elaboración de Briquetas

Este proceso fue ejecutado de acuerdo al procedimiento para la preparación de muestras según el equipo Harvard Miniatura establecido en la guía de Laboratorio de Mecánica de Suelos del Profesor Ing. Hugo Pérez Ayala.

Las briquetas fueron realizadas en moldes (tubos) de PVC de 4" de diámetro y 4,5" de altura, y de 2" de diámetro y 4" de altura.

Este Trabajo Especial de Grado contempla dos tipos de muestras de suelo: Muestra de Suelo Limo arcilloso y Muestra de Suelo Arcilloso. Cada una de ellas evaluadas mediante briquetas de la muestra suelo con material estabilizante. Se establecieron briquetas con dos porcentajes de cemento (3% y 7%), con dos porcentajes de cal (5% y 9%) y a su vez con una combinación de dos porcentajes de Cemento - Cal (4% y 8%) en distintas proporciones: 1:1; 1:2 y 2:1. Se debe tener en cuenta que se realizaron briquetas de 4" de diámetro y 4,5" de altura para la muestra de suelo limo arcilloso y briquetas de 2" de diámetro y 4" de altura para la muestra de suelo arcilloso, ya que luego no se disponía del material suficiente debido a la gran cantidad de suelo que requerían las briquetas más grandes.

CAPÍTULO III

III.5.8 Ensayos para cumplir los Objetivos Planteados

III.5.8.1 Compresión No Confinada

Este ensayo fue ejecutado de acuerdo a lo establecido en la guía de Laboratorio de Mecánica de Suelos del Profesor Ing. Hugo Pérez Ayala, además de también cumplir con el procedimiento establecido en la norma ASTM D 2100, D 2166 y D 5102. El ensayo fue realizado para todas las briquetas de suelo limo arcilloso y las briquetas de suelo arcilloso.

III.5.8.2 Disgregabilidad

Esta prueba se realizó con el fin de evaluar la durabilidad o la resistencia a la desintegración de las muestras de suelo expuestas al agua. Se siguió un procedimiento establecido por el Profesor Ing. Heriberto Echezuría. Esta prueba se realizó a todas las briquetas de suelo limo arcilloso y de suelo arcilloso.

Procedimiento:

- Se llenó un tobo con agua.
- Se sumergieron en el agua cada una de las briquetas.
- Se llevó un monitoreo del comportamiento de las mismas bajo la presencia del agua durante diferentes períodos de tiempo (1h; 3h; 6h; 12h; 24h; 48h; 72h) dependiendo de la desintegración o integridad de las mismas.
- Se evaluó el comportamiento de las briquetas sumergidas en agua en base al aporte o estabilidad que obtiene el suelo mediante el uso de estabilizantes o en caso contrario la inestabilidad del mismo sin los estabilizantes.

CAPITULO IV. DESARROLLO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

IV.1 Ensayos de Caracterización de las Muestras de Suelo

IV.1.1 Granulometría por Tamizado

Principalmente la muestra de suelo limo arcilloso es un material granular, al cual se le hizo un análisis granulométrico con la finalidad de conocer la distribución de las partículas, se obtuvo como resultado la Tabla 4.

La muestra de suelo completa presenta un 52,8% de material pasante por el tamiz #200 (limos y arcillas), por lo tanto se considera que es un material limo-arcilloso, ya que, contiene más de 50% de limos y arcillas; además está compuesto aproximadamente por 47,2 % de arenas entre gruesas, medias y finas.

Para determinar la granulometría de la muestra de suelo arcilloso se partió de la modificación granulométrica de la muestra de suelo limo arcilloso, obteniendo como resultado la Tabla 5, en la que se puede observar que la muestra de suelo arcilloso completa incrementa el porcentaje de material pasante por el tamiz #200 debido a la adición de arcilla.

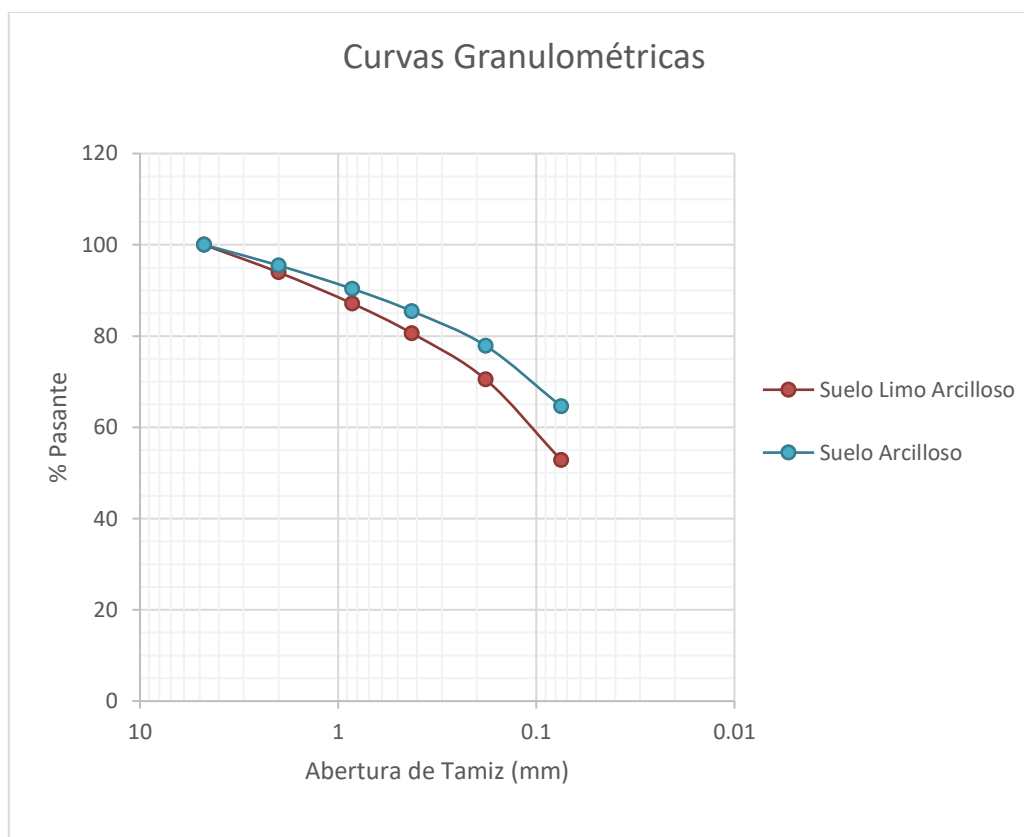
Los resultados obtenidos en las tablas se pueden observar en dos curvas granulométricas representadas en el Gráfico 2. En las curvas granulométricas de las muestras se puede observar que se tiene un material bien gradado, ya que, la muestra presenta porcentajes retenidos en cada tamiz, es decir, presenta variedad de tamaños de partículas.

CAPITULO IV

# TAMIZ	% RETENIDO	% PASANTE
4	0,00	100,00
10	6,03	93,97
20	6,84	87,14
40	6,53	80,61
80	10,13	70,48
200	17,68	52,80

Tabla 4 Granulometría Suelo Limo Arcilloso

# TAMIZ	% RETENIDO	% PASANTE
4	0,00	100,00
10	4,52	95,48
20	5,13	90,35
40	4,89	85,46
80	7,60	77,87
200	13,26	64,6

Tabla 5 Granulometría Suelo Arcilloso**Gráfico 2 Curvas Granulométricas**

IV.1.2 Granulometría por Hidrómetro

Se realizó al material pasante por el tamiz #200 (52,8%) de la muestra de suelo limo arcilloso. A partir del análisis granulométrico por hidrómetro se obtuvieron limos y arcillas de baja a media plasticidad (ML- CL), con un 30,4 % de limo y 22,5% de arcilla de la muestra total. Los resultados obtenidos para cada una de las muestras se pueden observar en las siguientes tablas:

Suelo Limo Arcilloso			
% Gruesos		% Finos	
47,2		52,8	
% Arenas Gruesas	6,0	% Limos	30,4
% Arenas Medias	33,8	% Arcillas	22,5
% Arenas Finas	7,3		

Tabla 6 Porcentajes Suelo Limo Arcilloso

Suelo Arcilloso			
% Gruesos		% Finos	
35,4		64,6	
% Arenas Gruesas	4,5	% Limos	22,8
% Arenas Medias	25,4	% Arcillas	41,8
% Arenas Finas	5,5		

Tabla 7 Porcentajes Suelo Arcilloso

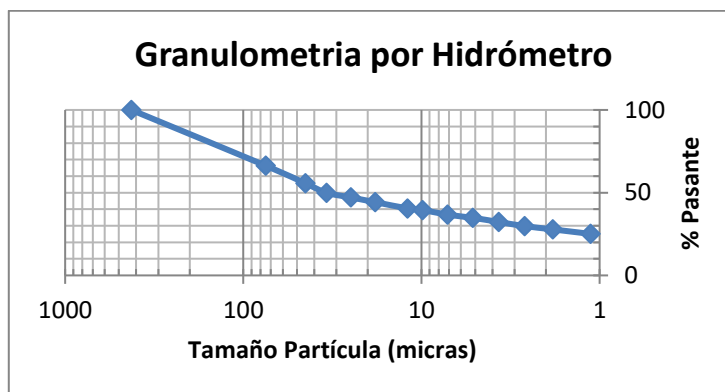


Gráfico 3 Granulometría por Hidrómetro

En el Gráfico 3 se presenta la curva granulométrica obtenida del ensayo de hidrometría y en el Gráfico 4 la granulometría completa de la muestra de

CAPITULO IV

suelo limo arcilloso, uniendo los resultados obtenidos en la granulometría por tamizado y la granulometría por hidrómetro.

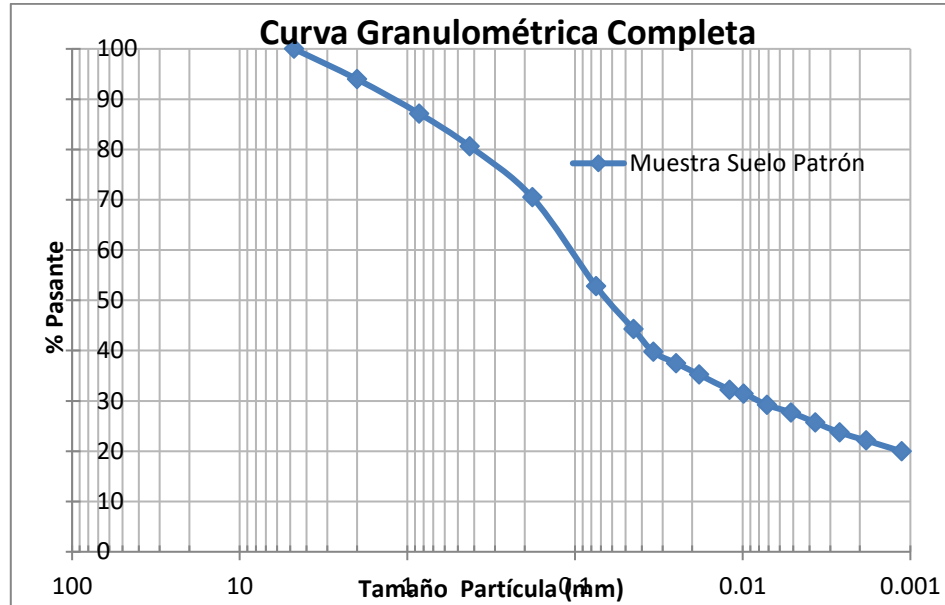


Gráfico 4 Curva Granulométrica Completa

IV.1.3 Gravedad Específica

Se determinó la gravedad específica a la muestra de suelo limo arcilloso, la muestra de suelo arcilloso y a los materiales por separado (arenas, limos y arcillas), con la finalidad de determinar el peso de agua que será el equivalente al volumen de las partículas de una muestra de suelo sin aire, la cual se encuentra en suspensión. De las cuales se puede observar que ambas muestras de suelo se encuentran en el rango de gravedades específicas de los minerales presentes en dichos suelos, este valor debe variar entre 2,55 - 2,75, además se puede observar que dichas muestras poseen una gravedad específica alta en comparación con las arenas esto se debe al alto porcentaje de arcilla que en ellas está presente.

Los materiales por separado arrojan valores que están en el rango de los valores típicos de los mismos, además estos materiales se pueden comparar con materiales como el cuarzo que posee una $G_s = 2,67$, las Illitas con una $G_s = 2,84$ aproximadamente, por lo que suponemos que las Illitas son el tipo de arcillas que se tienen presentes en la muestra. Los resultados obtenidos en cada ensayo de gravedad específica se presentan en el Anexo A.1.1.

Muestra	G_s
Suelo Limo Arcilloso	2,73
Suelo Arcilloso	2,75

Material	G_s
Arenas	2,67
Limos	2,66
Arcilla	2,81

Tabla 8 Gravedades Específicas

IV.1.4 Límites de Consistencia

Una muestra de suelo a la que se le conoce la granulometría y el porcentaje de material plástico y no plástico presente en la misma, si se le añade material no plástico disminuye tanto el límite líquido como el límite plástico dando como resultado un índice de plasticidad más bajo, en caso contrario al agregar material plástico, la muestra de suelo aumenta sus límites y por consiguiente el índice de plasticidad también aumenta.

Partiendo de esta base, las muestras de suelo que se analizaron presentan propiedades referidas a ello. En el caso de la muestra de suelo patrón, se conoce que la cantidad de material plástico (22,5%) y material no plástico (30,4%) dentro de la muestra reportan un $LL=29$ y un $LP=19$ con los que se tiene un $IP=10$.

Para el caso de la muestra de suelo arcilloso, al ser esta una variación del suelo limo arcilloso agregándole más arcilla, se modificaron las cantidades de

CAPITULO IV

material plástico y no plástico presentes en la misma, lo que quiere decir, que al incorporar mayor cantidad de arcilla disminuyen los porcentajes del material no plástico y por ende los límites y el índice de plasticidad en este caso aumentan. Los resultados obtenidos para cada una de las muestras se pueden observar en la Tabla 9 y Tabla 10. En el Anexo A.1.2 se presentaran los resultados de los ensayos.

-	Arenas	Limos	Arcillas
%	47,2	30,4	22,5
-	LL	LP	IP
Resultado	29	19	10

Tabla 9 Límite Líquido y Limite Plástico Suelo Limo Arcilloso

-	Arenas	Limos	Arcillas
%	35,4	22,8	41,8
-	LL	LP	IP
Resultado	36	22	14

Tabla 10 Límite Líquido y Limite Plástico Suelo Arcilloso

IV.1.5 Clasificación de las Muestras Empleadas

De acuerdo a los resultados obtenidos anteriormente de la granulometría y los límites de consistencia se logran clasificar las muestras trabajadas según la AASHTO como A4 para la muestra de suelo limo arcilloso y A6 para la muestra de suelo arcilloso.

IV.1.6 Sedimentación

Los tiempos de sedimentación obtenidos mediante la aplicación de la Ley de Stokes fueron tomados como referencia al momento de realizar el ensayo

de decantación. De este ensayo nos interesaba conocer el tiempo de sedimentación de los limos y las arcillas, para poder realizar el proceso de separación de los materiales. De tal manera, aplicando la Ley de Stokes se determinó que los limos sedimentan en aproximadamente 24 horas.

IV.1.7 Medida de pH

Se conoce que los suelos son ácidos si tienen un contenido bajo de calcio, magnesio, u otros elementos y básicos si tienen contenidos altos de los mismos. Por lo tanto y partiendo de ese concepto, la muestra de suelo limo arcilloso trabajada resultó ser levemente ácida, debido a que su pH es igual a 6, por lo que se puede decir que el contenido de dichos elementos son moderadamente bajos.

Claramente, el cemento y la cal son considerados básicos ya que tienen altos porcentajes de calcio, afirmándolo expresado con anterioridad. Los resultados obtenidos en el ensayo de pH se observan en la Tabla 15.

Muestra	pH
Suelo Patrón	6,0
Agua Chorro	6,5
Agua Destilada	6,9
Cemento	11,1
Cal	11,8

Tabla 11 Medida de pH

IV.2 Ensayos para cumplir con los Objetivos Planteados

IV.2.1 Compresión No Confinada

A continuación se presentan una serie de gráficos Esfuerzo vs. Porcentaje Cementante en los que se expresan los resultados obtenidos de los ensayos de compresión para las distintas muestras de suelo.

CAPITULO IV

En el Gráfico 2 se presenta la variación de la resistencia de la muestra de suelo limo arcilloso estabilizado con cemento en función del tiempo (evaluado a los 7 y 28 días) con los distintos porcentajes de cemento evaluados (3% y 7%). En este gráfico se muestran los resultados de las briquetas de 4" de diámetro.

De igual manera para el Gráfico 3, pero en el mismo se muestran los resultados de las briquetas de 2" de diámetro. Se destaca que los resultados de las briquetas de 2" de diámetro evaluadas a los 28 días fueron obtenidos de otro TEG trabajado en conjunto, ya que en el presente trabajo las briquetas de 2" para esta muestra de suelo solo se pudieron evaluar a los 7 días.

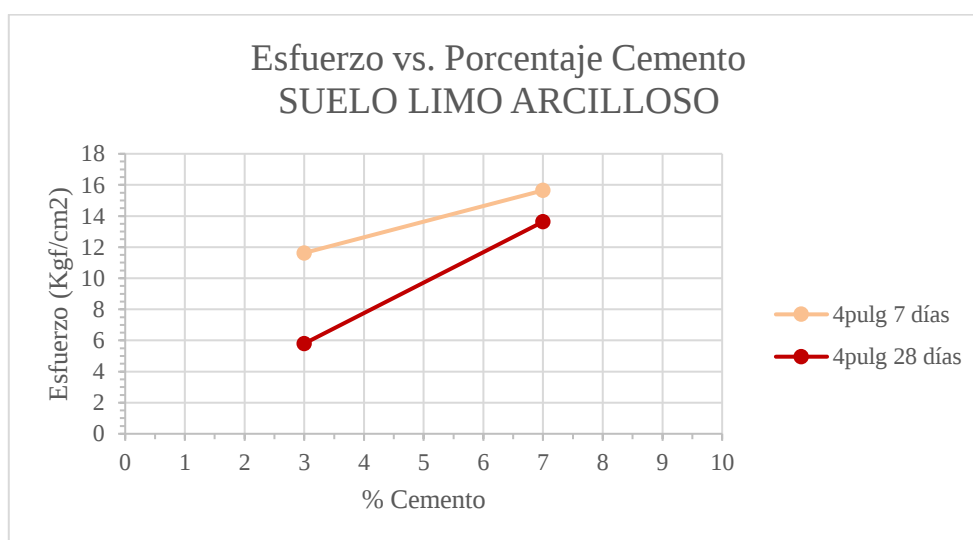


Gráfico 5 Relación de Edades Suelo Limo Arcilloso con Cemento (4'')

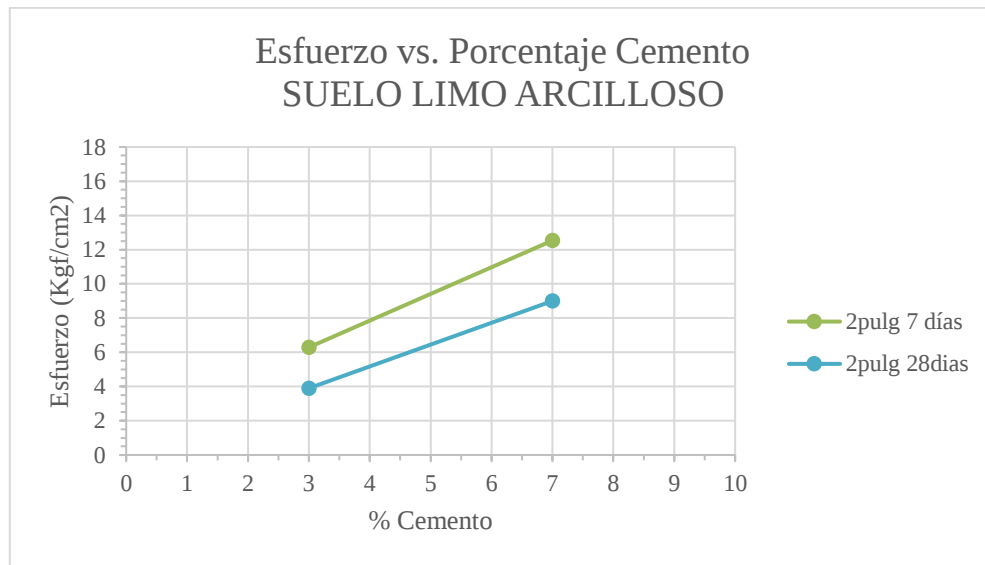


Gráfico 6 Relación de Edades Suelo Limo Arcilloso con Cemento (2’')

En ambos gráficos se puede observar un incremento de la resistencia con respecto al aumento en el porcentaje de cemento y que para ambos diámetros ensayados los valores de resistencia a los 7 días son mayores que a los 28 días. Es notable que las briquetas de mayor diámetro resisten considerablemente más que las briquetas de menor diámetro.

Considerando que el cemento en función del tiempo debe aumentar la resistencia, se puede fundamentar la posibilidad de que por reacciones químicas o físicas que en este TEG se desconocen que las resistencias a los 7 días sean mayores que las evaluadas a los 28 días.

CAPITULO IV

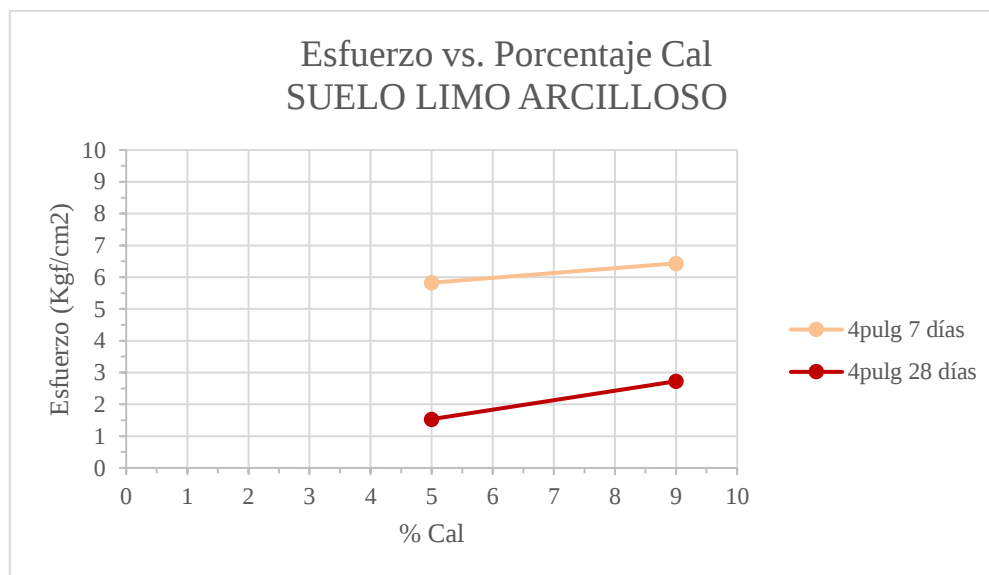


Gráfico 7 Relación de Edades Suelo Limo Arcilloso con Cal (4")

En el Gráfico 4 se presenta la variación de la resistencia de la muestra de suelo limo arcilloso estabilizado con cal en función del tiempo (evaluado a los 7 y 28 días) con los distintos porcentajes de cal evaluados (5% y 9%).

En este gráfico se muestran los resultados de las briquetas de 4" de diámetro. Se puede observar que el aumento del porcentaje de cal no influye considerablemente en la resistencia, además es notable que la cal no alcanza resistencias muy altas debido a que la misma tarda más tiempo en desarrollar su resistencia a compresión en comparación con el cemento.

De igual manera para el Gráfico 5, pero en el mismo se muestran los resultados de las briquetas de 2" de diámetro. En este caso se observa que el aumento del porcentaje de cal si desarrolla la resistencia a los 7 días, pero en cambio a los 28 días hay una disminución., sin embargo, los valores de resistencia a los 7 días son mayores que a los 28 días.

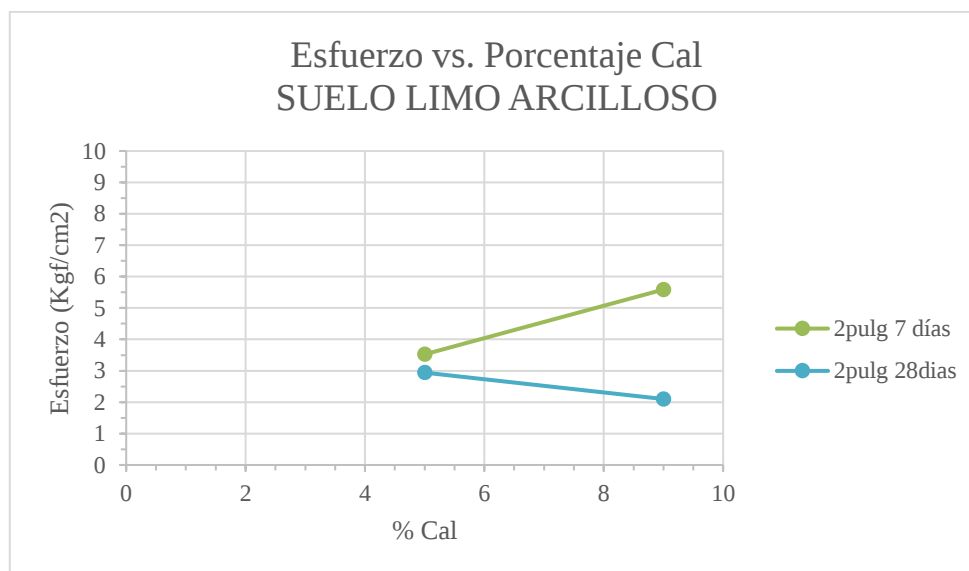


Gráfico 8 Relación de Edades Suelo Limo Arcilloso con Cal (2")

Para la mezcla de ambos estabilizantes se plantean 3 relaciones de cemento con cal (1:1, 1:2, y 2:1). En base a ello, se analizó cual es el comportamiento de las muestras de suelo para estas configuraciones de mezcla.

En el Gráfico 6 se presenta la variación de la resistencia de la muestra de suelo limo arcilloso estabilizado con cemento y cal (Relación 1:1) en función del tiempo (evaluado a los 7 y 28 días) con los distintos porcentajes de mezcla evaluados (4% y 8%).

En este gráfico se muestran los resultados de las briquetas de 2" y 4" de diámetro. Se observa un incremento de la resistencia con respecto al aumento en el porcentaje de cementante y que las briquetas de 2" de diámetro evaluadas a los 7 días tienen un comportamiento similar a las briquetas de 4" de diámetro evaluadas a los 28 días.

Se destaca que no se presentan los resultados de las briquetas de 2" de diámetro evaluadas a los 28 ya que las mismas solo se pudieron evaluar a los 7 días.

CAPITULO IV

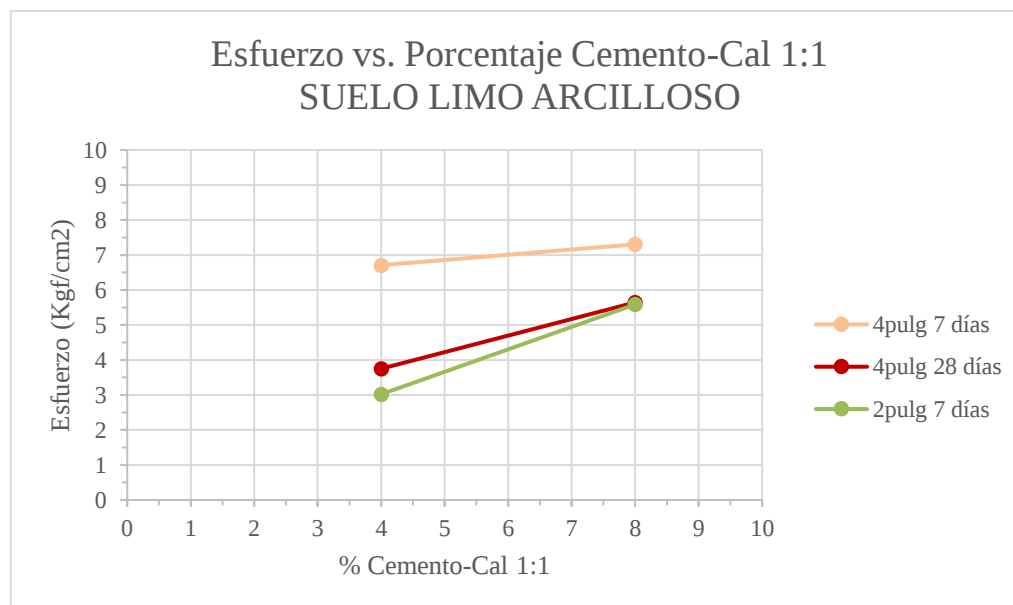


Gráfico 9 Relación de Edades Suelo Limo Arcilloso con Cemento-Cal 1:1

En el Gráfico 7 se presenta la variación de la resistencia de la muestra de suelo limo arcilloso estabilizado con cemento y cal (Relación 1:2, la cal es doblemente proporcional al cemento) en función del tiempo (evaluado a los 7 y 28 días) con los distintos porcentajes de mezcla evaluados (4% y 8%).

De igual manera en el Gráfico 8, pero en el mismo se muestra la Relación 2:1 en la que el cemento es doblemente proporcional a la cal. En ambos gráficos se muestran los resultados de las briquetas de 2" y 4" de diámetro.

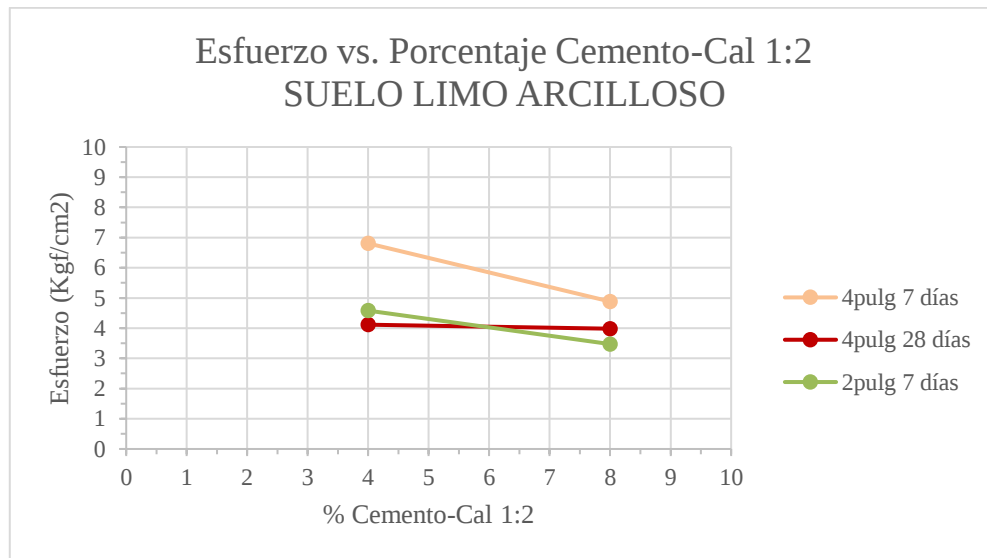


Gráfico 10 Relación de Edades Suelo Limo Arcilloso con Cemento-Cal 1:2

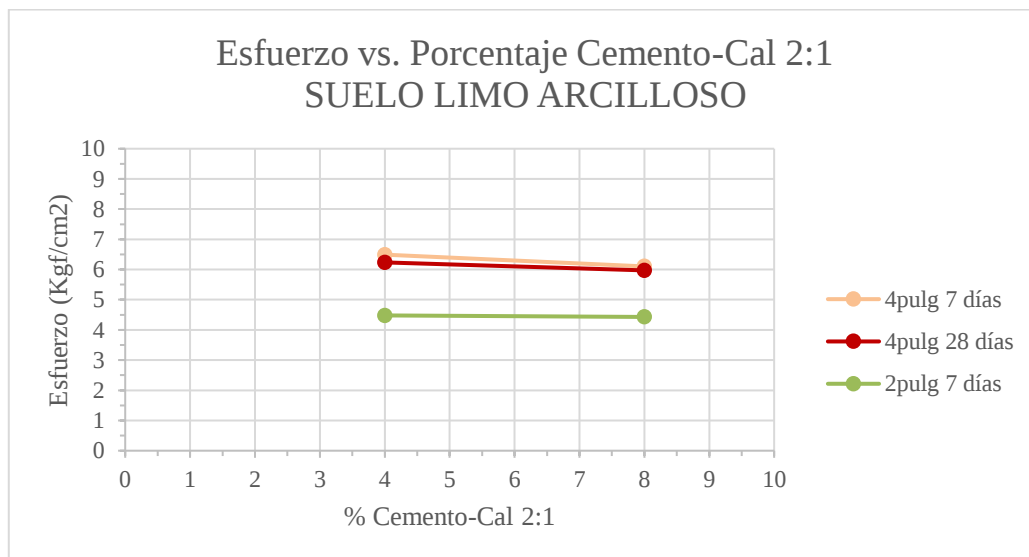


Gráfico 11 Relación de Edades Suelo Limo Arcilloso con Cemento-Cal 2:1

En ambos gráficos se puede observar como esta configuración de mezcla de ambos estabilizantes no es favorable, se puede decir que la cal influye directamente sobre el cemento sin dejar que el mismo desarrolle sus propiedades y así obtener mayores resistencias.

CAPITULO IV

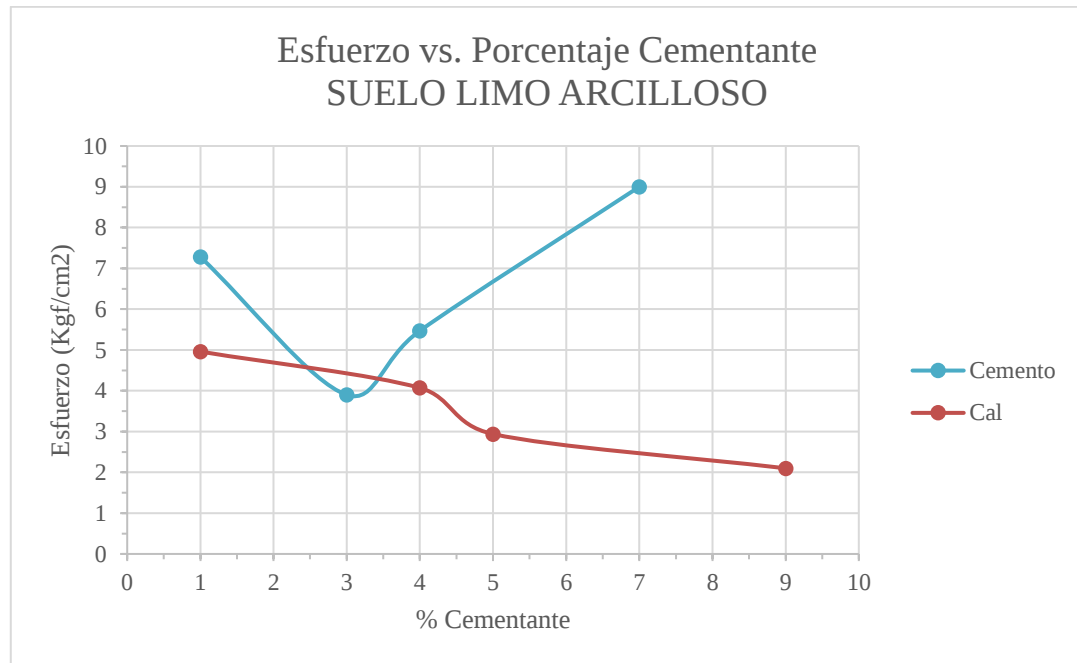


Gráfico 12 Esfuerzo vs. Porcentaje de Cementante Suelo Limo Arcilloso

En el Gráfico 9 se puede observar el comportamiento del suelo limo arcilloso con los distintos porcentajes de cemento y de cal empleados en conjunto con los TEG de Meza y Delgado (2019), Otaola y Ponte (2019), del cual se puede observar que el suelo estabilizado con cemento, alcanza mayores resistencias que el suelo estabilizado con cal. Para porcentajes de cemento 7% el suelo alcanza la mayor resistencia para esta muestra.

Para las briquetas de la muestra de suelo arcilloso se plantean una serie de gráficos de los cuales se analizará como los estabilizantes afectan la resistencia de briquetas de 2" evaluadas a los 28 días, en comparación con las briquetas de la muestra de suelo limo arcilloso.

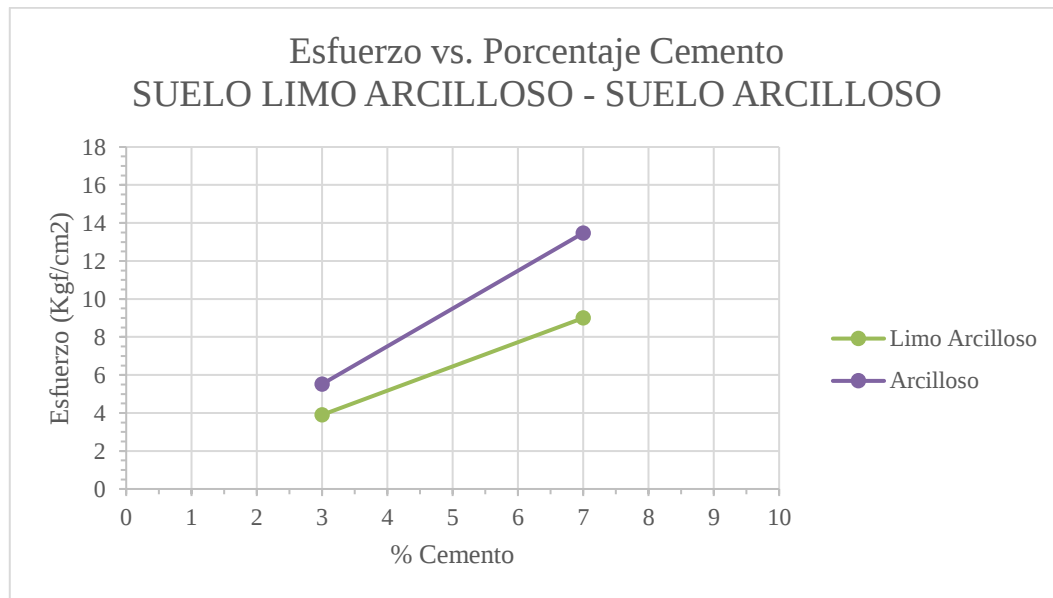
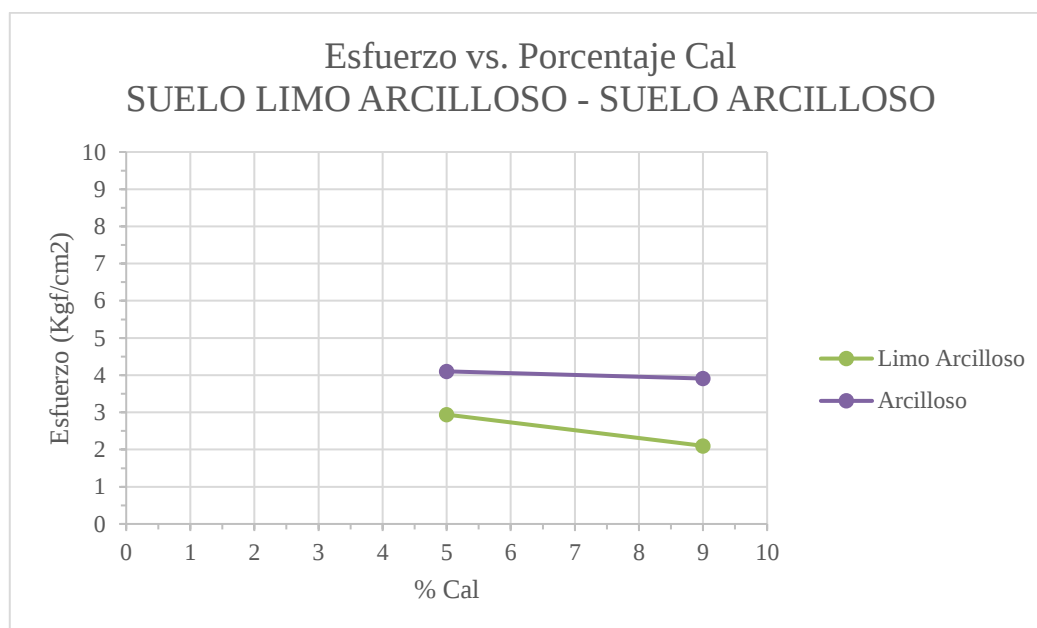


Gráfico 13 Comparación Muestras Estabilizadas con Cemento

En el Gráfico 10 se presenta la variación de la resistencia de ambas muestras de suelo estabilizadas con cemento con los distintos porcentajes evaluados (3% y 7%). Se puede observar como la resistencia de un suelo con un porcentaje de material plástico mayor aumenta.

De igual manera, en el Gráfico 11 se aprecia la variación la resistencia de las muestras de suelo estabilizadas con cal, en donde se puede observar que el suelo arcilloso es mucho más resistente debido al alto contenido de material plástico, aunque si se puede notar que a mayor porcentaje de cal ocurre una pequeña disminución en su resistencia.

CAPITULO IV

**Gráfico 14 Comparación Muestras Estabilizadas con Cal**

En el Gráfico 12 se presenta la variación de la resistencia de la muestra de suelo arcilloso estabilizada con cemento y cal (Relación 1:1, 1:2 y 2:1) con los distintos porcentajes de mezcla evaluados (4% y 8%).

Se destaca que no se presentan los resultados en comparación con la muestra de suelo limo arcilloso debido a que dicha muestra no fue evaluada con briquetas de 2" de diámetro evaluadas a los 28 días.

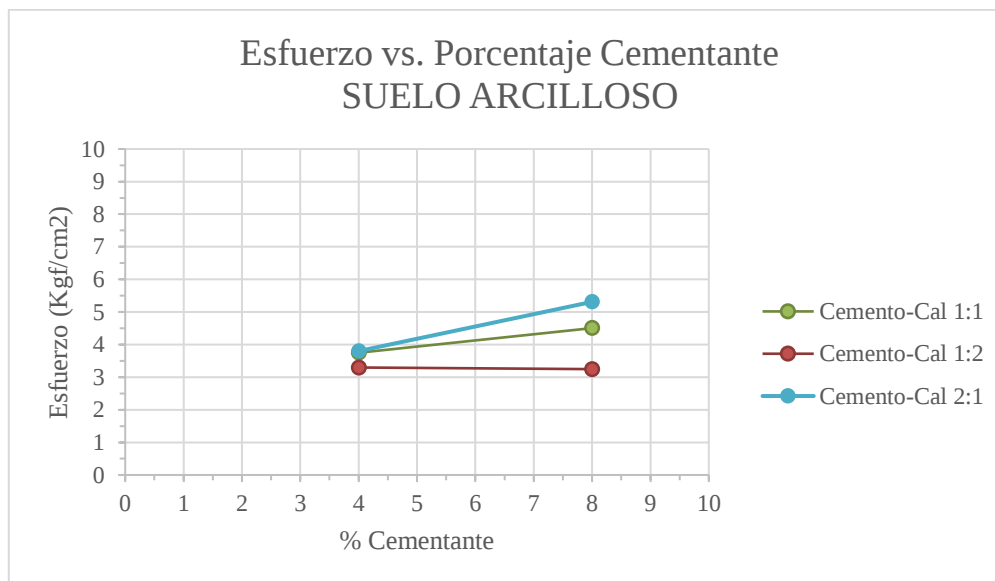


Gráfico 15 Comportamiento Suelo Arcilloso Estabilizado con Cemento-Cal

Bajo la estructuración de aplicar una mezcla de ambos materiales estabilizantes, se puede observar como el cemento no alcanza sus propiedades debido a la presencia de cal. En todos los casos la cal influye sobre el cemento y para esta mezcla cemento-cal, las resistencias disminuyen o no aumentan considerablemente en comparación con las muestras estabilizadas solo con cemento.

Según el Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal se considera que “si se utiliza ambos estabilizantes, se trabaja por separado la cal para restar plasticidad y el cemento para aumentar la capacidad de soporte o aumentar resistencias”. Esto quiere decir que puede trabajarse como un material doblemente estabilizado, pero con la correcta relación de aplicación.

A manera se resumen, se presentan los Gráficos 13 y 14 que representan respectivamente, el comportamiento con los distintos porcentajes de cemento y de cal empleados de las briquetas de 2” de diámetro evaluadas a los 28 días de la muestra de suelo limo arcilloso y el comportamiento de las

CAPITULO IV

briquetas de 2" de diámetro evaluadas a los 28 días de la muestra de suelo arcilloso.

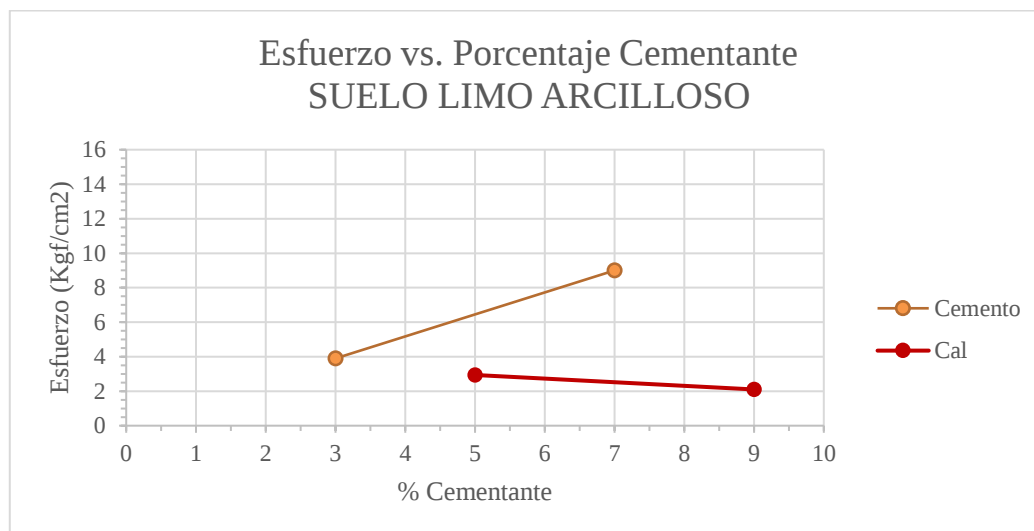


Gráfico 16 Comparación de los Estabilizantes Suelo Limo Arcilloso

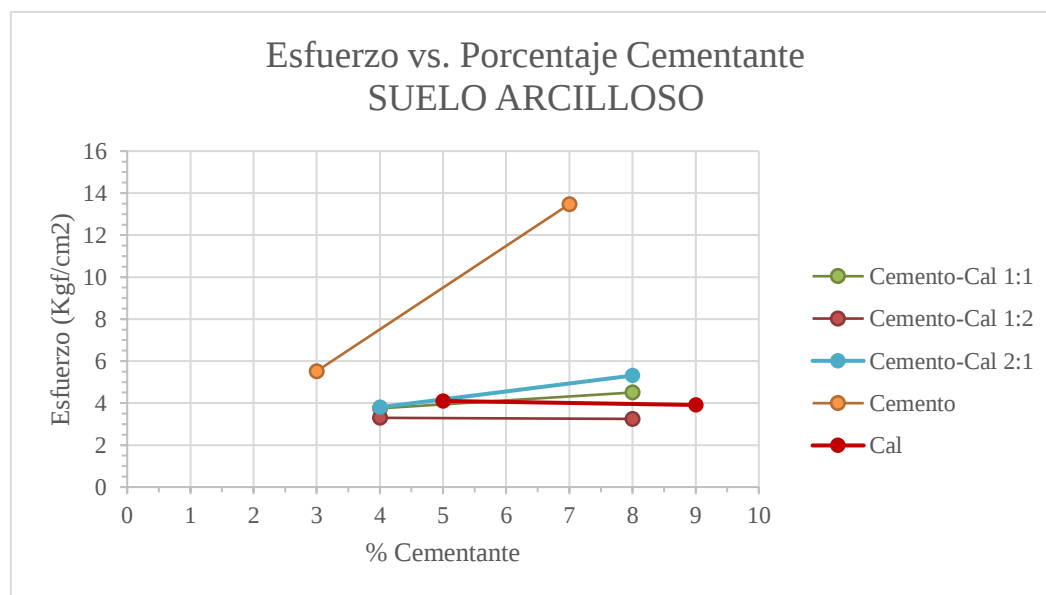


Gráfico 17 Comparación de los Estabilizantes Suelo Arcilloso

Análisis de la Incidencia del Índice de Plasticidad y la Granulometría en las Propiedades de Suelos Estabilizados con Cemento y/o Cal

En ambas gráficas se puede observar como el cemento influye en la resistencia, ocasionando un desarrollo o aumento considerable de la misma en comparación con la cal y la mezcla entre ambos estabilizantes. Este si aumenta su resistencia con el aumento del porcentaje cemento, en cambio la cal mantiene un comportamiento constante con el aumento de su porcentaje, esto puede deberse a que la cal como se explicó anteriormente no alcanza su resistencia máxima al mismo tiempo que el cemento.

Finalmente, el Gráfico 15 relaciona el comportamiento de la muestra arcillosa trabajada en este TEG con los distintos porcentajes de cemento y cal empleados, con el comportamiento de la muestra arcillosa trabajada en otro TEG desarrollado en conjunto.

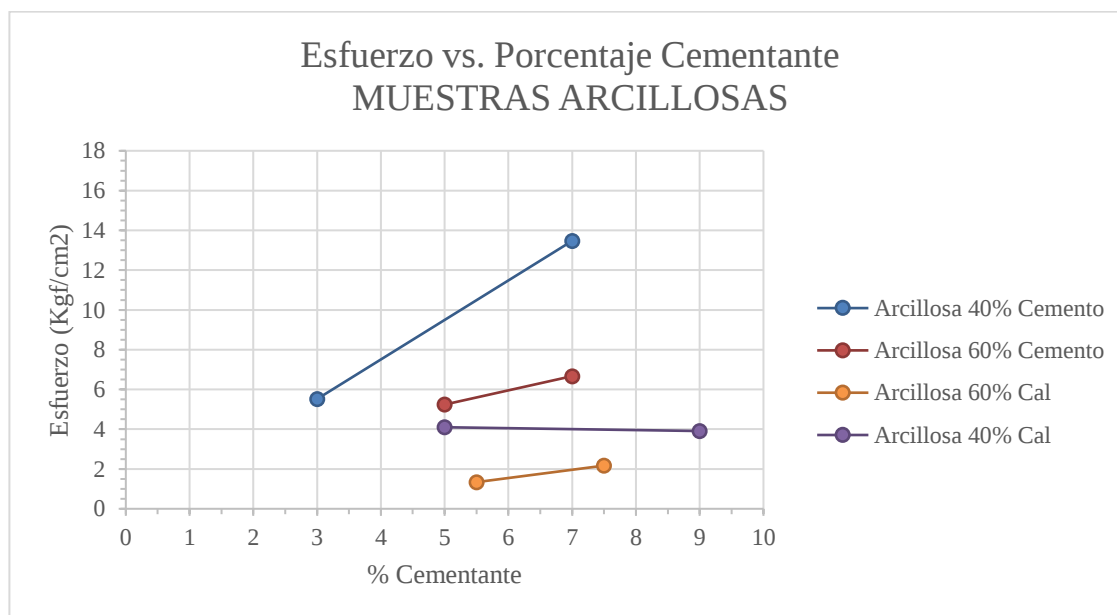


Gráfico 18 Comparación de los Estabilizantes Muestras Arcillosas

Se puede observar como las muestras arcillosas estabilizadas con cemento alcanzan mayores resistencias que las estabilizadas con cal a pesar de que se dice que los suelos que contienen un alto contenido de material

CAPITULO IV

plástico reaccionan de forma favorable en presencia de cal. Para porcentajes de cemento 7% el suelo alcanza la mayor resistencia en la muestra arcillo trabajada en este TEG (40% de arcilla).

IV.2.2 Disgregabilidad

Esta prueba se hizo con el fin de evaluar la durabilidad o la resistencia a la desintegración de las muestras de suelo expuestas al agua debido a que el estado natural del suelo se ve afectado considerablemente bajo esta condición, convirtiéndolo en barro, o en este caso generando un desmoronamiento o desintegración muy rápida de la muestra y por ende la pérdida sus propiedades en relación al tiempo sometida a la presencia de agua.

En la Ilustración 41 se puede observar como una briqueta de suelo en estado natural luego de estar un tiempo aproximado de 2-3 horas sumergida en agua se desintegró.



Ilustración 1 Disgregabilidad Briqueta Suelo Natural

Fuente: Propia.

En caso contrario, en la Ilustración 42 se puede observar como una briqueta de suelo estabilizado con los diversos cementantes, mantiene la

estabilidad y durabilidad de la muestra a pesar de haber estado sometida a la presencia de agua durante varios días, la muestra de suelo presenta algo de desgaste pero no se desintegra, lo que quiere decir que en función del tiempo y bajo presencia de agua los suelos estabilizados resultan de mayor durabilidad.



Ilustración 2 Disgregabilidad Briqueta Suelo Estabilizado

Fuente: Propia.

Basándonos en este análisis, aunque el suelo estabilizado no incrementa de forma significativa la resistencia en comparación con el suelo sin estabilizar, estos agentes estabilizantes por otro lado si atribuyen al suelo propiedades de durabilidad y/o estabilidad. Por ello, podría decirse que si es aceptable incorporar materiales estabilizantes al suelo con la adecuada configuración de porcentaje del mismo con el fin de afianzar sus propiedades tanto de resistencia como de estabilidad.

En la Ilustración 43 se presenta la prueba de disgregabilidad de las briquetas de suelo arcilloso, en esta prueba se observó un desmoronamiento más rápido de las mismas en comparación al comportamiento del suelo limo arcilloso estabilizado (Ilustración 44), esto se debe al mayor contenido de arcilla ya que las mismas absorben gran cantidad de agua que perturba la integridad de la muestra suelo, pero sin embargo el material cementante

CAPITULO IV

sigue cumpliendo la función de mantener y dar estabilidad a la misma a pesar de estar bajo la presencia de agua durante varios días.



Ilustración 3 Disgregabilidad Briquetas Suelo Arcilloso Estabilizada

Fuente: Propia.



Ilustración 4 Disgregabilidad Briquetas Suelo Limo Arcilloso Estabilizado

Fuente: Propia.

Adicionalmente, posterior a analizar el comportamiento de las briquetas bajo la presencia del agua, se probó evaluar el comportamiento de las mismas sacándolas del agua y dejándolas secar nuevamente, con el fin observar si en el proceso de secado se presentaba una variación en la integridad de las muestras, obteniendo como resultado que no hay gran variación, ya que las briquetas no se quebraron ni se agrietaron para este caso fuera del agua.

CAPITULO V**CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES****V.1 Conclusiones**

Luego de analizar los resultados obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- 1) Mediante ensayos de granulometría y límites de consistencia, las muestras del suelo trabajado corresponden a la clasificación A4 y A6, donde la parte arcillosa se determinó mediante los resultados de peso específico, que pertenecen a la familia de las lilitas.
- 2) El ensayo a la compresión de todas las muestras con los distintos estabilizantes empleados, arrojaron valores de resistencia más altos a los 7 días en comparación a los evaluados a los 28 días.
- 3) En el caso de los suelos estabilizados con cemento, se concluye que la resistencia a la compresión aumenta con respecto al incremento en porcentaje del cemento. El suelo arcilloso alcanza resistencias considerablemente más altas, que las correspondientes al suelo limo arcilloso.
- 4) Para el caso de los suelos estabilizados con cal, se puede concluir que la resistencia a la compresión tanto para el suelo arcilloso, como el suelo limo arcilloso, mantienen un valor prácticamente constante, con respecto a la variación del porcentaje de cal. Esto puede deberse a que la cal alcanza resistencias más altas con el paso del tiempo.

CAPITULO V

- 5) El mejor estabilizante para los tipos de suelos trabajados, de acuerdo a los porcentajes empleados y al tiempo para la ejecución de los ensayos resultó ser el cemento.
- 6) La muestra con mayor contenido de material plástico (suelo arcilloso), aunque resultó más resistente con la aplicación de los materiales estabilizantes, su durabilidad en presencia de agua fue menor con respecto a la muestra con menos material plástico.
- 7) Con el empleo de dos estabilizantes (cemento y cal), para evaluar si el cemento mejoraba el desarrollo de las propiedades de la cal en menor tiempo, no resultó, ya que la cal toma el control sobre el comportamiento del cemento.
- 8) De acuerdo a las normas para el uso de materiales estabilizados en el diseño de pavimento, las mezclas con cemento resultan aplicables como sub-bases de pavimentos rígidos, ya que cumplen con las propiedades mecánicas e hidráulicas.

CAPITULO V

V.2 Recomendaciones

Luego de revisar y analizar los resultados obtenidos y con el propósito de profundizar más sobre el tema en futuros trabajos, se recomienda:

- Aumentar los porcentajes de los materiales estabilizantes para evaluar si la resistencia tiene un aumento o desarrollo significativo.
- Realizar un estudio que evalúe el mayor desarrollo de la resistencia obtenido a los 7 días en comparación a los evaluados a los 28 días.
- Se propone el estudio de los suelos arcillosos con cal evaluados a mayores edades, y de esta forma verificar si la resistencia de los suelos estabilizados con ese material mejora con el paso del tiempo.
- Evaluar el comportamiento químico y la competencia de la hidratación o formación de doble capa en las arcillas y los meniscos en los limos durante la hidratación del material estabilizante.
- Tomando en consideración los porcentajes de cal viva aplicados en el presente trabajo, se plantea la utilización de cal hidratada en los mismos porcentajes y evaluar la diferencia en el comportamiento de la misma.
- Realizar un estudio de la mezcla de los materiales estabilizantes (cemento y cal) para evaluar la influencia de la cal sobre el comportamiento del cemento impidiendo alcanzar un desarrollo en la resistencia.
- Evaluar la variación de la plasticidad en las muestras con la adición de los materiales cementantes (cemento y cal).

BIBLIOGRAFÍA**BIBLIOGRAFÍA**

- Badillos Juárez y Rodríguez Rico “Mecánica de suelos” Tomo 1 Fundamentos de la Mecánica de suelos. Editorial Limusa, Edición 2000.
- Heredia Tenías José Vicente N. “Mejoramiento Químico y Electroquímico de suelos, para carreteras, ferrocarriles y aeropuertos”.
- Ing. Gonzalo Brazzini Silva (2011). Perú. “Suelos Estabilizados, una buena alternativa para la conservación de caminos no pavimentados”.
- J. Nadal, Ingeniero de caminos “El suelo estabilizado, material de construcción – aplicaciones en edificación” Vol 15, nº 140.
- M. en I. Eduardo de la Fuente Lavalle, “Suelo – Cemento, Sus usos, propiedades y aplicaciones”. Producción Editorial M. en A. Soledad Moliné Venanzi. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. 2003.
- María A. Sánchez A. (2014). Quito Ecuador. TEG – Universidad Católica del Ecuador “Estabilización de suelos expansivos con cal y cemento en el sector Calcical del Cantón Tosagua Provincia de Manabí”.
- Pérez Ayala Hugo Ignacio “Guía de Laboratorio Mecánica de Suelos para Ingeniería”. Septiembre 2012.
- Redacción: Wikivia-La enciclopedia de la carretera Título: Clasificación AASHTO Publicación: Julio 2011.
http://www.wikivia.org/wikivia/index.php/Clasificaci%C3%B3n_AASHTO

BIBLIOGRAFÍA

- Redacción: AiteLizeth. Título: Hidratación del cemento.
https://www.academia.edu/9477874/HIDRATACION_DEL_CEMENTO

- Redacción: Anónima. Título: Que es el pH del Suelo y Cómo afecta al Desarrollo de la Planta. Publicación: Octubre 2010.
<https://gesmontes.es/que-es-el-ph-del-suelo/>

- Redacción: Anónima. Título: Estabilización de suelos para pavimentos.
<https://www.equindustriales.com/app/download/13270845096/Estabilizacion+de+suelos.pdf?t=1471648857>

- Redacción: anónimo. Título: Los suelos en la ingeniería. Publicado: viernes, 13 de Mayo 2016. Web: <http://cyavzla.blogspot.com/2016/05/los-suelos-en-la-ingenieria.html>

- Redacción: Huezo Maldonado Heber Manrique y Orellana Martínez Alber Cristian. Título: “Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular en el salvador”. Publicación: San Salvador Febrero 2009.
http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/2138/1/Gu%C3%ADa_b%C3%A1sica_para_estabilizaci%C3%B3n_de_suelos_de_cal_en_caminos_de_baja_intensidad_vehicular_en_El_Salvador.pdf

- Redacción: Ing. Silva Omar Javier. Título: ¿Cómo se produce el proceso de hidratación del cemento? Publicación: Diciembre 2017.
<https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/proceso-hidratacion-del-cemento>

- Redacción: Jofré Carlos (IECA) y Kraemer Carlos (U.P.V.). Título: Manual de Estabilización de Suelos con Cemento o Cal. Publicación: España. <http://www.anter.es/pdf/MANUAL-SUELOS.pdf>

BIBLIOGRAFÍA

- Redacción: M. en I. Eduardo de la Fuente Lavalle. Título: Suelo – Cemento (Sus usos, propiedades y aplicaciones. Publicación: México 2013. http://imcyc.com/redcyc/imcyc/biblioteca_digital/SUELO-CEMENTO
- Redacción: optimasoil. Título: estabilización de suelos, descripción y ventajas. Web: <http://www.estabilizaciondesuelos.com/index.php/descripcion>
- Redacción: Ortiz Laura y Valenzuela Silvia. Título: Sedimentación y Ley de Stokes. <https://prezi.com/kxo6wqsat6jy/sedimentacion-y-ley-de-stokes/>
- Redacción: Ucha Florencia. Título: Qué es Decantación. Publicación: Noviembre 2015. <https://www.definicionabc.com/general/decantacion.php>
- Redacción: Vega Romero Daniel. Título: Compresión no confinada. Publicación: Mayo 2015. <https://es.slideshare.net/DanielVegaRomero/compresion-no-confinada-1>
- Rocío del Carmen Pérez Collantes. (2012). Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. “Estabilización de suelos arcillosos con cenizas de carbón para su uso como sub-rasante mejorada y/o sub-base de pavimentos”.
- Suarez Diaz Jaime “Seminario Rellenos Estabilización de Suelos”. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

ANEXOS

ANEXOS

A.1 Ensayos de Caracterización de las Muestras de Suelo

A.1.1 Gravedad Específica

A.1.2.1 Gravedad Específica Suelo Limo Arcilloso

Gs Suelo Patrón	Wb	W1	W2	Ww1	W suelo seco	Ww2	Ww	Gs
PICNOMETRO	PESO DEL PICNOMETRO (gr)	PESO PICNOMETRO + AGUA (gr)	PESO PICNOMETRO + AGUA + SUELO (gr)	PESO AGUA 1 (gr)	PESO SUELO SECO (gr)	PESO AGUA 2 (gr)	Diferencia de Humedad (gr)	Gravedad Especifica
1	68,2	167,7	183,41	99,5	24,64	90,57	8,93	2,76
7	64,8	164,7	179,97	99,9	24,49	90,68	9,22	2,65
2	66,2	165,6	181,26	99,4	24,52	90,54	8,86	2,77
							Gs (Promedio)	2,73

A.1.2.2 Gravedad Específica Suelo Arcilloso

Gs Muestra Arcillosa	Wb	W1	W2	Ww1	W suelo seco	Ww2	Ww	Gs
PICNOMETRO	PESO DEL PICNOMETRO (gr)	PESO PICNOMETRO + AGUA (gr)	PESO PICNOMETRO + AGUA + SUELO (gr)	PESO AGUA 1 (gr)	PESO SUELO SECO (gr)	PESO AGUA 2 (gr)	Diferencia de Humedad (gr)	Gravedad Especifica
1	68,2	167,7	183,4	99,5	24,4	90,80	8,70	2,80
7	64,8	164,7	180,1	99,9	24,4	90,9	9,00	2,71
							Gs (Promedio)	2,75

A.1.2.3 Gravedad Específica de Materiales

ARENAS	Wb	W1	W2	Ww1	W suelo seco	Ww2	Ww	Gs
PICNOMETRO	PESO DEL PICNOMETRO (gr)	PESO PICNOMETRO + AGUA (gr)	PESO PICNOMETRO + AGUA + SUELO (gr)	PESO AGUA 1 (gr)	PESO SUELO SECO (gr)	PESO AGUA 2 (gr)	Diferencia de Humedad (gr)	Gravedad Especifica
A-4	53,5	153,1	167,3	99,6	22,6	91,20	8,40	2,69
7	64,8	164,7	178,8	99,9	22,6	91,4	8,50	2,66
LIMOS							Gs (Promedio)	2,67
1	68,2	167,7	183,6	99,5	25	90,4	9,10	2,74
7	64,8	164,7	180	99,9	25	90,2	9,70	2,57
ARCILLAS							Gs (Promedio)	2,66
1	68,2	167,7	182,1	99,5	22,4	91,5	8,00	2,80
2	66,2	165,3	179,8	99,1	22,4	91,2	7,90	2,83
							Gs (Promedio)	2,81

ANEXOS**A.1.3 Límites de Consistencia****A.1.3.1 Límite Líquido Suelo Limo Arcilloso**

# Tara	Peso Tara (gr)	Peso Tara + Muestra Humeda (gr)	Numero de Golpes	Peso Tara + Muestra Seca (gr)	% Humedad	Limite Liquido (LL)
T1	26,1	37	37	34,6	28,235	29,607
T2	31,5	53,9	21	49,1	27,273	26,703
T3	31,3	53,9	30	49,2	26,257	26,843
T4	29,7	47,2	18	43,4	27,737	26,656
T5	27,9	49,2	17	44,4	29,091	27,765

A.1.3.2 Límite Plástico Suelo Limo Arcilloso

# Tara	Peso Tara (gr)	Peso Tara + Muestra Humeda (gr)	Peso Tara + Muestra Seca (gr)	% Humedad
92	40,3	52,9	50,8	20,00
63	33,8	44,9	43,2	18,09
90	38,5	49,8	48	18,95

A.1.3.3 Límite Líquido Suelo Arcilloso

# Tara	Peso Tara (gr)	Peso Tara + Muestra Humeda (gr)	Numero de Golpes	Peso Tara + Muestra Seca (gr)	% Humedad	Limite Liquido (LL)
250	20,49	42,5	14	36,7	35,780	33,356
C-29	22,79	39,5	26	35,1	35,743	35,913
402	27,29	49,3	33	43,5	35,780	37,003

A.1.3.4 Límite Plástico Suelo Arcilloso

# Tara	Peso Tara (gr)	Peso Tara + Muestra Humeda (gr)	Peso Tara + Muestra Seca (gr)	% Humedad
90	38,48	47,1	45,5	22,79
92	40,26	46,8	45,6	22,47
63	33,84	41	39,7	22,18

ANEXOS

A.3 Ensayos para Cumplir con los Objetivos Planteados

A.3.1 Compresion No Confinada

A.3.1.1 Resultados Briquetas Suelo Limo Arcilloso (7 días)

7 días			
Briquetas Suelo Limo Arcilloso			
Material	%	Esfuerzo (Kg/cm2)	
		4"	2"
Cemento	3	11,63	6,29
Cemento	7	15,65	12,53
Cal	5	5,83	3,52
Cal	9	6,44	5,59
Cemento y Cal 1:1	4	6,71	3,02
Cemento y Cal 1:2	4	6,81	4,58
Cemento y Cal 2:1	4	6,49	4,48
Cemento y Cal 1:1	8	7,30	5,59
Cemento y Cal 1:2	8	4,88	3,47
Cemento y Cal 2:1	8	6,10	4,43

A.3.1.2 Resultados Briquetas Suelo Limo Arcilloso (28 días)

28 días		
Briquetas Suelo Limo Arcilloso		
	Esfuerzo (Kg/cm2)	
% Material	4"	2"
Cemento 3%	5,80	3,90
Cemento 7%	13,63	9,00
Cal 5%	1,54	2,94
Cal 9%	2,73	2,10
Cemento y Cal 1:1 4%	3,75	-
Cemento y Cal 1:2 4%	4,11	-
Cemento y Cal 2:1 4%	6,24	-
Cemento y Cal 1:1 8%	5,64	-
Cemento y Cal 1:2 8%	3,98	-
Cemento y Cal 2:1 8%	5,97	-

ANEXOS

A.3.1.2 Resultados Briquetas Suelo Arcilloso (28 días)

28 días		
Briquetas Suelo Arcilloso		
Esfuerzo (Kg/cm ²)		
% Material	4"	2"
Cemento 3%	-	5,52
Cemento 7%	-	13,47
Cal 5%	-	4,10
Cal 9%	-	3,91
Cemento y Cal 1:1 4%	-	3,75
Cemento y Cal 1:2 4%	-	3,30
Cemento y Cal 2:1 4%	-	3,80
Cemento y Cal 1:1 8%	-	4,51
Cemento y Cal 1:2 8%	-	3,25
Cemento y Cal 2:1 8%	-	5,31