CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN AL DISEÑO TEÓRICO Y METODOLÓGICO

1.1. Justificación

La subrasante es la capa de terreno de una estructura vial que soporta la estructura de pavimento y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto. Debido a que la subrasante es la parte que sostiene la estructura, es de vital importancia que cumpla con las condiciones de resistencia requeridas para poder soportar las cargas a las cuales estará sometido.

Cuando en la construcción de ciertas obras civiles se presentan suelos arcillosos se necesita, en algunos casos, la substitución de dicho material entonces se recurre a la mejora de las propiedades de éste para asegurar la calidad y buen funcionamiento de las mismas mediante la estabilización.

El uso de agentes químicos como la cal para la estabilización de suelos, se usa para mejorar suelos con alto contenido de arcilla, donde además no se cuente con otra opción de estabilización, porque la mezcla suelo-cal suele ser muy costoso, las propiedades mejoradas son la resistencia, capacidad portante, etc. Parámetros que han sido estudiados en diferentes proyectos de grado, lo que no se ha observado en estos proyectos, es el estudio de la propiedad “permeabilidad”, punto en el que se centrara este documento.

Cuando se habla de estabilización de suelo-cal u otro tipo de estabilización, estamos hablando de mejorar para bien las propiedades mecánicas y físicas de los suelos, esto se ha evidenciado en diferentes proyectos donde se ve que el valor de resistencia, capacidad portante han mejorado, pero que pasa con la permeabilidad, no se encuentra mucha bibliografía sobre el tema, ¿el valor de permeabilidad cambia?, y si cambia, que tanto lo hace, o se mantiene en su valor inicial (antes de ser sometido a estabilización), preguntas a las cuales se pretenden responder con los ensayos de laboratorio a realizar en este proyecto de grado.

La investigación es de gran importancia porque elaborará un documento que haga una recopilación de resultados de laboratorios actualizados, brindando una base para futuros estudios sobre el tema, pero aplicado a otros tipos de suelo con otro tipo de estabilizante,

a su vez se pretende promover la realización de estudios a los suelos de nuestro país, para constatar o revalidar datos obtenidos en diferentes laboratorios.

La investigación contara con la ayuda de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, en lo referente a la realización de los ensayos de laboratorio que se necesitarán hacer a lo largo de la investigación.

1.2. Situación problemática

1.2.1 Conceptualización puntual del objeto de estudio

Se busca ver el comportamiento de la permeabilidad en un suelo arcilloso una vez sometido está a una estabilización con cal.

1.2.2 Descripción del fenómeno ocurrido

Basándose en sus trabajos sobre la mecánica de fluidos, el ingeniero francés Henry Darcy descubrió que existe una relación entre la cantidad de agua que fluye a través de una superficie, el área de esta superficie y el gradiente hidráulico.

En la primera parte de este proyecto se realizará el ensayo de permeabilidad a un suelo natural (arcilla) usando el permeámetro de carga variable para ello se hará uso de las diferentes normas para llegar a resultados óptimos.

En la segunda parte se realizará una mejora al suelo añadiendo cal, en diferentes porcentajes y siguiendo la normativa ASTM D6276 para obtener lo porcentajes de cal necesarios y la ASTM D3155G para la mezcla óptima del suelo-cal, obteniendo especímenes para someterlos a las pruebas de permeabilidad.

Una vez concluido se hará una comparación de los valores de permeabilidad obtenidos tanto en el suelo natural como en el suelo sometido a una estabilización, se observará que es lo que ocurre con los valores de permeabilidad y se hará un análisis de los resultados.

1.2.3 Breve explicación de la perspectiva de solución

La comparación de permeabilidad en suelo arcillosos antes y después de ser estabilizado con cal, con el fin de poder determinar si existe variación en el valor de permeabilidad y si existe variación en qué proporción lo hace.

1.2.4 Problema

¿De qué manera una comparación de permeabilidades, determina si el comportamiento de la permeabilidad en suelos arcillosos varia una vez sometido el suelo a una estabilización con cal?

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Comparar la permeabilidad en un suelo arcilloso, una vez sometido a una estabilización con cal, para poder determinar si existe variación en el valor de la permeabilidad del suelo antes y después de ser estabilizado con cal.

1.3.2 Objetivos específicos

- Elaborar un marco teórico sobre las características de los suelos previas a su estabilización y post estabilización.
- Obtener muestras de suelos, clasificarlas y calcular su permeabilidad.
- Someter las muestras de suelo a una estabilización con cal.
- Realizar las pruebas de permeabilidad, usando el permeámetro de carga variable.
- Comparar los resultados obtenidos con la bibliografía y validar los resultados.

1.4 Hipótesis

Al mezclar suelo arcilloso con diferentes porcentajes de cal, se obtendrán especímenes que serán sometidos a pruebas de laboratorio de las cuales se espera haya mejoras en la propiedad permeabilidad.

1.4.1 Identificación de variables

Las variables que se presentan en el presente proyecto son la cantidad de cal y la permeabilidad, no se toma con variable el tipo de suelo porque como ya se indicó anteriormente el único tipo de suelo a usar para esta investigación es la arcilla clasificada CH (clasificación SUCS), a continuación, se identificarán la variable independientes y dependientes para este proyecto:

1.4.1.1 Variable independiente

X1 = Cantidad de cal

1.4.1.2 Variable dependiente

Y = Permeabilidad

1.4.2 Conceptualización de variables

1.4.2.1 Cantidad cal

Es la proporción de cal que se le agregará al suelo a ser mejorado, con la finalidad de ver en qué cantidad es apropiado colocarlo para lograr un mejor rendimiento de la mezcla de suelo-cal.

1.4.2.2 Permeabilidad

Es la capacidad de un suelo para permitir en su seno el paso de un fluido, sin que dicho tránsito altere la estructura interna del cuerpo.

1.4.3 Operacionalización

Tabla 1. 1 Operacionalización de la variable independiente

Variable independiente	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Cantidad de cal	Tamaño de muestra	m3	Establecer la cantidad optima

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1. 2 Operacionalizacion de la variable dependiente

Variable dependiente	Dimensión	Indicador	Valor/acción
Permeabilidad	Cantidad de suelo	Proporción de suelo que será atravesado por agua	Mientras haya más vacíos el suelos es más permeable
	Tiempo	Segundos, minutos u horas	El tiempo mínimo para suelos finos es de 24 h
	Porosidad	Cantidad de vacíos del estrato	Ver la relación de vacíos

Fuente: Elaboración propia

1.5 Tipo de investigación

El presente trabajo de investigación corresponde al tipo de investigación causal o explicativo, pues con este trabajo se pretende explicar lo que sucedería con el valor de permeabilidad en un suelo arcilloso antes y después de ser sometido a una estabilización cal.

1.5.1 Unidad de muestro

Se tomará como unidad de estudio o muestreo el número de ensayos que serán necesarios para la elaboración del proyecto como ser:

Tabla 1. 3 Unidad de muestreo

Pregunta de investigación	Objeto de investigación	Unidad de muestreo
¿De qué manera una comparación de permeabilidades, determina si el comportamiento de la permeabilidad en suelos arcillosos varia una vez sometido el suelo a una estabilización con cal?	Permeabilidad en suelos estabilizados	N° de ensayos de granulometría. N° de ensayos de hidrómetro. N° de ensayos de límites N° de ensayos de compactación. N° de ensayos de permeabilidad.

Fuente: Elaboración propia

1.5.2 Población y muestra

La población para esta investigación es del tipo infinito ya que no se conoce el número total de sus elementos, ya que es posible aplicar los ensayos a diferentes tipos de arcillas a distintos tipos porcentajes de cal.

La población será la cantidad infinita de ensayos que existen y la muestra serán los ensayos que se realizarán al suelo en estudio para caracterizarlo.

1.5.2.1 Población

Tabla 1. 4 Tamaño de Población

N°	Ensayos a realizar
1	Ensayo de Contenido de humedad
2	Ensayo de Análisis Granulométrico
3	Ensayo de Hidrómetro
4	Ensayo de Límites de Atterberg
5	Ensayo de Permeabilidad de carga variable
6	Ensayo de Contenido óptimo de cal
7	Ensayo de compactación

Fuente: Elaboración propia

1.5.2.2 Muestra

Tabla 1. 5 Tamaño de muestra

N°	Número de ensayos
1	2 Ensayos de Contenido de humedad
2	9 Ensayos de Análisis Granulométrico
3	2 Ensayos de Hidrómetro
4	10 Ensayos de Límites de Atterberg
5	30 Ensayos de Permeabilidad de carga variable
6	2 Ensayos de Contenido óptimo de cal
7	6 Ensayos de compactación

Fuente: Elaboración propia

1.6 Alcance

La presente investigación abarca el estudio de suelo arcilloso y su correcta estabilización con cal, con el fin de comparar el valor de permeabilidad del suelo en ambos estados, es decir en estado natural y luego de ser sometido a una estabilización.

Capítulo I. - En este capítulo se empieza a realizar el diseño metodológico del presente proyecto, que abarca desde encontrar un problema en el campo de la mecánica de suelos y dar solución a este problema mediante diferentes ensayos de laboratorio. Identificando

los objetivos del proyecto, basar todo el proyecto en una hipótesis que será verificada al final de este documento.

Capítulo II. - En este capítulo se elaborará un marco teórico sobre el tema de estabilización de suelos, pero sobre todo se hará énfasis en el tema principal del proyecto que es la permeabilidad, desde el concepto de permeabilidad, comportamiento de permeabilidad en diferentes tipos de suelo, los factores que influyen en este valor, las ventajas y desventajas de este parámetro y los métodos que existen para medir este parámetro en base a las normas existentes.

Capítulo III. - En este punto del proyecto primeramente se puntualizará los lugares de donde se extrajeron las muestras del suelo a usar para la elaboración de este proyecto esto mediante los diferentes métodos de extracción de muestras conocidos, seguidamente realizarán todos los ensayos de caracterización del suelo en base a las especificaciones de las normas existentes, además de la caracterización de la cal a usar para la estabilización, para luego centrarse en la variable principal del proyecto.

Capítulo IV. - Realizada toda la caracterización se procederá a la determinación de la variable principal de proyecto que es la permeabilidad de la arcilla CH, realizando la estimación del porcentaje de cal óptimo para la estabilización mediante el método del pH del suelo, para luego realizar el ensayo de permeabilidad del suelo mediante el equipo de permeabilidad de carga variable, una vez obtenidos los resultados de los ensayos se realizará el análisis estadístico tanto descriptivo como inferencial, este último en base a la hipótesis propuesta al principio del proyecto explicado en el capítulo I.

Capítulo VI. - En base a los resultados obtenidos, al marco teórico y a la bibliografía consultada se realizará las conclusiones a las cuales se llegó con este proyecto, seguido de esto se realizarán algunas recomendaciones para mejorar el procedimiento de las practicas realizadas en este proyecto u alguna observación que se pudiera realizar.

CAPÍTULO II

ESTADO DE CONOCIMIENTO SOBRE LA PERMEABILIDAD

2.1 Generalidades

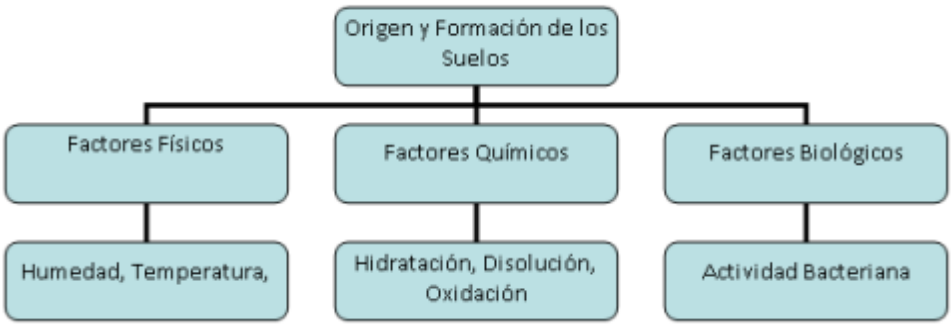
La finalidad del presente documento, es determinar si existe variación en el valor de la conductividad hidráulica o permeabilidad de materiales finos como la arcilla una vez sometido a una estabilización con cal, utilizando el permeámetro de carga variable. Para la realización de los ensayos se hará uso de los laboratorios de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, además de seguir lo indicado en la norma de ensayo ASTM D5084-90.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Suelos

En el sentido general de la ingeniería, suelo se define como el agregado no cementado de granos minerales y materia orgánica descompuesta (partículas sólidas) junto con el líquido y gas que ocupan los espacios vacíos entre las partículas sólidas. El suelo se usa como material de construcción en diversos proyectos de ingeniería civil y sirve para soportar las cimentaciones estructurales. Por eso, los ingenieros civiles deben estudiar las propiedades del suelo, tales como origen, distribución granulométrica, capacidad para drenar agua, compresibilidad, resistencia cortante, capacidad de carga, y otras más. [1]

Figura 2. 1 Origen y formación de los suelos



Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y alimentación (FAO)

[1] Fundamento de ingeniería geotécnica, Braja M. Das, página 1

2.2.2 Tipos de suelo

Los suelos son producidos por el intemperismo, es decir, por la fractura y rompimiento de varios tipos de rocas en piezas más pequeñas mediante procesos mecánicos y químicos, produciendo suelos residuales y suelos transportados.[2]

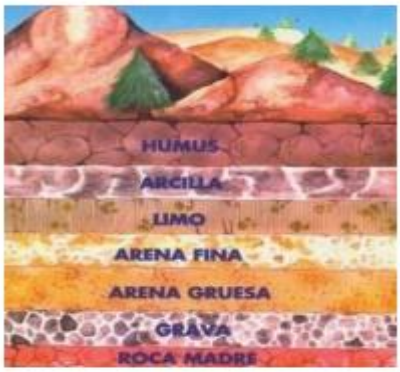
2.2.3 Suelos residuales

Son los suelos que permanecen donde se formaron como producto del ataque de los agentes del intemperismo, desintegración mecánica y/o descomposición química que cubren la superficie rocosa de la cual se derivan directamente.

2.2.4 Suelos transportados

Son aquellos suelos que fueron removidos o transportados desde su lugar de formación por la erosiona fluvial o la erosión eólica y son redepositados en otras zonas. Así se generan suelos que se depositan sobre otros estratos sin relación directa con ellos, como se puede ver en la Figura 2.3. En la naturaleza existen diferentes agentes de transporte, de los cuales pueden citarse como principales: los glaciares, el viento, los ríos, corrientes de aguas superficiales, los mares y las fuerzas de gravedad.

Figura 2. 2 Estratigrafía de suelos transportados



Fuente: Mecánica de suelos Juárez Badillo

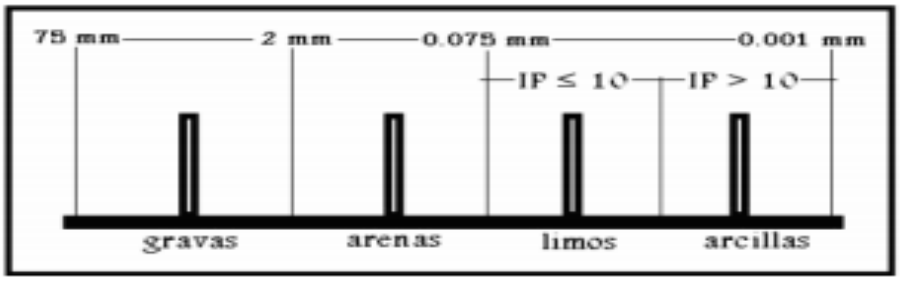
2.2.5 Tamaño de las partículas

Independientemente del origen del suelo, los tamaños de las partículas que lo conforman, varían en un amplio rango. Los suelos en general son llamados grava, arena, limo o arcilla, dependiendo del tamaño predominante de las partículas y de su índice de plasticidad. Para

[2] Fundamento de ingeniería geotécnica, Braja M. Das, página 1-2.

describir los suelos por sus partículas se presentan los límites de tamaños de suelo por separado, como puede verse en la Figura 2.4, presentado por la Asociación Americana de Funcionarios de Carreteras Estatales y del Transporte (ASSHTO).

Figura 2. 3 Rango de tamaños de partículas de un suelo



Fuente: AASHTO

2.2.6 Arcillas

Son partículas de granos muy finos en forma de escamas de mica, minerales arcillosos y otros minerales, con diámetro menor a 0.075 mm. y un índice de plasticidad mayor que 10, cuya masa se vuelve plástica al ser mezclada con agua, químicamente es un silicato de alúmina hidratado, aunque en pocas ocasiones contiene silicatos de hierro o de magnesio hidratados.

Las arcillas son constituyentes esenciales de gran parte de los suelos y sedimentos debido a que son, en su mayor parte, productos finales de la meteorización de los silicatos que, formados a mayores presiones y temperaturas, en el medio exógeno se hidrolizan[3].

A las arcillas las podemos clasificar o agrupar en varios y distintos puntos de vista:

Por su plasticidad.

Por su porosidad y color.

2.2.6.1 Estructura de los filosilicatos

Como veremos, las propiedades de las arcillas son consecuencia de sus características estructurales. Por ello es imprescindible conocer la estructura de los filosilicatos para poder comprender sus propiedades.

[3] Las arcillas: Propiedades y usos, Mercedes Suarez Barrios: Universidad de Salamanca, Emiliana García Romero: Universidad Complutense Madrid, pagina 3.

Las arcillas, al igual que el resto de los filosilicatos, presentan una estructura basada en el apilamiento de planos de iones oxígeno e hidroxilos. Los grupos tetraédricos (SiO)44- se unen compartiendo tres de sus cuatro oxígenos con otros vecinos formando capas, de extensión infinita y fórmula (Si2O5)2-, que constituyen la unidad fundamental de los filosilicatos. En ellas los tetraedros se distribuyen formando hexágonos. El silicio tetraédrico puede estar, en parte, sustituido por Al3+ o Fe3+.

Estas capas tetraédricas se unen a otras octaédricas de tipo gibbsita o brucita. En ellas algunos Al3+ o Mg2+, pueden estar sustituidos por Fe2+ o Fe3+ y más raramente por Li, Cr, Mn, Ni, Cu o Zn.

El plano de unión entre ambas capas está formado por los oxígenos de los tetraedros que se encontraban sin compartir con otros tetraedros (oxígenos apicales), y por grupos (OH)- de la capa brucitica o gibsitica, de forma que, en este plano, quede un (OH)- en el centro de cada hexágono formado por 6 oxígenos apicales.

2.2.6.2 Propiedades físico-químicos

Las importantes aplicaciones industriales de este grupo de minerales radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 mm).

Su morfología laminar (filosilicatos).

Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

Como consecuencia de estos factores, presentan, por una parte, un valor elevado del área superficial y, a la vez, la presencia de una gran cantidad de superficie activa, con enlaces no saturados. Por ello pueden interaccionar con muy diversas sustancias, en especial compuestos polares, por lo que tienen comportamiento plástico en mezclas arcilla-agua con elevada proporción sólido/líquido y son capaces en algunos casos de hinchar, con el desarrollo de propiedades reológicas en suspensiones acuosas.

2.2.6.2.1 Superficie especifica

La superficie específica o área superficial de una arcilla se define como el área de la superficie externa más el área de la superficie interna (en el caso de que esta exista) de las partículas constituyentes, por unidad de masa, expresada en m2/g.

Las arcillas poseen una elevada superficie específica, muy importante para ciertos usos industriales en los que la interacción sólido-fluido depende directamente de esta propiedad.[4]

2.2.6.2.2 Capacidad de intercambio iónico

Es una propiedad fundamental de las esmectitas. Son capaces de cambiar, fácilmente, los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes. La capacidad de intercambio catiónico (CEC) se puede definir como la suma de todos los cationes de cambio que un mineral puede adsorber a un determinado pH. Es equivalente a la medida del total de cargas negativas del mineral. Estas cargas negativas pueden ser generadas de tres formas diferentes:

Sustituciones isomórficas dentro de la estructura.

Enlaces insaturados en los bordes y superficies externas.

Disociación de los grupos hidroxilos accesibles.

El primer tipo es conocido como carga permanente y supone un 80 % de la carga neta de la partícula; además es independiente de las condiciones de pH y actividad iónica del medio. Los dos últimos tipos de origen varían en función del pH y de la actividad iónica. Corresponden a bordes cristalinos, químicamente activos y representan el 20 % de la carga total de la lámina.[5]

---

[4] Las arcillas: Propiedades y usos, Mercedes Suarez Barrios: Universidad de Salamanca, Emiliana García Romero: Universidad Complutense Madrid, pagina 8.
[5] Las arcillas: Propiedades y usos, Mercedes Suarez Barrios: Universidad de Salamanca, Emiliana García Romero: Universidad Complutense Madrid, pagina 9.

2.2.6.2.3 Capacidad de absorción

Algunas arcillas encuentran su principal campo de aplicación en el sector de los absorbentes ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar (esmectitas) o en los canales estructurales (sepiolita y paligorskita).

La capacidad de absorción está directamente relacionada con las características texturales (superficie específica y porosidad) y se puede hablar de dos tipos de procesos que difícilmente se dan de forma aislada: absorción (cuando se trata fundamentalmente de procesos físicos como la retención por capilaridad) y adsorción (cuando existe una interacción de tipo químico entre el adsorbente, en este caso la arcilla, y el líquido o gas adsorbido, denominado adsorbato).

La capacidad de adsorción se expresa en porcentaje de absorbato con respecto a la masa y depende, para una misma arcilla, de la sustancia de que se trate. La absorción de agua de arcillas absorbentes es mayor del 100% con respecto al peso.

2.2.6.2.4 Hidratación e hinchamiento

La hidratación y deshidratación del espacio interlaminar son propiedades características de las esmectitas, y cuya importancia es crucial en los diferentes usos industriales. Aunque hidratación y deshidratación ocurren con independencia del tipo de catión de cambio presente, el grado de hidratación sí está ligado a la naturaleza del catión interlaminar y a la carga de la lámina.

La absorción de agua en el espacio interlaminar tiene como consecuencia la separación de las láminas dando lugar al hinchamiento. Este proceso depende del balance entre la atracción electrostática catión-lámina y la energía de hidratación del catión. A medida que se intercalan capas de agua y la separación entre las láminas aumenta, las fuerzas que predominan son de repulsión electrostática entre láminas, lo que contribuye a que el proceso de hinchamiento pueda

llegar a disociar completamente unas láminas de otras. Cuando el catión interlaminar es el sodio, las esmectitas tienen una gran capacidad de hinchamiento, pudiendo llegar a producirse la completa disociación de cristales individuales de esmectita, teniendo como

resultado un alto grado de dispersión y un máximo desarrollo de propiedades coloidales. Si, por el contrario, tienen Ca o Mg como cationes de cambio su capacidad de hinchamiento será mucho más reducida.[6]

2.2.6.2.5 Plasticidad

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas.

La elevada plasticidad de las arcillas es consecuencia, nuevamente, de su morfología laminar, tamaño de partícula extremadamente pequeño (elevada área superficial) y alta capacidad de hinchamiento.

Generalmente, esta plasticidad puede ser cuantificada mediante la determinación de los índices de Atterberg (Límite Líquido, Límite Plástico y Límite de Retracción). Estos límites marcan una separación arbitraria entre los cuatro estados o modos de comportamiento de un suelo sólido, semisólido, plástico y semilíquido o viscoso (Jiménez Salas,1975).

La relación existente entre el límite líquido y el índice de plasticidad ofrece una gran información sobre la composición granulométrica, comportamiento, naturaleza y calidad de la arcilla. Existe una gran variación entre los límites de Atterberg de diferentes minerales de la arcilla, e incluso para un mismo mineral arcilloso, en función del catión de cambio. En gran parte, esta variación se debe a la diferencia en el tamaño de partícula y al grado de perfección del cristal. En general, cuanto más pequeñas son las partículas y más imperfecta su estructura, más plástico es el material.[7]

2.2.7 Composición de suelos

Se pueden clasificar en inorgánicos, como la arena, la arcilla, el agua y el aire; y orgánicos, como los restos de plantas y animales. Uno de los componentes orgánicos de los suelos es

---

[6] Las arcillas: Propiedades y usos, Mercedes Suarez Barrios: Universidad de Salamanca, Emiliana García Romero: Universidad Complutense Madrid, pagina 11.
[7] Las arcillas: Propiedades y usos, Mercedes Suarez Barrios: Universidad de Salamanca, Emiliana García Romero: Universidad Complutense Madrid, pagina 12.

el humus. El humus se encuentra en las capas superiores de los suelos y constituye el producto final de la descomposición de los restos de plantas y animales, junto con algunos minerales; tiene un color de amarillento a negro, y confiere un alto grado de fertilidad a los suelos.

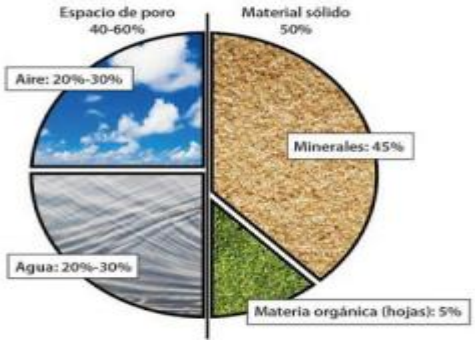
Fase Sólida. - Comprende, principalmente, los minerales formados por compuestos relacionado con la litosfera, como sílice o arena, arcilla o greda y cal.

Fase Líquida. - Comprende el agua de la hidrosfera que se filtra por entre las partículas del suelo.

Fase Gaseosa. - Tiene una composición similar a la del aire que respiramos, aunque con mayor proporción de dióxido de carbono (CO_2). Además, presenta un contenido muy alto de vapor de agua.

La Figura 2.7 representa un esquema de una muestra de suelo, con sus partes principales:

Figura 2. 4 Composición de un suelo



Fuente: Mecánica de suelos Juárez Badillo

2.2.8 Clasificación de suelos

2.2.8.1 Clasificación en base a norma AASHTHO

De acuerdo con el tamaño de las partículas que forman los suelos, la norma AASHTO M-145, los clasifica de la siguiente manera:

Grava. - De un tamaño menor a 76.2mm (3”) hasta el tamiz N° 10 (2mm).

Arena Gruesa. - De un tamaño menor a 2mm hasta el tamiz N° 40 (0.425mm).

Arena Fina. - De un tamaño menor a 0.425mm hasta el tamiz N° 200 (0.075mm).

Limos y Arcillas. - Tamaños menores de 0.075mm. Este sistema es básicamente un sistema de clasificación de los diferentes tipos de suelos en 7 grupos, cada uno de estos grupos está determinado por ensayos de laboratorio, granulometría, límite líquido e índice de plasticidad.

$$IG = (F - 35)\,(0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0{,}01(F - 15)\,(IP - 10)$$

Dónde:

IG= Índice de Grupo (Números enteros y si es negativo se informa igual a cero)

F= Porcentaje que pasa por 0.075 mm, expresado en números enteros

LL = Límite Líquido

IP= Índice de Plasticidad

Los grupos están designados desde el A-1 hasta A-7, como se presenta en la Tabla 2.1; El suelo A-1, es un suelo de propiedades óptimas para ser usado en las capas que conforman la estructura de un pavimento y en su orden ascendente de numeración, su comportamiento va decreciendo hasta llegar al suelo A-7, cuya aplicación en carreteras no es recomendable.

Materiales Granulares

A-1 Son suelos bien graduados de tamaño grueso y fino, con un débil aglomerante plástico.

A-1-a En estos se incluyen materiales predominantes de fracción de rocas grava, con o sin aglomerante.

A-1-b El material predominante es arena gruesa, con o sin un buen aglomerante. Algunos suelos del grupo A-1 carecen de finos, de manera que deberá agregar cierta cantidad de finos para formar una sub-base de buena calidad.

A-2 Estos se componen por una amplia porción de materiales granulares que no pueden clasificarse en el grupo A-1 por su contenido de finos y plasticidad.

Contienen materiales granulares con cantidades considerables de arcillas, los suelos del grupo A-2 son inferiores a los del grupo A-1 debido a su menor graduación y menos

aglomerantes. En periodo seco los suelos A-2 son muy estables como superficie de rodamiento, pero esto depende de la clase de aglomerante, sin embargo, en periodos húmedos se pueden ablandar y en periodos secos se pueden disgregar y formar polvaredas.

A-2-4 y A-2-5 Incluyen diversos materiales granulares que contienen un 35 por ciento máximo de material que pasa el tamiz 0.075 mm (N° 200)

A-2-6 y A-2-7 Incluyen materiales similares a los descritos en los subgrupos A-2-4 y A-2-5, excepto que la porción fina suelo cuenta con arcilla plástica de características similares a los grupos A-6 o A-7.

A-3 Estos suelos están compuestos de arenas deficientes en aglomerantes, como la arena de las playas. Se encuentran a menudo y son muy inestables excepto cuando están húmedos. Cuando se encuentran confinados son apropiados como bases para cualquier tipo de pavimentos.

Materiales Limo- Arcillosos

A-4 Son suelos muy comunes, predominan los limos con ligeros porcentajes de material grueso y pequeñas cantidades de arcilla.

A-5 Estos suelos se encuentran en muy pocas ocasiones, son muy parecidos a los del grupo A-4, excepto porque contienen mica y diátomas que los vuelven muy elásticos e inestables aun en estado seco, lo que los hace tenaces a la compactación.

A-6 El típico material de este grupo es un suelo arcilloso plástico, que tienen el 35 por ciento o más de material que pasa el tamiz de 0.075 mm (N° 200). Los materiales de este grupo suelen tener gran cambio volumétrico, cuando se tiene presencia de humedades altas en el suelo, debido a la presencia de arcillas.

A-7 Estos suelos están compuestos principalmente de arcilla como son los del grupo A-6, pero se diferencia de estos por la presencia de partículas uniformes de limo, materia orgánica y mica, lo que los hace muy elásticos.

A-7-5 Estos suelos del grupo A-7 tienen índices de plasticidad moderados en relación con límites líquidos, y pueden ser elásticos y expansivos.

A-7-6 Son suelos expansivos con altos índices de plasticidad en relación a los límites líquidos.

Tabla 2. 1 Clasificación de suelos según AASTHO M-145

Clasificación general	Materiales granulares (menos del 36 % pasa por el tamiz N°200)							Materiales limo arcillosos (más del 36% pasa por el tamiz N° 200)			
Grupo	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
Sub grupo	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				A-7-5
											A-7-6
Análisis granulométrico. Porcentaje que pasa por											
N° 10 (2,0 mm)	50 máx.										
N°40 (0,426 mm)	30 máx	50 máx	51 máx								
N° 200 (0,075 mm)	15 máx	25 máx	10 máx	35 máx	35 máx	35 máx	36 máx	36 máx	36 máx	36 máx	36 máx
Características de la fracción que pasa por el tamiz N° 40											
Limite liquido				40 máx	41 máx	40 máx	41 min	40 máx	41 min	40 máx	41 min
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx	10 máx	11 min	11 min	10 máx	10 máx	11 min	11 min
Materiales preponderantes	Fragmento de piedra, grava		Arena fina	Grava y arena limo arcillosa				Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Valor general como explanada	Excelente a bueno							Regular a malo			

Fuente: Clasificación de suelos de acuerdo a la norma AASTHO M-145

2.2.8.2 Clasificación de suelos SUCS ASTM D 2487-00

Este sistema fue propuesto por Arturo Casagrande como una modificación y adaptación más general a su sistema de clasificación propuesto en el año 1942 para aeropuertos.

Esta clasificación divide los suelos en:

Suelos de grano grueso.

Suelos de grano fino.

Suelos orgánicos.

Los suelos de granos grueso y fino se distinguen mediante el tamizado del material por el tamiz N° 200.

Los suelos gruesos corresponden a los retenidos en dicho tamiz y los finos a los que lo pasan, de esta forma se considera que un suelo es grueso si más del 50% de las partículas del mismo son retenidas en el tamiz N° 200 y fino si más del 50% de sus partículas son menores que dicho tamiz.

Los suelos se designan por símbolos de grupo. El símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo.

Los prefijos son las iníciales de los nombres en ingles de los seis principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turbas), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos.

Suelos gruesos. - Se dividen en gravas y arena, y se separan con el tamiz N° 4, de manera que un suelo pertenece al grupo de grava si más del 50% retiene el tamiz N° 4 y pertenecerá al grupo arena en caso contrario.

Suelos finos. - El sistema unificado considera los suelos finos divididos entre grupos: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas y limos y arcillas orgánicas (O).

Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez según su límite líquido, en dos grupos cuya frontera es Ll = 50%.

Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade al símbolo general la letra L (low compresibility).

Si es mayor de 50 se añade la letra H (high compresibility). Obteniéndose de este modo los siguientes tipos de suelos:

ML= Limos Inorgánicos de baja compresibilidad

OL= Limos y arcillas orgánicas

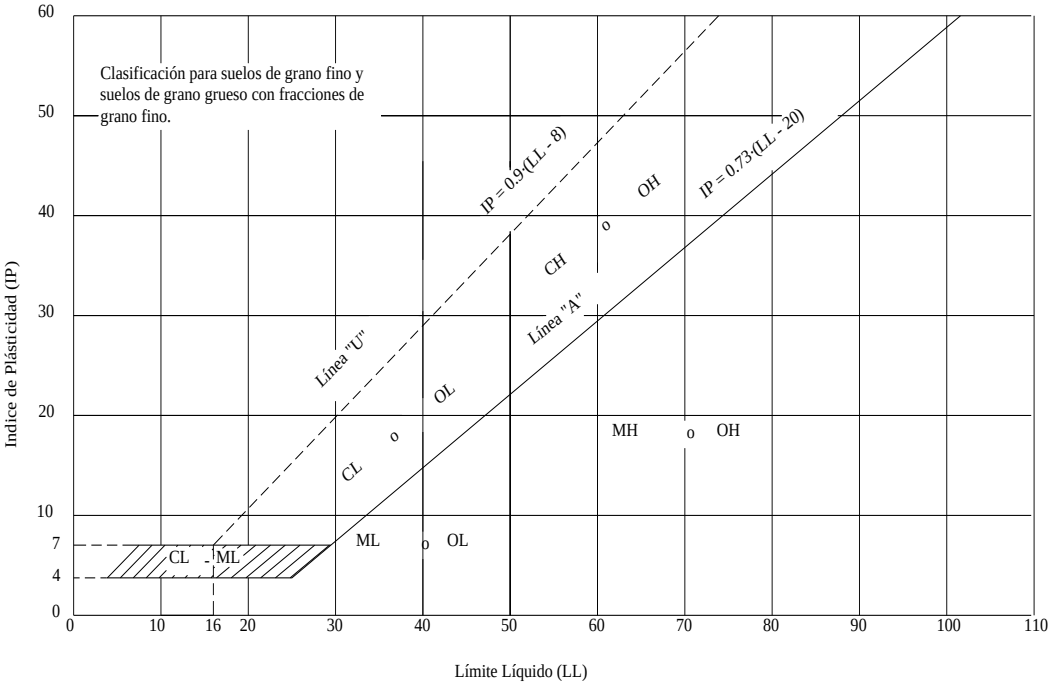
CL= Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad

CH= Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad

MH= Limos inorgánicos de alta compresibilidad

OH= Arcillas y limos orgánicas de alta compresibilidad

Tabla 2. 2 Carta de plasticidad



Fuente: Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Fracción Gruesa (FG)= 100% menos lo que pasa el tamiz N° 200. Para que el suelo sea una grava debe cumplirse lo siguiente: Retiene el tamiz N° 4 > ½ FG

Retiene el tamiz N° 4= 100 menos lo que pasa el tamiz N° 4

Para que el suelo sea arena debe cumplirse lo siguiente= Retiene el tamiz N° 4 < ½ FG

Las gravas con 5 a 12% de finos requieren el uso de símbolos dobles= GWGM grava bien graduada con limo; GW-GC grava bien graduada con arcilla; GP-GM grava mal graduada con limo; GP-GC grava mal graduada con arcilla.

Las arenas con 5 a 12% de finos requieren el uso de símbolos dobles= SWSM arenas bien graduada con limo; SW-SC arenas bien graduada con arcilla; SP-SM arena mal graduada con limo; SP-SC arena mal graduada con arcilla.

Cu = D60/D10 Cc = $D30^2$/D60*D10. Cu= Coeficiente de uniformidad; Cc=Coeficiente de curvatura.

En la Tabla 2.3 se describe el significado el significado de los grupos y siglas de la representación SUCS:

Tabla 2. 3 Clasificación de suelos ASTM D-2487

Criterios para la asignación de símbolos de grupo y nombre de grupo con el uso de ensayos de laboratorio					Clasificación de suelos	
					Símbolo de grupo	**Nombre de grupo**
Suelos de partículas gruesas. Más del 50% es retenido en la malla N°200	GRAVAS Mas del 50% o más de fracción gruesa es retenida en la malla N°4	Gravas limpias, menos del 5% pasa por malla N°200	Cu≥4 y Cc≤3		GW	Grava bien graduada
			Cu<4 y 1>Cc>3		GP	Grava mal graduada
		Gravas con finos, más del 12% pasa por malla N°200	IP<4 y se grafica en la carta de plasticidad debajo de la línea A		GM	Grava limosa
			IP>7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea A		GC	Grava arcillosa
		Gravas limpias y finos, entre el 5% y 12% pasa por malla N°200	Cumple con los criterios para GW y GC		GW-GM	Grava bien graduada con limo
			Cumple con los criterios para GW y GC		GW-GC	Grava bien graduad con arcilla
			Cumple con los criterios para GP y GM		GP-GM	Grava mal graduada con limo
			Cumple con los criterios para GP y GC		GP-GC	Grava mal graduad con arcilla
	ARENAS El 50% o más de fracción gruesa pasa la malla N°4	Arenas limpias, menos del 5% pasa por malla N°200	Cu≥6 y Cc≤3		SW	Arena bien graduada
			Cu<6 y 1>Cc>3		SP	Arena mal graduada
		Arenas con finos, más del 12% pasa por malla N°200	IP<4 y se grafica en la carta de plasticidad debajo de la línea A		SM	Arena limosa
			IP>7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea A		SC	Arena arcillosa
		Arenas limpias y finos, entre el 5% y 12% pasa por malla N°200	Cumple con los criterios para SW y SM		SW-SM	Arena bien graduada con limo
			Cumple con los criterios para SW y SC		SW-SC	Arena bien graduada con limo
			Cumple con los criterios para SP y SC		SP-SM	Arena mal graduada con limo
			Cumple con los criterios para SP y SC		SP-SC	Arena mal graduada con limo
Suelos de partículas finos. El 50% o más pasa la malla N°200	Limos y arcillas LL<50	Inorgánicos	IP>7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea A		CL	Arcilla de baja plasticidad
			IP<4 y se grafica en la carta de plasticidad debajo de la línea A		ML	Limo de baja plasticidad
		Orgánicos	Límite líquido-Secado al horno	<0,75	OL	Arcilla orgánica
			Límite líquido-No secado			Limo orgánico
	Limos y arcillas LL>50	Inorgánicos	IP>7 y se grafica en la carta de plasticidad arriba de la línea A		CH	Arcilla de alta plasticidad
			IP<4 y se grafica en la carta de plasticidad debajo de la línea A		MH	Limo de alta plasticidad
		Orgánicos	Límite líquido-Secado al horno	< 0,75	OH	Arcilla orgánica
			Límite líquido-No secado			Limo orgánico
Suelo Orgánico	Principalmente materia orgánica de color oscuro				PT	Turba

Fuente: Norma ASTMD-2487

Tabla 2. 4 Simbología de suelos ASTM-2487

Símbolo	G	S	M	C	O	PT	H	L	W	P
Descripción	Gravas	Arenas	Limo	Arcilla	Limo o arcilla orgánica	Limo y suelos altamente orgánicos	Alta plasticidad	Baja plasticidad	Bien graduada	Mal graduada

Fuente: Norma ASTM-2487

Las equivalencias entre el sistema de clasificación AASHTO y el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS), se pueden ver en la Tabla 2.5.

Tabla 2. 5 Relación de clasificación AASTHO-SUCS

Grupo del suelo en el sistema AASHTO	Comparación de los grupos de suelos en el sistema Unificado		
	Más Probable	Posible	Posible pero improbable
A-1-a	GW, GP	SW, SP	GM, SM
A-1-b	SW, SP, GM, SM	GP	—
A-3	SP	—	SW, GP
A-2-4	GM, SM	GC, SC	GW, GP, SW, SP
A-2-5	GM, SM	—	GW, GP, SW, SP
A-2-6	GC, SC	GM, SM	GW, GP, SW, SP
A-2-7	GM, GC, SM, SC	—	GW, GP, SW, SP
A-4	ML, OL	CL, SM, SC	GM, GC
A-5	OH, MH, ML, OL	—	SM, GM
A-6	CL	ML, OL, SC	GC, GM, SM
A-7-5	OH, MH	ML, OL, CH	GM, SM, GC, SC
A-7-6	CH, CL	ML, OL, SC	OH, MH, GC, GM, SM

Fuente: Norma AASHTO

2.2.9 Caracterización de los suelos

La caracterización de los suelos se lleva a cabo por medio de dos tipos de parámetros conocidos como parámetros de naturaleza y parámetros de estado. A continuación, se describe cada uno de ellos.

2.2.9.1 Parámetros de naturaleza

Se caracterizan porque no varían ni con el tiempo solamente cuando sufren manipulaciones que puedan realizarse a los suelos durante los trabajos, los más importantes son:

Variación volumétrica

Permeabilidad

Granulometría

Plasticidad

Límites de Atterberg

Índice de plasticidad

2.2.9.1.1 Variación volumétrica

Muchos suelos se expanden y se contraen debido a los cambios en su contenido de humedad. Las presiones de expansión se desarrollan debido a incrementos en la humedad, los cuales deben de ser controlados, ya que estas presiones pueden levantar pavimentos, inclinar postes, etc.; por lo cual, es de suma importancia detectar los suelos expansivos, su composición y el tratamiento más adecuado a seguir para evitar dichos problemas.

2.2.9.1.2 Permeabilidad

Se consideran importantes las presiones de poro y los relacionados con el flujo de agua a través del suelo; ya que estos dos fenómenos provocan su debilidad en su resistencia o su estabilidad.

2.2.9.1.3 Granulometría

Son los tamaños de los granos que participan (como porcentaje de peso total) de la composición del suelo que representan. Las propiedades físicas y mecánicas de los suelos son función directa de su granulometría y su determinación es fundamental para establecer su comportamiento mecánico, principalmente cuando se someten a cargas directamente.

2.2.9.1.4 Plasticidad

La plasticidad es la propiedad que tiene el suelo para cambiar de forma (dentro de un rango de humedad dado) y mantener sin perder volumen ni romperse cuando se someten a fuerzas de compresión.

2.2.9.1.5 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg o límites de consistencia se utilizan para caracterizar el comportamiento de los suelos finos. El nombre de estos es debido al científico sueco Albert Mauritz Atterberg. (1846-1916).

Los límites se basan en el concepto de que en un suelo de grano fino solo pueden existir 4 estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido, cuando está seco. Al 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.

Las propiedades de un suelo formado por partículas finamente divididas, como una arcilla no estructurada, depende en gran parte de la humedad. El agua forma una película alrededor de los granos y su espesor puede ser determinante para el comportamiento del material.

Para interpretar mejor estos límites se tomará de ejemplo una masa de arcilla. Cuando está tiene mucha cantidad de agua podríamos decir: se encuentra en estado líquido pues la arcilla se escurre con la facilidad de una masa líquida, pero a medida que se evapora el agua que contiene, va haciéndose un tanto plástica. Existe un momento en que la masa de arcilla pasa de estado “líquido” al estado “plástico”. Este límite entre los estados “líquido” y “plástico” se halla representado por el contenido de humedad del suelo y se llama límite líquido.

Si continua la evaporación de agua, la arcilla perderá plasticidad y llegar a secarse hasta adquirir una consistencia semisólida. Este paso del estado plástico al semisólido se le llama límite plástico, su valor está dado por el contenido de humedad que tiene la arcilla en tal estado límite.

Para luego tener un último límite que se encuentra en la frontera del estado semisólido al estado solidó, conocido como límite de contracción.

Límite líquido (LL). - Es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el vértice de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso.

Límite plástico (LP). - El límite plástico de un suelo es el más bajo contenido de agua en el que el suelo sigue presentando plasticidad.

Límite de contracción (Lc). - Es el contenido de humedad por debajo del cual no se produce reducción adicional de volumen o contracción en el suelo.

2.2.9.1.6 Índice de plasticidad (IP)

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. El IP se mide por dos pruebas simples en la mecánica de suelo: el límite líquido y el límite plástico; la diferencia entre los dos es el Índice de Plasticidad.

2.2.9.2 Parámetros de estado del suelo

Estos parámetros no son propios de las características del suelo sino de las condiciones ambientales en que se encuentran. Para los suelos sensibles al agua, el parámetro de estado que determina todas las condiciones de los rellenos, terraplenes y explanadas en las redes viales es el Estado Hídrico. Su determinación no puede hacerse exclusivamente con el cálculo del contenido en agua natural, sino que es necesario relacionarlo con el contenido de agua específico de suelo al que le corresponde un comportamiento particular. El método más corriente para indicar el estado hídrico de un suelo es referirse a los valores de los ensayos Proctor y CBR, realizados sobre cada suelo o clase de suelo a estudiar.

Los parámetros de suelo son:

Resistencia mecánica

Compactación

Capacidad portante

2.2.9.2.1 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.

2.2.9.2.2 Compactación

La "compactación" es el procedimiento resultante 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 estriba en el mejoramiento de las propiedades geotécnicas o de ingeniería del suelo.

2.2.9.2.3 Capacidad portante (CBR)

La capacidad portante es la capacidad del terreno para soportar las cargas aplicadas sobre él. Técnicamente la capacidad portante es la máxima presión media de contacto entre la cimentación y el terreno tal que no se produzcan un fallo por cortante del suelo o un asentamiento diferencial excesivo.

El ensayo CBR (California Bearing Ratio), consiste en medir la resistencia al punzonamiento de un suelo sobre las probetas confeccionadas por el procedimiento del ensayo Proctor y comparar los valores obtenidos con un valor de referencia patrón. Se mide así la capacidad portante del suelo o lo que es lo mismo su capacidad de soportar una carga para cada pareja de valores de densidad-humedad. Se expresa por el índice portante CBR en porcentaje del valor de referencia. Cuanto más elevado es el CBR más capacidad portante tiene el suelo.[8]

2.2.10 Definición de la estabilidad de suelos

La estabilización es el proceso de combinar o mezclar materiales con el suelo para mejorar sus propiedades. El proceso puede incluir la mezcla entre diversos tipos de suelos para alcanzar una graduación deseada (estabilización mecánica) o la mezcla del suelo con

[8] "Fundamentos de la Mecánica de suelos" Juárez Badillo E. y Rico Rodríguez, Tomo I, México 1978.

aditivos disponibles en el mercado (estabilización física y/o química), que puedan mejorar su graduación, textura o plasticidad. El principal fin de la estabilización es aumentar la resistencia mecánica, haciendo que el suelo presente mayor trabazón entre partículas y asegurando que las condiciones de humedad del suelo varíen dentro de los rangos adecuados. Con esto se logran tres objetivos importantes:

Adecuada estabilidad ante las cargas

Durabilidad de la capa

Una variación volumétrica mínima

2.2.11 Estabilización suelo-cal

La estabilización de suelos con cal parece ser más antigua forma de mejoramiento de suelos. Hay evidencias de que la Vía Apia, acceso a la antigua roma, se construyó utilizando estas técnicas. En términos generales, las técnicas de estabilización con cal hidratada son bastante similares a las de estabilización con cemento, pero hay dos aspectos de diferencia que conviene destacar desde un principio.

En primer lugar, la cal tiene un aspecto de aplicación que se extiende mucho más hacia los materiales más arcillosos que el cemento y en contrapartida, se extiende algo menos hacia el lado de los materiales granulares de naturaleza friccionante.

En segundo lugar, está el uso cada día más extendido que se hace de la estabilización con cal como un pre-tratamiento, lo que da una fisonomía especial a muchos de los usos de la cal, pues en estos casos no necesariamente han de satisfacerse todos los requerimientos de una estabilización definitiva. La forma más usual de la cal empleada en las estabilizaciones es la hidratada, óxidos o hidróxidos de calcio. Los carbonatos de calcio no tienen virtudes estabilizantes dignas de mención. La cal viva se utiliza en pre-tratamientos con suelos húmedos. El efecto básico de la cal es la constitución de los silicatos de calcio que se forman por la acción química de la cal sobre los minerales de arcilla, para formar compuestos cementadores.

La cal se prepara generalmente calentando carbonatos de calcio, muchas veces bajo la forma de calizas naturales, hasta que pierden su bióxido de carbono y devienen en óxidos

de calcio; el material resultante es cal viva, muy inestable y ávida de agua, lo que hace difícil su manejo y almacenamiento por lo que suele hidratarse de inmediato.

Hay dos tipos de reacciones químicas entre la cal y el suelo. La primera es inmediata e incluye una fuerte captación de iones de calcio por las partículas de suelo, lo que deprime su doble capa, a causa del incremento la concentración de cationes en el agua; a la vez ocurre otro efecto que tiende a expandir la doble capa por el alto pH de la cal. La segunda reacción tiene lugar a lo largo de lapsos considerables y es la reacción propiamente cementante; aunque no es completamente bien conocida, se atribuye a una interrelación entre los iones calcio de cal y los componentes aluminicos y silicosos de los suelos; de hecho, esta última reacción puede reforzarse añadiendo al suelo cenizas ricas en sílice.

La reacción cementante tiene lugar a través de la formación de silicatos de calcio y es muy dependiente del tipo de suelo que en ella intervenga; en esto, la estabilización con cal difiere mucho de la estabilización con cemento.

La cal tiene poco efecto en suelos muy orgánicos o en suelos sin arcilla, tiene su máximo efecto en las gravas-arcillosas, en las que puede producir mezclas inclusive más resistentes que las que se obtendrían con cemento. Ha obtenido su utilización más frecuente en arcillas plásticas, a las que hace, adicionalmente, más trabajables y fáciles de compactar, razón por la que se usa frecuentemente como pre-tratamiento, anterior a una estabilización con cemento, además de los muchos casos en que se usa como estabilizante definitivo.

El efecto de la cal en las arcillas es más rápido en las montmorilloniticas que el en las caoliniticas y en las primeras la cal logra resultados mucho más espectaculares en el aumento de resistencia y, sobre todo, en la disminución de la plasticidad. En las arcillas, la cal tiene también un importante efecto en la consecución de estabilidad volumétrica ante el agua. En la estabilización con cal debe evitarse el uso de aguas acidas.

La cantidad de agua que se emplee está regida por los procedimientos de compactación, pero si se usa cal viva podrían requerirse cantidades adicionales de agua en suelos con menos de 50% de contenido natural de dicho elemento.[9]

---

[9] Tesis: Propuesta de estabilización de suelos arcillosos para su aplicación en pavimentos rígidos, diciembre 2016, Zelaya Amaya Cesar Eduardo.

Figura 2. 5 Estabilización suelo-cal

Fuente: Estabilización de suelos Jaramillo

2.2.12 Tipo de suelos para estabilizar con cal

Los suelos que se usen para la elaboración de mezcla suelo-cal pueden ser del sitio de trabajo o provenir de préstamo seleccionado, deben estar limpios y es recomendable que estos no deban tener más del 1% de su peso en materia orgánica. Además, la fracción del suelo que pasa el tamiz N° 40 debe tener un índice de plasticidad no menor de 10. El tamaño máximo del agregado grueso que contenga el suelo no debe de ser mayor de 50 mm o 1/3 del espesor de la capa compactada de suelo-cal.

Los suelos con gran proporción de partículas finas, con una plasticidad alta, son más sensibles a la adición de cal que los suelos compuestos de arena y limos.

2.2.13 Definiciones de la cal

Es un producto resultante de la descomposición de las rocas calizas por la acción del calor. Estas rocas calentadas a más de 900 grados Celsius producen el óxido de calcio (CaO), conocido con el nombre de cal viva, producto solido de color blanco y peso específico de 3.4 g /cm3. Esta cal viva puesta en contacto con el agua se hidrata (apagado de la cal) con desprendimiento de calor. La adición de cal en materiales arcillosos para terracerías, revestimientos, sub-bases, bases, por sus diferentes reacciones, produce aumento en su límite líquido y mayor incremento en su límite plástico para generar así una disminución en su índice plástico; aumentando la estabilidad volumétrica de los materiales cohesivos.

2.2.14 Propiedades de la cal

Se hace cada vez más necesaria la utilización de la cal en los suelos arcillosos, por ello es necesario hacer una mención de las propiedades físicas y de sus propiedades químicas,

para hacer ver la calidad del producto calcáreo que se usara en una determinada estabilización.

2.2.14.1Propiedades físicas de la cal

Color. - Las cales comerciales tienen color blanco o débilmente gris, a veces un color rojizo debido al óxido de hierro que se encuentra en los yacimientos.

Densidad. - Esta propiedad depende de la temperatura de calcinación, cuando más alta es la temperatura de calcinación, mayor será la densidad de la cal viva.

Dureza. - La dureza de las cales varía entre muy blanda y una dureza que se aproxima a la de la piedra caliza original de donde se obtuvo, la dureza de la cal viva dependerá de la temperatura de calcinación.

Porosidad. - Depende del origen de las rocas calizas y de las condiciones en que se lleve a cabo la calcinación. La porosidad de la cal viva es importante porque influye en la actividad química de la sustancia.

Plasticidad. - Es una propiedad importante, que se define como la capacidad que posee una masa de cal para cambiar su forma cuando esta es sometida a presión, sin que se produzca ruptura en su forma generada.

2.2.14.2 Propiedades químicas de la cal

Impureza. - La composición química depende de la naturaleza y de la cantidad de impurezas que contenga la piedra caliza original.

Reacción de la cal con el agua. - La cal viva reacciona vigorosamente con el agua formando hidróxido de calcio y hay desprendimiento de calor; a este proceso se le conoce como hidratación o apagado de la cal.

Recarbonatación. - La humedad del aire cataliza la reacción entre el óxido de calcio y el dióxido de carbono del aire. La reacción general se produce mediante la formación del hidróxido de calcio que luego reacciona con el dióxido de carbono.

2.2.15 Cales utilizadas para la estabilización de suelos

Las cales que se pueden utilizar para este tipo de proceso son las cales aéreas. Estas presentan las siguientes características:

2.2.15.1 Cales vivas

Son cales aéreas que se componen principalmente de óxido de calcio y oxido de magnesio, producidas por la calcinación de la caliza.

Se comercializan en grano o molidas, incluso micronizadas. En contacto con el agua se hidrata 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.

2.2.15.2 Cales hidratados

Son las cales aéreas que se componen principalmente de hidróxido de calcio.

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

2.2.15.3 Cales 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 quieren conseguir las siguientes ventajas:

Supresión del polvo producido en el extendido de la cal.

Humidificación de los suelos secos.

2.2.16 Acción de la cal como estabilizante

La cal, agregada a ciertos suelos, produce diversos efectos que son puestos de manifiesto en las aplicaciones prácticas y en los laboratorios. Los efectos son los siguientes:

La cal hace que el suelo arcilloso se desmenuce más fácilmente y le confiere propiedades que, en cierto modo corresponde a los limos:

Reduce la plasticidad de los suelos

Favorece el secado de los suelos muy húmedos

Favorece la compactación de los suelos con humedades muy altas

Mejora la estabilidad de los suelos a efectos de las lluvias prolongadas

Incrementa la resistencia del suelo al esfuerzo cortante y esfuerzo de compresión

Reduce la influencia perniciosa de la materia orgánica

2.2.17 Análisis de los materiales a utilizar en la estabilización

Los suelos que componen la mezcla suelo – cal deben ser del propio camino o provenir, en todo o en parte, de préstamos seleccionados. Los sitios de préstamo deberán contar con suelos que cumplan con las propiedades requeridas por las normas AASHTO y ASTM para formar parte de la estructura de un pavimento.

Los suelos que se usen para la elaboración de mezcla suelo-cal deben estar limpios y recomendable que estos no deban tener más de uno por ciento (1%) de su peso de materia orgánica. Además, la fracción del suelo que pasa la malla N° 40 debe tener un índice de plasticidad no menor de 10. El tamaño máximo del agregado grueso que contenga el suelo no debe ser mayor de 50 mm o 1/3 del espesor de la capa compactada de suelo-cal.

2.2.17.1 Cal

La cal que se use para la mescla de suelo-cal puede ser cal viva o cal hidratada y debe satisfacer los requisitos establecidos bajo las especificaciones de la norma ASTM C- 977.

2.2.17.2 Agua

El agua que se use para la construcción de mezcla suelo-cal debe estar limpia, no debe contener materia orgánica y debe estar libre de sales, aceites, ácidos y álcalis perjudiciales.

2.2.18 Mezcla suelo-cal.

Los ensayos para determinar el porcentaje de cal y los demás requisitos que debe satisfacer la mezcla de suelo-cal deben ser ejecutados con los materiales que se vayan a usar, incluyendo el agua de mezclado, de acuerdo a la norma ASTM D 6276 (Método de ensayo estándar, usando el pH para estimar la proporción suelo-cal requerida para la estabilización de suelos).

El porcentaje óptimo de cal requerido en la estabilización del suelo, se determina mediante la estimación del pH, o determinando el índice de plasticidad más bajo requerido, como resultado de varias mezclas de suelo-cal con diferentes porcentajes de cal.

2.2.19 Propiedades de la mezcla suelo-cal

Las mezclas suelo-cal sufren una serie de modificaciones en sus propiedades índices, las cuales se mejoran y hacen que el suelo se comporte de diferente manera al suelo natural, estas modificaciones se dan con más frecuencia en las siguientes propiedades:

2.2.19.1 Resistencia

El empleo de cal aumenta la resistencia de los suelos aumentando su índice C.B.R. también aumenta las resistencias a tracción y a flexión, por lo tanto, la mejora producida en las capas y explanadas estabilizadas permite reducir espesores y posibilidades de fallo durante su vida útil.

2.2.19.2 Plasticidad

La adición de cal eleva el límite plástico de los suelos y reduce el límite líquido, principalmente en suelos muy plásticos, y puede tener el efecto contrario en los suelos de menor plasticidad.

2.2.20 Ventajas y desventajas de los diferentes métodos de aplicación de la cal

La técnica de estabilización con cal utilizada en un proyecto debería estar basada en múltiples consideraciones, tales como la experiencia del contratista, la disponibilidad de equipo, la ubicación del proyecto (rural o urbano) y la disponibilidad de una fuente cercana y adecuada de agua.

Cal hidratada en polvo

Ventaja. - Puede ser aplicada más rápidamente que la lechada. La cal hidratada en polvo puede ser utilizada para secar arcillas, pero no es tan eficaz como la cal viva.

Desventaja. - Las partículas hidratadas de cal son finas. De modo que el polvo puede ser un problema y este tipo de uso generalmente es inadecuado en áreas pobladas.

Cal viva en seco

Ventajas. - Económica porque la cal viva es una forma más concentrada de cal que la cal hidratada, conteniendo de 20 a 24 por ciento más de óxido de calcio "disponible". Así, aproximadamente 3 por ciento de cal viva es equivalente a 4 por ciento de cal hidratada, cuando las condiciones permiten la hidratación completa de la cal viva con suficiente humedad. Debido a su mayor densidad requiere de menos instalaciones de almacenaje.

Desventajas. - La cal viva requiere 32 por ciento de su peso en agua para convertirse en cal hidratada y puede haber pérdida adicional por la evaporación significativa debido al calor de hidratación. Se debe tener cuidado con el empleo de la cal viva para asegurar una adecuada adición de agua, fraguado y mezcla. Estos mayores requerimientos de agua pueden plantear un problema de logística o costos en áreas remotas sin una fuente cercana de agua. La cal viva puede requerir más mezcla que la cal hidratada seca o que las lechadas de cal, porque las partículas de cal viva, que son más grandes, primero deben reaccionar con el agua para formar la cal hidratada y luego debe ser mezclada con el suelo.

Lechada de cal

Ventaja. - Aplicación libre de polvo. Es más fácil lograr la distribución. Se aprovecha la aplicación por rociado. Se requiere menos agua adicional para la mezcla final.

Desventaja. - Velocidad lenta de aplicación. Costos más altos debido al equipo extra requerido. Puede no ser práctico en suelos muy mojados. No es práctico para secar.[10]

2.2.21 Permeabilidad en los suelos

Es la facilidad o dificultad que tiene un suelo de permitir que lo atraviese el agua a través de sus vacíos. Esto permite clasificar los suelos en: suelos permeables y suelos impermeables, la permeabilidad está influenciada por el tamaño de las partículas, espacio de los vanos y la estructura del suelo. La Tabla 2.6 y 2.7 muestra los valores de permeabilidad para diferentes tipos de suelos.[11]

---

[10] "Manual de estabilización de suelos con cemento o cal", Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.

[11] "Fundamentos de ingeniería geotécnica" Braja M. Das.

2.2.21.1 Ley de Darcy y el coeficiente de permeabilidad

Basándose en sus trabajos sobre la mecánica de fluidos, el ingeniero francés Henry Darcy descubrió que existe una relación entre la cantidad de agua que fluye a través de una superficie, el área de esta superficie y el gradiente hidráulico, Algunos ejemplos para los rangos del coeficiente de permeabilidad "k" (m/s) para distintos tipos de suelo no consolidados se muestra la Tabla 2.6 y 2.7.

Tabla 2. 6 Coeficiente de permeabilidad para diferentes tipos de suelo

Coeficiente de permeabilidad para diferentes tipos de suelo	
Tipo de suelo	**k(cm/s)**
Grava limpia	100-1
Arena gruesa	1-0,01
Arena fina	0,01-0,001
Arcilla limosa	0.001-0,00001
Arcilla	0,000001

Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica Braja M. Das pg.84

Tabla 2. 7 Intervalos de valores de "k" Permeabilidad

Valores de coeficientes de permeabilidad para diferentes tipos de suelos		
10^2	Gravas limpias	Muy buen drenaje
10^1		
10^0		
10^-1	Arenas limpias	Buen drenaje
10^-2		
10^-3		
10^-4	Mezclas grava-arena (arcilla fisuradas y alteradas) Arenas muy finas Limos y arenas limosas	Mal drenaje
10^-5		
10^-6		
10^-7	Limos arcillosos (>20% arcilla) Arcillas sin fisuras	Prácticamente impermeable
10^-8		
10^-9		

Fuente: Fundamentos de ingeniería geotécnica 4 ed.

Barcelona Cencage Learnig , 2013 pg. 78

Se dice que un suelo es permeable cuando tiene huecos o intersticios continuos.

Todos los suelos y todas las rocas satisfacen esta condición. Sin embargo, hay grandes diferencias en el grado de permeabilidad de los materiales térreos. La cantidad de agua que pasa a través de una roca densa puede ser tan pequeña que se acumule en la cara expuesta, sin embargo, el paso del agua a través de este material puede producir presiones de infiltración entre granos minerales, que pueden ser tan grandes como las que ejercen en los materiales más permeables, que estén bajo efecto de una carga hidráulica.

En los suelos la permeabilidad se plantea, en dos problemas básicos generalmente, la relación con la disipación de las presiones de poro y el flujo del agua a través del suelo. El tener presiones de poro excesivas puede originar deslizamientos de terracerías y el flujo del agua puede originar tubificacion y arrastres.

2.2.21.2 Factor que influye en la permeabilidad de los suelos

La permeabilidad se ve afectada por diversos factores inherentes tanto al suelo como a características del fluido circulante.

Los principales son:

La relación de vacíos

La temperatura del agua

La estructura y estratificación del suelo

La existencia de agujeros, fisuras, etc., del suelo

Grado de saturación

En los suelos que tengan cohesión el efecto del tamaño de los granos es aún más pronunciado, porque parte de la humedad del suelo que rodea las partículas finas de arcilla esta movilizada en las capas absorbidas. La relación de vacíos en un factor en la mayoría de los suelos y la permeabilidad es aproximadamente proporcional e^2. La forma de los granos y la graduación son también importantes especialmente en los suelos más gruesos, pero se dificulta expresar sus efectos cuantitativamente. El grado de saturación en un factor principal, porque el aire de los poros reduce el área de la sección transversal y hasta que pueda llegar a obstruir completamente algunos poros. Los minerales arcillosos influyen grandemente en la permeabilidad delos suelos, porque aparte del agua absorbida

están fuertemente adheridas a la superficie de la arcilla, que no se puede mover de una partícula a otra sin gradientes muy altos. Por lo tanto, la permeabilidad se una arcilla homogénea es corrientemente menor que lo que sugieren independientemente el tamaño de los granos o la ración de vacíos. Además, la permeabilidad es prácticamente cero para gradientes bajos, pero aumenta conforme aumenta el gradiente.

En estudios realizados sobre la permeabilidad en arcillas se obtuvieron resultados en los que se denoto que la permeabilidad era minia cuanto más cerca de la humedad optima se encontraba el espécimen, mientras que, por arriba de dicha humedad, se presenta un ligero incremento en la permeabilidad, mientras que por debajo de esta disminuye. El ligero incremento de la permeabilidad se debe a que, al compactar al suelo, el agua de compactación llena espacios que ocupan las partículas cuando nos encontramos en el lado seco y esto hace que le suelo, aunque con la humead cercana a la óptima. Al incrementar la energía de compactación se obtuvo una permeabilidad todavía menor debido a que se tiene una mejor orientación de las partículas, a la vez que se cerraba más la estructura.

Si se compacta un suelo con humedades muy bajas o prácticamente en seco, se obtendrá finalmente una alta permeabilidad del suelo debido a los grupos que no se disgregan, resistiendo al esfuerzo de compactación y permitiendo con ello que se forme una gran cantidad de vacíos intersticiales. Mientras más alta sea la humedad de compactación se producirían menores permeabilidades en el suelo compactado ya que este tiene mayores oportunidades de deformarse, eliminándose así grandes vacíos.

Se puede reducir la permeabilidad de un suelo mediante la inyección de lechadas. Sin embargo, debido a que estos productos, no sellan perfectamente a los poros finos, solamente se logra disminuir el gato y la velocidad sin lograr una impermeabilidad adecuada de algunos defloculantes como el polifosfato, pueden sellar perfectamente a un suelo.

En la actualidad se cuenta también con algunos aditivos líquidos y emulsiones que al penetrar en el suelo se adhieren a las paredes de los conductos capilares haciendo que le suelo sea parcialmente hidrofóbico, pero hay que tener en cuenta que los productos “hidrófobos” generalmente hacen que la cohesión del suelo, se reduzca parcialmente o totalmente.

Los métodos de estabilización para modificar la permeabilidad de un suelo, no necesariamente mejoran su estabilidad volumétrica o resistencia mecánica, y en algunos casos pueden inclusive resultar contraproducentes en estos aspectos.[12]

2.2.21.3 Permeabilidad en suelos estabilizados con cal

La evolución de la permeabilidad de los suelos arcillosos tratados con cal presenta dos etapas distintas. De forma inmediata, tras el mezclado, durante el proceso de modificación, el suelo pasa de arcilloso a arenoso lo cual supone un aumento de la permeabilidad.

Pero una vez transcurrido un cierto plazo, a medida que se desarrollan las reacciones puzolanicas y se forman los enlaces entre partículas del suelo, este se va cerrando, volviendo a reducir su permeabilidad hasta los valores iniciales o, incluso, menores. Con ello el suelo tratado con cal resulta finalmente del grado de estabilización propiamente dicha que se alcance con el tratamiento.[13]

2.2.21.4 Métodos de medición de la permeabilidad

Existen varios procedimientos para la determinación de la permeabilidad de los suelos, los podemos dividir básicamente en dos grupos: los “directos”, porque se basan en pruebas cuyo objetivo fundamental es la medición del coeficiente de permeabilidad, y otros “indirectos”, ya que proporcionan el valor del coeficiente de permeabilidad en forma secundaria, es decir, por medio de pruebas y técnicas diseñadas para otros fines. Los métodos son los siguientes (Juárez Badillo, Eulalio y Rico Rodríguez. (1989). “Mecánica de Suelos, Tomo I” Fundamentos de la Mecánica de Suelos. Editorial Limusa, Noriega Editores. México)

Directos:

Permeámetro de carga constante

Permeámetro de carga variable

Prueba directa en los suelos en el lugar

---

[12] “Fundamentos de ingeniería geotécnica” Braja M. Das.
[13] “Manual de estabilización de suelos con cemento o cal” Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.

Indirectos:

Cálculo a partir de la curva granulométrica

Cálculo a partir de la prueba de consolidación

Cálculo con la prueba horizontal de capilaridad

2.2.21.4.1 Ensayos de carga variable

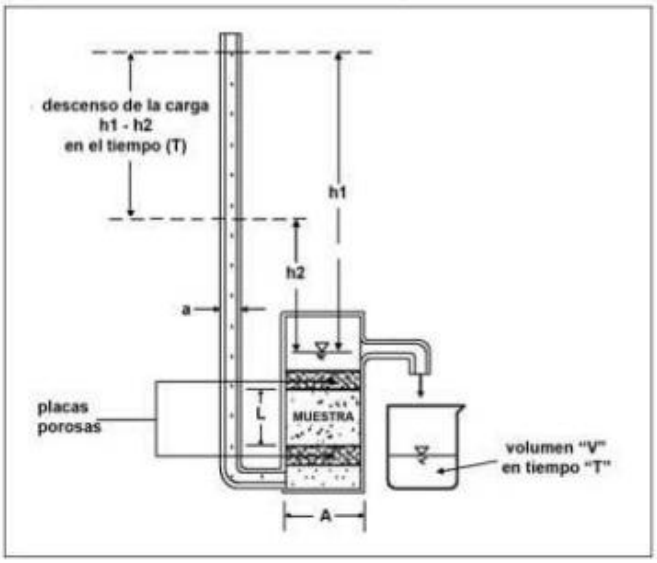
La prueba de carga variable se usa para determinar el coeficiente de permeabilidad de suelos finos, tales como arenas finas, limos y arcillas. Para estos suelos el flujo de agua que los atraviesa es demasiado pequeño para permitir mediciones precisas con el permeámetro de carga constante.

En un cilindro de 100mm de diámetro (generalmente) se introduce una muestra del suelo; si la muestra que se va a ensayar es inalterada el cilindro puede ser un tubo de 100mm, o bien el tubo corta núcleos que se usa en los ensayos densidad en campo las muestras también pueden prepararse por compactación en un molde de compactación estándar los extremos superior e inferior de la muestra se protegen con un filtro de malla de alambre y grava. La base del cilindro queda sumergida en un recipiente con agua que cuenta con un vertedor de nivel constante y el extremo superior se conecta a un tubo piezómetro abierto de diámetro conocido.

La prueba se lleva a cabo llenando la columna con agua y permitiendo que se produzca la infiltración a través de la muestra. Se registra la altura de agua en la columna a diferentes tiempos durante la prueba, y ésta se repite con tubos piezométricos de diferente diámetro.[14]

[14] Manual de laboratorio de suelos en ingeniería civil Joseph E. Bowles, Universidad Nacional de Colombia (Bogotá), año 1981.

Figura 2. 6 Permeámetro de carga variable



Fuente: Máximo Villón Béjar, Drenaje catálogo, Costa Rica 2006 pag. 117

$$k = \frac{a * L}{A * t} * \ln \frac{h1}{h2}$$

Donde:

L= Longitud de la muestra

H1, h2= Carga hidráulica en tiempos t1 y t2 respectivamente

A= Área de la muestra del suelo

a= Área del tubo de abastecimiento

t= Intervalo de tiempo entre el descenso de h1 a h2

k= Coeficiente de permeabilidad

2.3 Investigaciones relacionadas al tema de estudio

A continuación, se hace referencia a trabajos relacionados a nuestro tema de estudio, con el fin de ver las experiencias de otros investigadores y comparar resultados.

Estas comparaciones se reflejan en la siguiente tabla:

Tabla 2. 8 Investigaciones relacionadas al tema de estudio

N°	Suelo	% de cal optimo	Perm. suelo natural	Perm. suelo-cal	% de reducción	Investigación
1	CL	4	2,02x10-5	8,85x10-6	56,19	Guía básica para estabilización de suelos con cal en caminos de baja intensidad vehicular Por: Herber M. Huezo Maldonado
2	CH	5	1,015x10-6	3,452x10-7	65,99	Propuesta de estabilización de suelo arcilloso para su aplicación en pavimentos rígidos. Por: David Remberto Mejía Ramírez
3	CH	4	1,35769x10-6	2,55053x10-7	81,23	Comparación de permeabilidad en suelo arcilloso antes y después de ser estabilizado con cal Por: Ariel Paco Cáceres

Fuente: Elaboración propia

2.4 Marco normativo

Para la elaboración del presente proyecto hay diferentes ensayos de laboratorio para realizar por lo tanto para la correcta elaboración de estos ensayos hay seguir normas con

las que se cuenta, a continuación, se presenta la Tabla 2.9 donde se indica el tipo de ensayo y la norma con la cual se trabaja.

Tabla 2. 9 Marco normativo

Parámetro	Norma
Conservación y trasporte de muestras de suelos	ASTM D4220
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D422; AASTHO T88
Análisis granulométrico por medio de hidrómetro	ASTM D422
Determinación del límite líquido de los suelos	ASTM D318; AASTHO T89
Determinación del límite plástico e índice de plasticidad	ASTM D4318; AASTHO 90
Permeabilidad de suelos granulares (carga constante)	ASTM D2434; AASTHO 215
Preparación en laboratorio de mezclas de suelo-cal empleando una mezcladora mecánica	ASTM D3155G
Método estándar, usando el pH para estimar la proporción requerida para la estabilización de suelos	ASTM D6276
Expansión unidimensional, contracción y presión de levantamiento en mezclas de suelo cal	ASTM D3877

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO III

RELEVAMIENTO DE INFORMACIÓN

3.1 Introducción

En esta sección se presenta paso a paso todos los procedimientos que se llevan a cabo, para realizar el relevamiento de información, muestreo de suelo y posterior análisis del mismo en laboratorio (esto último se detalla en el capítulo IV).

Para el relevamiento de información se acudirá a todo libro, manuales de laboratorio, artículos publicados por autores entendido en el tema, pero sobre todo en las Normas tanto AASHTO como la ASTM, donde se indican los procedimientos de cómo llevar a cabo el muestro de suelos y sobre todo los ensayos de laboratorio que se deben realizar y como se deben realizar para obtener buenos resultados.

Una vez obtenidas las guías de cómo realizar los ensayos y demás procedimientos, se procede a la recolección de muestras de suelo de diferentes zonas de la ciudad de Tarija, con el fin de tener la mayor cantidad de muestras y así tener una mayor probabilidad de encontrar el suelo buscado (para este proyecto se busca un suelo CH clasificación SUCS), llevar estas muestras al laboratorio y realizar la caracterización de los mismos y seleccionar cuál de ellos cumple con las condiciones expuestas para este proyecto.

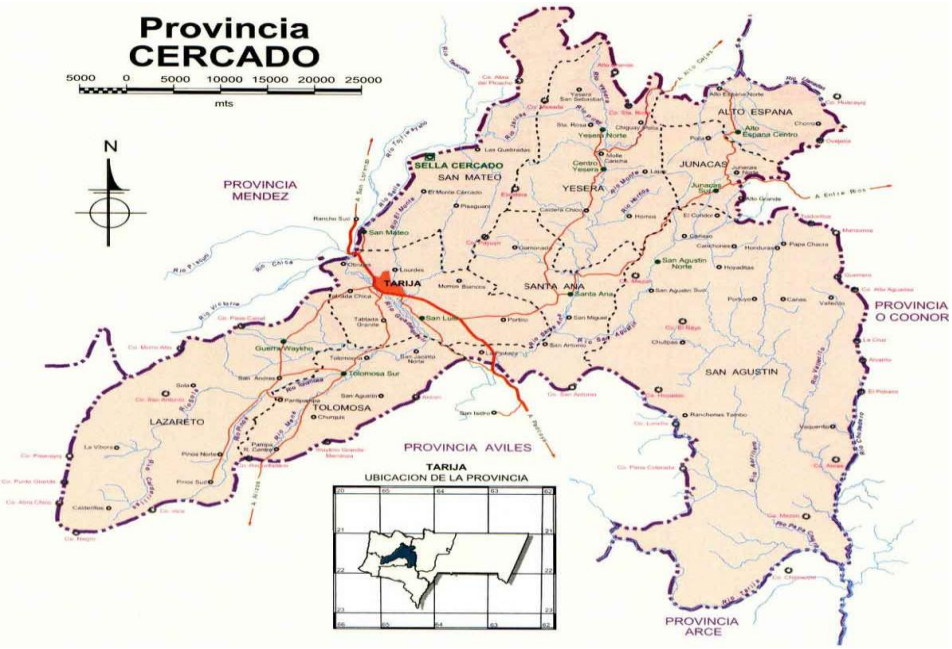
Después de esta caracterización, se tomará aquel suelo que cumpla con condición expuesta anteriormente, se trabajará solo con este y se realizarán los demás ensayos solo en este suelo, descartando las demás muestras.

Al suelo que cumpla con las condiciones deseadas se lo estabilizará con cal a un cierto porcentaje, que será el óptimo, esto por motivos de tiempo ya que se cuenta solo con 90 días más o menos para la realización de este proyecto, realizada la estabilización se volverá a realizar los ensayos característicos a la muestra suelo-cal, con el fin de ver la variación entre el suelo natural y el suelo estabilizado, se hará más énfasis en la variable de investigación de este proyecto que es la permeabilidad.

3.2 Ubicación de las zonas de extracción

El presente proyecto se lo realizara con muestras extraídas del Departamento de Tarija, más propiamente de su provincia Cercado, de sus diferentes zonas y barrios.

Figura 3. 1 Mapa de la provincia Cercado Tarija



Fuente: http:/cultj.blogspot.com/2014/09/Bolivia.html

Gran parte de la provincia Cercado está compuesta de arcillas, suelo que es predomínate en todos sus barrios, debido a esto se hace necesario la recolección de muestra de diferentes barrios para así asegurase de poder encontrar el suelo deseado.

Para aumentar la probabilidad de encontrar el tipo de suelo deseado se izó uso de otros proyectos de grado de años pasados donde también se trabajó con arcillas y mencionan algunas zonas o barrios de donde se presume exista el tipo de suelo buscado (CH clasificación SUCS).

3.2.1 Coordenadas Geografías y UTM de las zonas de extracción de muestras para la caracterización del suelo

A continuación, se presentan una Tabla donde indica los lugares de extracción de muestra para ser ensayados en el laboratorio y determinar su caracterización y verificar cuál de ellos cumple con los requisitos indicados a en el perfil de proyecto.

Tabla 3. 1 Coordenadas Geográficas y UTM

N°	Zona	Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM	
		O	S	E	N
1	Los Chapacos	64°42’42’’49,5	21°29’28,1’’	322454,3258	7622491,701
2	Carretera a Sella	64°42’47,7’’	21°28’58,6’’	322496,1974	7623399,537
3	Mercado Mayorista	64°41’31,4’’	21°33’0,0’’	324957,1341	7616001,262
4	INCERTAR	64°45’12,0’’	21°30’10,7’’	318367,230	7621136,043
5	Moto Méndez	64°42’20,7’’	21°32’6,9’’	323336,6476	7617616,898

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Mapa satelital de la zona de extracción de muestras de suelo

A continuación, se muestran imágenes satelitales de las zonas de extracción de muestras.

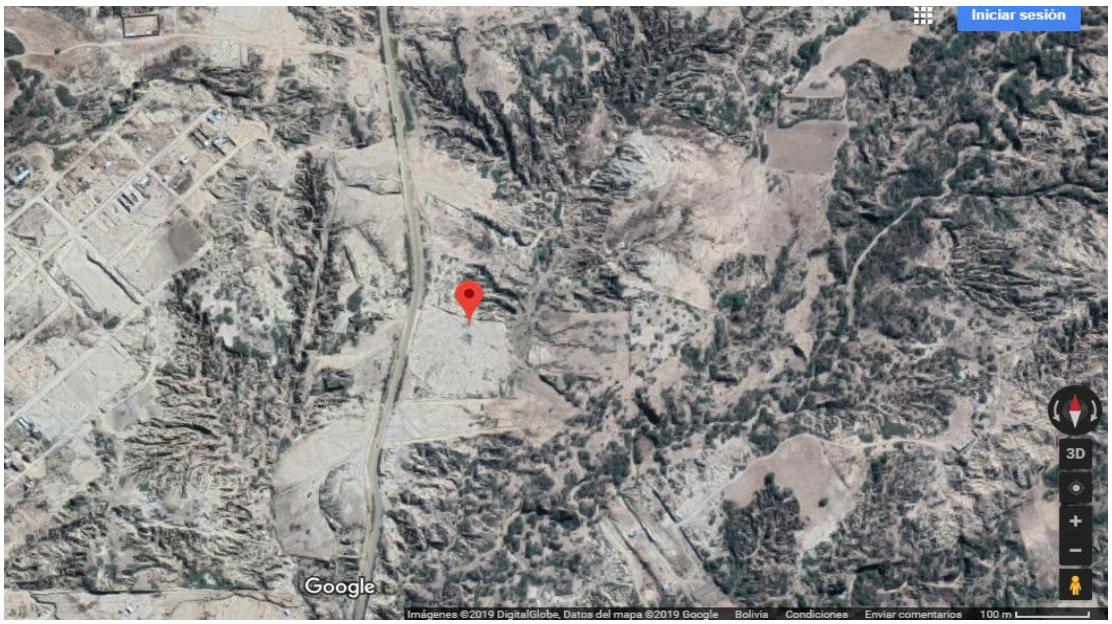
Zona de Los Chapacos. - Esta zona se encuentra a 4 km del centro de la ciudad de Tarija, sus coordenadas son 64°42’49,5’’ O y 21°29’28,1’’ S.

Figura 3. 2 Mapa satelital zona de Los Chapacos

Fuente: Google maps

Zona carretera a Sella Cercado. - este lugar de extracción de muestra se encuentra a unos 5 km del centro de la ciudad de Tarija, sus coordenadas son 64°42’47,7’’ O y 21°28’58,6’’ S.

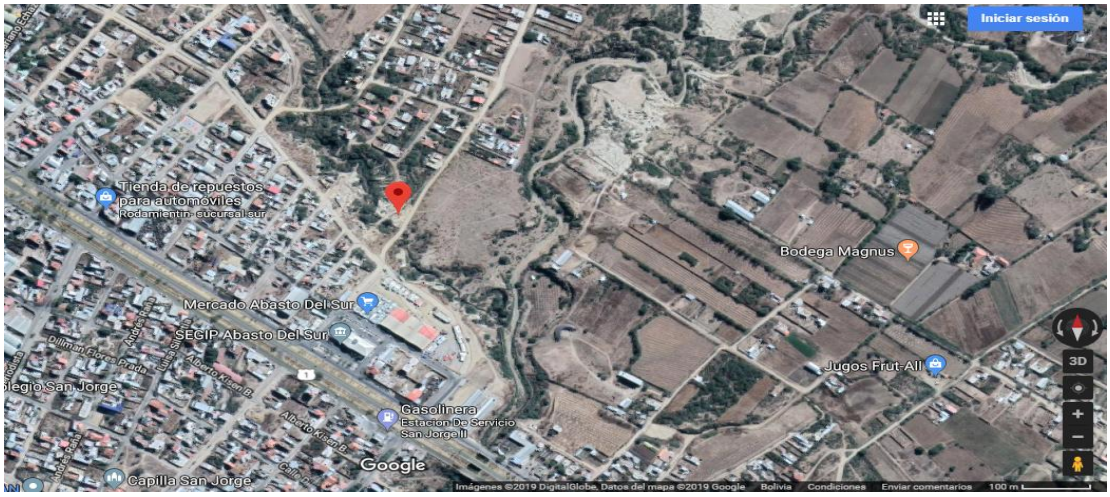
Figura 3. 3 Mapa satelital zona Carretera a Sella



Fuente: Google maps

Zona mercado Mayorista del Sur. - Esta zona se encuentra a 2,5 km del centro de la ciudad de Tarija, en el barrio constructor cerca al campo ferial, sus coordenadas son 64°42’31,4’’ O y 21°30’42,1’’ S.

Figura 3. 4 Mapa satelital del Mercado Mayorista del sur



Fuente: Google maps

Zona de la carretera a Tomatitas (INCERTAR). -La zona de extracción de la muestra se encuentra a 4 km del centro de la ciudad de Tarija, detrás de la empresa INCERTAR, las coordenadas de la zona son 64°45’12,0’’ O y 21°30’10,7’’ S.

Figura 3. 5 Mapa satelital zona INCERTAR

Fuente: Google maps

Zona de Moto Méndez. - la zona de extracción de la muestra se encuentra a 3 km del centro de la ciudad de Tarija, en el barrio moto Méndez en las coordenadas 64°42’20,7’’ O y 21°32’6,90’’ S.

Figura 3. 6 Mapa satelital zona Moto Méndez

Fuente: Google maps

3.3 Criterios de muestreo

3.3.1 Selección de la técnica de muestreo

Para el presente proyecto, el método, para determinar el tamaño de muestra, será un método probabilístico: El muestreo estratificado.

El muestreo estratificado consiste en dividir el proyecto en partes o sub estratos, en nuestro caso son los diferentes tipos de ensayos que se realizara para llegar a nuestro objetivo.

3.3.2 Tamaño de muestra

3.3.3 Datos para el cálculo del tamaño de muestra

Tabla 3. 2 Datos para el cálculo del tamaño de muestra

Datos para el cálculo	
Confiabilidad	95 %
Margen de error	5 %
Distribución normal “z”	1,96
Desviación estándar	0,10

Fuente: Elaboración propia

3.3.4 Número de ensayos (suelo natural)

Tabla 3. 3 Número de ensayos suelo natural

N°	Etapa	Ensayo	Ni
1	Caracterización	Contenido de humedad	2
2		Granulometría	7
3		Hidrómetro	1
4		Límites	8
5		Compactación	3
6	Pruebas y resultado	Permeabilidad	15

Fuente: Elaboración propia

3.3.4.1 Número de ensayos (suelo-cal)

Tabla 3. 4 Número de ensayos suelo-cal

N°	Etapa	Ensayo	Ni
1	Caracterización	Ensayo para estimar porcentajes de cal optimo	2
2		Granulometría	2
3		Hidrómetro	1
4		Límites	2
5		Compactación	3
6	Pruebas y resultado	Permeabilidad	15

Fuente: Elaboración propia

3.3.4.2 Tipo de suelo a ser sujeto a estudio (arcilla)

Por motivos de tiempo solo se hará el estudio de permeabilidad, para un solo tipo de arcilla

Tabla 3. 5 Tipo de suelo a usar

N°	Tipo de arcilla
1	CH (Clasificación SUCS)

Fuente: Elaboración propia

3.3.4.3 Porcentajes de cal

Para el presente proyecto se usarán diferentes porcentajes de cal, para así encontrar el porcentaje óptimo de cal para el tipo de suelo estudiado, dichos porcentajes se encuentran en la Tabla 1.10.

Tabla 3. 6 Porcentaje de cal

N°	% de cal
1	1
2	2
3	4
4	6
5	8

Fuente: Elaboración propia

3.3.4.4 Total, de ensayos

Tabla 3. 7 Total de ensayos

N°	Etapa	Ensayo	Ni
1	Caracterización	Contenido de humedad	2
2		Granulometría	9
3		Hidrómetro	2
4		Límites	10
5		Ensayo para estimar porcentajes de cal	2
		Compactación	6
6	Pruebas	Permeabilidad	30
Total			61

Fuente: Elaboración propia

3.3.5 Cálculo del tamaño de la muestra

Tabla 3. 8 Tamaño de muestra

Etapa	Ensayo	Cantidad	σ^2	Ni*σ^2	fi	n	ni
Caracterización	Contenido de humedad	**2**	0,10	0,2	0,03	44	**2**
	Granulometría	**9**		0,9	0,15		**6**
	Hidrómetro	**2**		0,2	0,03		**2**
	Límites	**10**		1	0,16		**7**
	Ensayo para estimar porcentajes de cal	**2**		0,2	0,03		**1**
	Compactación	**6**		0,6	0,10		**4**
Pruebas	**Permeabilidad**	**30**		3	0,49		**22**
		61		6,1			**44**

Fuente: Elaboración propia

$$ni = \frac{\sum(Ni * \sigma^2)}{N * \left(\frac{e}{z}\right)^2 + \frac{1}{N} * \sum(Ni * \sigma^2)} = 43{,}7$$

$$ni = 44$$

Donde:

ni= Número de ensayos finales

N= Número inicial de ensayos

σ = Desviación estándar

e= Margen de error

z= Distribución normal

3.4 Caracterización del suelo

3.4.1 Desarrollo o diseño

El suelo requerido para el desarrollo de este trabajo de graduación y para el cual se busca la proporción suelo-cal es CH (clasificación SUCS) o A-7-6 (clasificación AASTHO).

Para tal motivo se identificó varios lugares donde se presume existe este tipo de suelo, en la Tabla 3.1 se muestran los lugares de donde se extrajeron las muestras para ser estudiadas con el fin de identificar el suelo que se busca.

En base a las normas y especificaciones de los ensayos antes mencionados, a continuación, se presenta una guía paso a paso del proceso seguido para analizar los materiales que conformaran la mezcla suelo-cal, y el procedimiento realizado, para encontrar la dosificación adecuada de cal para lograr la estabilización del suelo en estudio.

3.4.2 Procedimiento a seguir para el análisis del suelo, previo y posterior a su estabilización

En esta sección se presenta paso a paso todos los procedimientos que se llevan a cabo para realizar los diferentes ensayos que permiten describir y analizar las propiedades del suelo natural.

3.4.3 Exploración de suelo y técnicas de muestreo (Normas ASTM D4220 y AASHTO T248)

Lo primero que se debe realizar es el muestreo de suelo objeto de estudio, conforme a la norma ASTM D4220 y AASHTO T 248 (para mayor información consultar norma).

El muestreo es igualmente importante como cualquier otro ensayo, y por lo cual el encargado de realizarlo tendrá mucho cuidado para obtener muestras que exhiban la naturaleza y condición de los suelos que representan.

Fotografía 3. 1 Extracción de muestra zona Moto Méndez

Fuente: Elaboración propia

Metodología de muestra a cielo abierto

El método de la extracción de la muestra de suelo de pozo a cielo abierto es el más satisfactorio, para conocer las condiciones del subsuelo, ya que consiste en excavar un pozo de dimensiones suficientes para que un técnico pueda directamente bajar y examinar los diferentes estratos de suelo en su estado natural, así como darse cuenta de las condiciones precisas referentes al agua contenida en el suelo. Desgraciadamente este tipo de excavaciones no puede llevarse a grandes profundidades a causa, sobre todo, de la dificultad de controlar el flujo de suelo de los diferentes estratos atravesados también influye grandemente en los alcances del método en sí.

Deben cuidarse especialmente los criterios, para distinguir la naturaleza del suelo “in situ” y la misma, modificada por la excavación realizada. En estos pozos se pueden tomar muestras alteradas e inalteradas de los diferentes estratos que se hayan encontrado. Las muestras alteradas son simplemente porciones de suelo que se protegerán contra perdidas de humedad introduciéndolas en frascos o bolsas empara finadas. Las muestras inalteradas deberán tomarse con precauciones, generalmente labrando la muestra en una pared que se practique al efecto en la pared del pozo. La muestra debe protegerse contra perdidas de humedad envolviéndola en una o más capas de manta debidamente impermeabilizada con brea y parafina.

Muestras de suelo en bolsas

Las muestras en bolsa se toman con pala u otra herramienta de mano conveniente y se colocan en bolsas sin tratar de mantener el suelo en condición inalterada.

En las bolsas introducir material suficiente para realizar todos los ensayos de laboratorio, la cantidad de suelo a extraer para realizar su caracterización en laboratorio será de 20kg.

Fotografía 3. 2 Extracción de muestra zona Los Chapacos y carretera a Sella

Fuente: Elaboración propia

3.4.4 Determinación de los límites de Atterberg

Material y equipo

Aparato de límite líquido (copa de casa grande)

Ranurador

Balanza con precisión de 0,01g

Recipiente para mezclado y almacenamiento (taras)

Espátula

Tamiz N° 40

Horno de secado

Placa de vidrio

Vidrio reloj

Procedimiento

Preparación de la muestra

Obtenga una cantidad representativa de la muestra total del suelo, la cual debe estar completamente seca para que los terrones puedan pulverizarse con facilidad y poder obtener un espécimen de suelo de 250 g después de tamizado, para luego obtener el límite líquido de la muestra, que es el contenido de humedad por debajo del cual el suelo se comporta como un material plástico, en base a la norma ASTM D 4318-00, (Para mayor información consultar norma), valor que servirá para clasificar el suelo.

Fotografía 3. 3 Preparación de muestra para el ensayo de limite liquido

Fuente: Elaboración propia

El procedimiento que se lleva a cabo para realizar el ensayo será el que se describe a continuación

Se pulverizo la muestra de suelo seco con un mortero y un pistilo, teniendo cuidado de no quebrar las partículas para hacerlas pasar por la malla N° 40.

Tamizar el material por la malla N° 40 (425µm, agitando el tamiz con la mano para asegurar la separación completa de la fracción más fina.

El material que no pasa la malla N° 40 es regresado al mortero y se repiten los procesos de pulverizado y cribado hasta que la mayoría del material fino haya sido disgregado y el material retenido consista en granos individuales para poder obtener una muestra de 250g de peso.

Una vez obtenida la cantidad requerida de material para realizar el ensayo coloque la muestra en un plato y agregue agua con un recipiente para poder hidratar por completo la muestra de suelo, mezcle bien la muestra con una espátula.

Fotografía 3. 4 Equipo casa Grande y muestra de suelo para ensayo

Fuente: Elaboración propia

Este proceso se repite hasta que la muestra esta hidratada y haya formado una pasta dura, posteriormente, se realiza el ensayo con el equipo casa grande.

3.4.4.1 Límite líquido

Se mezcla bien el material hidratado, inmediatamente antes de iniciar el ensayo.

Tomar con la espátula una porción de suelo y colóquela en la copa de latón del dispositivo de casa grande, distribuyéndola con el menor número de golpes de espátula posibles, hasta que se obtenga un espesor de aproximadamente 10 mm como máximo y se deje nivelada la superficie en un plano horizontal.

El suelo remanente se devuelve al plato, luego se divide la masa del suelo de la copa de Casagrande utilizando un ranurador, trazando una línea del punto más alto al punto más bajo en el borde de la copa, cuando haga la ranura, sostenga el acanalador contra la superficie de la copa de latón haciendo un movimiento circular de adelante hacia atrás. Manteniéndolo perpendicular a la superficie de la copa de Casagrande durante todo el movimiento.

Fotografía 3. 5 Equipo Casagrande más muestra

Fuente: Elaboración propia

Se levanta y deja caer la copa por medio de una manivela a una frecuencia de 1,9 a 2,1 caídas por segundo, hasta que las dos mitades del suelo al dar los golpes se unan en el fondo de la ranura, una distancia de 13mm (1/2 pulg.)

Para obtener el valor del límite líquido plotee la relación entre el contenido de agua (%w) y el número correspondiente de golpes de la copa en un gráfico. El contenido de agua en las ordenadas (Y), y el número de golpes en las abscisas (X). Luego dibuje la mejor línea recta para unir lo mejor posible los tres o más puntos ploteados.

Tome el contenido de agua de la intersección de la línea de las abscisas correspondiente a 25 golpes con la línea que une la dispersión de los valores registrados que se proyecta hasta cortar con una línea horizontal a las ordenadas como el límite líquido.

3.4.4.2 Límite plástico

Seleccione 20g o más del espécimen de suelo preparado para el ensayo de límite líquido o del suelo restante de dicho ensayo. Luego reduzca el contenido de humedad del suelo hasta que posea una consistencia en la cual pueda rolarse sin adherirse a las manos cuando sea extendido o se mezcle continuamente en una superficie plana y horizontal.

Seleccione una porción de suelo de la muestra de 20g que se tomó anteriormente para formar una pasta elipsoidal. Luego rolé esta masa de suelo colocándola entre la palma de la mano o los dedos y una superficie horizontal lisa con suficiente presión, hasta hacer un hilo de diámetro uniforme de aproximadamente 3 mm a lo largo de su longitud en un lapso de tiempo máximo de 2 minutos.

Fotografía 3. 6 Ensayo de limite plástico

Fuente: Elaboración propia

Cuando haya alcanzado el diámetro requerido del hilo de suelo, desmenuce está en varias porciones. Seguidamente junte las porciones y amáselas de nuevo hasta darles una forma aproximadamente elipsoidal. Rolé el suelo nuevamente hasta que el hilo sea de un diámetro de 3mm y repita todo el proceso anterior hasta que aparezcan grietas en el o se quiebre bajo presión del amasado y ya no sea posible formarlo de nuevo.

Determine la masa del suelo con el recipiente y regístrelas en la hoja de datos correspondiente. El proceso se repite hasta que en el recipiente haya por lo menos 6g de suelo. Luego se registra la masa del recipiente con el suelo húmedo y se determina posteriormente el contenido de humedad del suelo en el recipiente, de acuerdo con el método ASTM D 2216.

3.4.4.3 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad de un suelo es el rango en el contenido de agua, expresado como porcentaje de la masa de suelo secada en horno, dentro del cual el material se encuentra en un estado plástico; siendo la diferencia numérica entre el límite líquido y límite plástico del suelo.

Para los suelos objeto de estudio se obtuvo el siguiente resultado:

Tabla 3. 9 Tabla resumen de límites de Atterberg

Tabla resumen de límites de Atterberg ASTM D4318			
Muestra	Límite líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
Carretera a Sella	39	15	24
INCERTAR	35	18	17
Mercado Mayorista	40	23	17
Moto Méndez	57	38	119
Los Chapacos	60	29	31

Fuente: Elaboración propia

3.4.5 Material más fino que pasa el tamiz N° 200 en agregado mineral por lavado ASTM D4222 y AASHTO T88

Equipo necesario

Serie de tamices (N°10, N°40, N°200)

Balanza de 0,1 y 0,01 gramos de precisión

Bandejas

Procedimiento

Este procedimiento cubre la determinación de la cantidad de material más fino que el tamiz de 75µm (N° 200) en suelo por lavado en base a la norma AASHTO T 11-99 (Para mayor información consultar norma). Partículas de arcilla y otras partículas de agregado que se dispersan por el agua de lavado, así como materiales solubles en agua, pueden ser removidas del suelo durante este ensayo.

Secar la muestra de ensayo hasta alcanzar una masa constante, a una temperatura de 110 ± 5 ° C (230 ± 9 ° F). Determinar la masa con una precisión del 0,1 por ciento de la masa de la muestra de ensayo.

Después de secar y determinar la masa, colocar la muestra de ensayo en la bandeja y agregar suficiente agua para cubrirla. Ningún detergente, agente dispersante, u otra sustancia se añadirá al agua. Agitar la muestra con suficiente vigor para que haya una separación completa de todas las partículas más finas que el tamiz de 75-µm (N° 200) de

las partículas más gruesas, y que el material fino quede en suspensión. El uso de una cuchara grande u otra herramienta similar para revolver y agitar el suelo en el agua de lavado tiene resultados satisfactorios. Inmediatamente vierta el agua de lavado conteniendo los sólidos suspendidos y disuelva sobre el tamiz N° 200.

Fotografía 3. 7 Muestra para ensayo de granulometría método de lavado

Fuente: Elaboración propia

Añada una segunda cantidad de agua a la muestra en el recipiente, agitar, y decantar como antes. Repetir esta operación hasta que el agua de lavado salga clara.

Fotografía 3. 8 Lavado de muestra

Fuente: Elaboración propia

Regresar todo el suelo retenido en el tamiz N° 200, limpiando con un chorro de agua la muestra lavada. Secar el suelo lavado hasta obtener masa constante a una temperatura de 110 ± 5 ° C (230 ± 9 ° F) y determinar la masa con una precisión del 0,1 por ciento de la masa original de la muestra.

Fotografía 3. 9 Secado, pesado de muestra

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en la realización de este ensayo utilizando agua de chorro para, el suelo en estudio son los que a continuación se presentan:

Tabla 3. 10 Tabla resumen de granulometría método de lavado (suelo natural)

Tabla resumen de granulometría método de lavado ASTM D422									
Muestra	**Granulometría**								
	% que pasa el Tamiz								
	3"	2"	1"	3/4"	3/8"	4	10	40	200
Carretera a Sella	100	100	100	100	100	100	100	99,93	99,55
INCERTAR	100	100	100	100	100	100	100	99,89	99,60
Mercado Mayorista	100	100	100	100	100	100	100	99,82	99,07
Moto Méndez	100	100	100	100	100	100	100	99,88	99,68
Los Chapacos	100	100	100	100	100	100	100	98,86	97,24

Fuente: Elaboración propia

3.4.6 Clasificación de suelos AASHTO M 145-91 Y ASTM D 2487

Una vez que se tiene una muestra representativa del material selecto, se procede a clasificar el suelo, en base a la norma AASHTO M 145-91(2000) (Para mayor información consultar norma), y también por la clasificación SUCS en base a la norma ASTM D 2487

3.4.6.1 Clasificación de suelos por método AASHTO M 145-91(2000)

Se describe un procedimiento para clasificar los suelos en siete grupos, basada en datos de laboratorio y determinación de la distribución del tamaño de partículas, límite líquido,

e índice de plasticidad. La evaluación de los suelos dentro de cada grupo se realiza por medio de un "índice de grupo," que es un valor calculado a partir de una fórmula empírica. El grupo de clasificación, incluido el índice de grupo debe ser útil para determinar la calidad relativa de los suelos ocupados en la construcción de estructuras con movimientos de tierra, especialmente terraplenes, bases, sub-bases.

Tabla 3. 11 Ejemplo de clasificación de suelos método AASHTO

Clasificación de suelos AASHTO M-145

Datos de Granulometría:

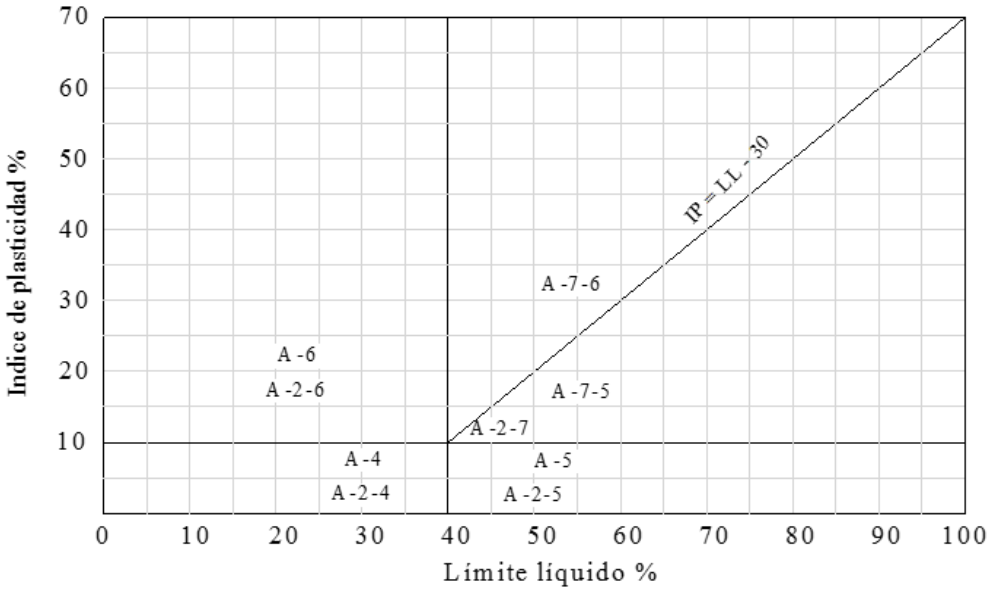
% Pasa tamiz N° 10=	**100**
% Pasa tamiz N°40=	**99,93**
% Pasa tamiz N° 200=	**99,55**

Datos de límites de Atterberg:

LL=	**39**	IP=	**24**
LP=	**15**		

Índice de Grupo: $$IG = 0,2 * a + 0,005 * a * c + 0,01 * b * d$$

a=	64,55	**b=**	55		
c=	0	**d=**	13,90	**IG=**	21



Clasificación del suelo	Descripción
AASHTO	A-6 (21)

Fuente: Elaboración propia

3.4.6.2 Clasificación de suelos por el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) ASTM D 2487

La clasificación del suelo de acuerdo al SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) ASTM D 2487-00 (Para mayor información consultar norma), basa la clasificación de los suelos para propósitos ingenieriles; mediante el análisis de diferentes parámetros como lo son el límite líquido e índice de plasticidad.

A continuación, se presentan un ejemplo de la clasificación de suelos por el método SUCS para muestras desuelo extraídas:

Tabla 3. 12 Ejemplo de clasificación de suelos método SUCS

Clasificación de suelos SUCS ASTM D 2487

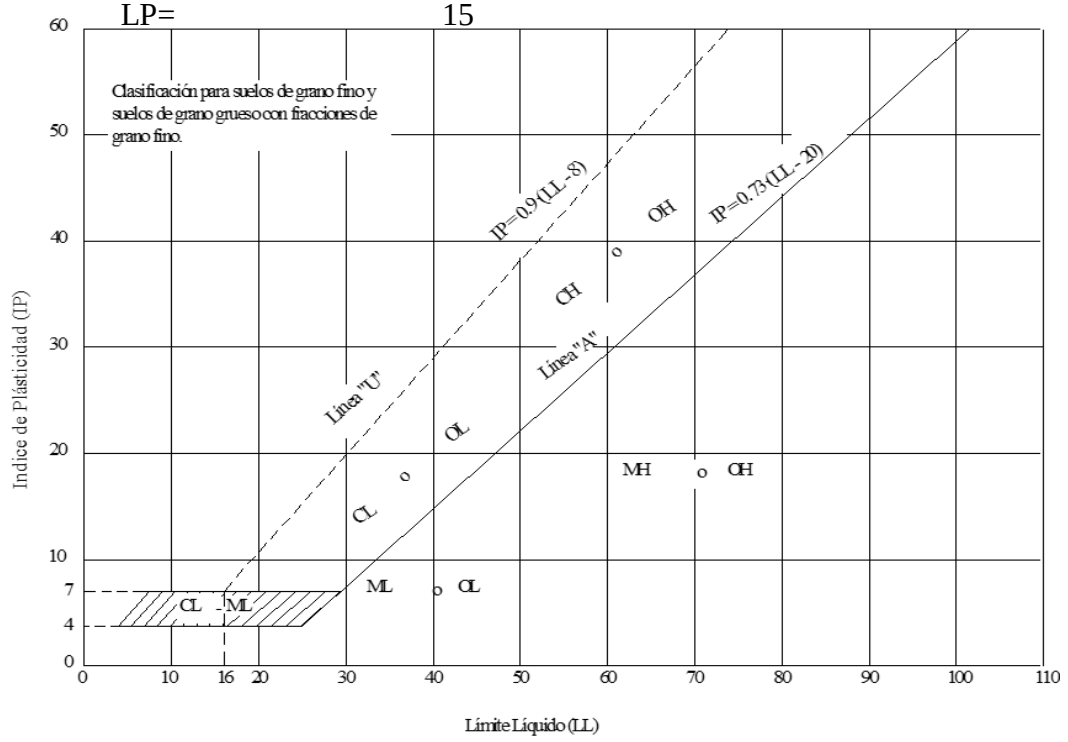
Datos de Granulometría:

% Pasa tamiz N° 200= 99,55

Datos de límites de Atterberg:

LL= 39 IP= 24

LP= 15



Clasificación del suelo		Descripción
SUCS	CL	Arcilla ligera

Fuente Elaboración propia

3.5 Selección de la muestra para realizar la estabilización

Después de realizar los ensayos de límites de Atterberg y granulometría se procedió a clasificar el suelo resultados que se muestran en la siguiente Tabla:

Tabla 3. 13 Tabla resumen de clasificación de suelos

Tabla resumen de clasificación de suelos AASHTO M-145 y ASTM D2487				
Clasificación de suelos				
Muestra	**AASHTO**			**SUCS**
	Clasificación	**Índice de grupo**	**Descripción**	**Clasificación**
Carretera a Sella	A-6	21	Suelo arcilloso	CL arcilla ligera
INCERTAR	A-6	13	Suelo arcilloso	CL arcilla ligera
Mercado Mayorista	A-6	13	Suelo arcilloso	CL arcilla ligera
Moto Méndez	A-7-5	13	Suelo arcilloso	CH arcilla densa
Los Chapacos	A-7-5	22	Suelo arcilloso	CH arcilla densa

Fuente: Elaboración propia

Según los datos obtenidos se observa que el suelo que cumple con los requisitos que se enunciaron al principio de este trabajo, donde se indica que dicho trabajo se lo realizara en un suelo que sea CH según la clasificación SUCS o un A-7-6 según clasificación AASHTO, es la extraída de la zona de Los Chapacos, por tal motivo los siguientes ensayos se los realizara en este suelo, dejando de lado las demás muestras.

3.5.1 Determinación de la gravedad especifica de los sólidos ASTM D 854-02

Material y equipo

Frasco volumétrico, con marca de enrase

Balanza con precisión de 0,01 g

Horno de secado

Termómetro

Tamiz N° 200

Pipeta

Hielo

Accesorios baño María frio y caliente

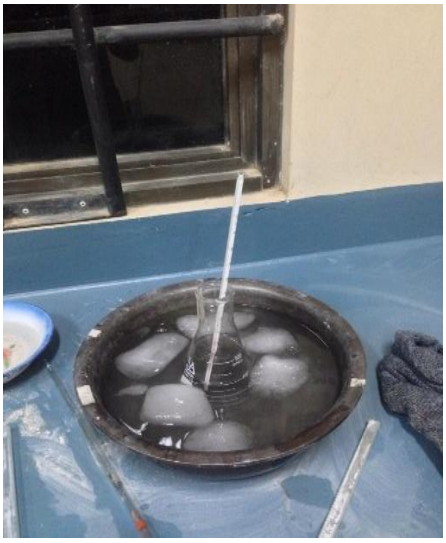
Procedimiento

Calibración de frasco volumétrico

Se observa que los vasos volumétricos de vidrio, cuando son expuestos a diferentes temperaturas, sufren ligeros cambios en su volumen es decir si se aumenta la temperatura, el vidrio tiende a la dilatación incrementando ligeramente su volumen y cuando se disminuye la temperatura su volumen también disminuye. El agua sufre un incremento en su peso cuando se aumenta su temperatura o viceversa.

Estos cambios si bien no son considerables, pueden corregirse a través de la realización de una curva de calibración para cada frasco volumétrico.

Fotografía 3. 10 Calibración de frasco volumétrico



Fuente: Elaboracion propia

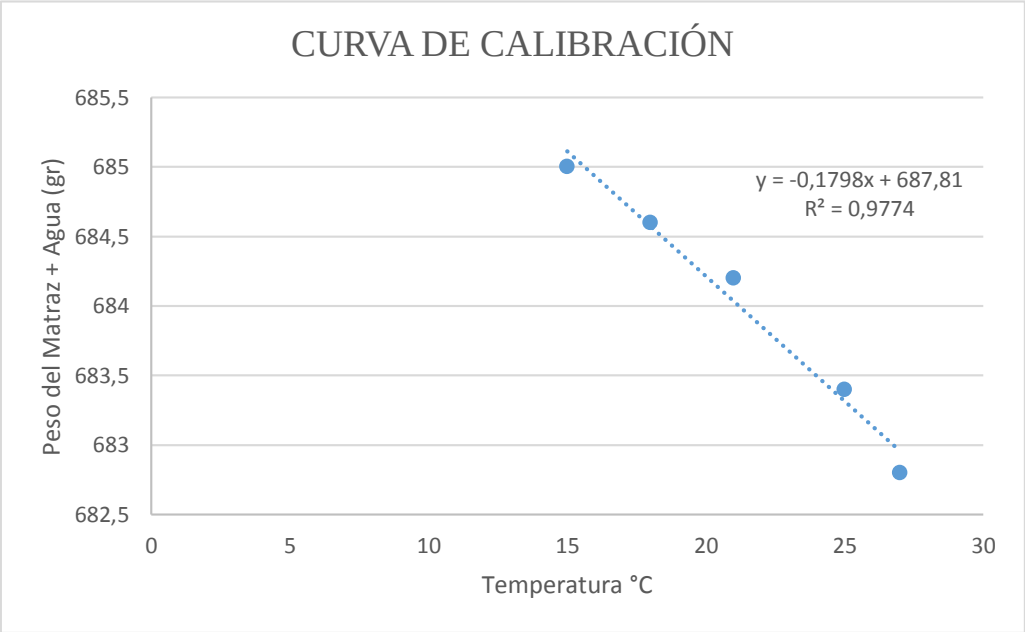
A continuación, se presenta la calibración del frasco que se trabajara para obtener el peso específico relativo del suelo en estudio.

Tabla 3. 14 Calibración de frasco volumétrico

Gravedad específica de los sólidos ASTM D854-02

Calibración de frasco volumétrico

N° De Ensayos	Peso Del Frasco + Agua (gr)	Temperatura (°C)
1	681,70	40
2	682,80	27
3	683,40	25
4	684,20	21
5	684,60	18
6	685,00	15



Fuente: Elaboración propia

Determinación del peso específico relativo

Para esta investigación, se escoge el Método B el cual consiste en obtener la gravedad específica mediante un suelo seco, el cual se describe de la siguiente manera:

Fotografía 3. 11 Gravedad específica de los sólidos

Fuente: Elaboración propia

Para la muestra de suelo tamice el material a utilizar en la prueba por el tamiz N° 200, obteniendo una cantidad, según el tipo de suelo. Si el tipo de suelo a utilizar es arcilla entonces tomar 50 ± 10 g del material tamizado. Seque la muestra del suelo en un horno a una temperatura de 110 ± 5°C hasta obtener una masa constante.

Tabla 3. 15 Tabla de peso específico para diferentes suelos

Tipo de suelo	Masa del espécimen seco (g), para matraz de 500 ml)
SP,SP-SM	100 ± 10
SP-SC, SM,SC	75 ± 10
Limo o Arcilla	50 ± 10

Fuente: Norma ASTM

Determine y registre la masa del frasco volumétrico (Matraz) limpio y seco, utilizando una balanza de 0,1 g de legibilidad. Realice este procedimiento al menos 3 veces, para obtener un promedio de los pesos. Luego llene el frasco volumétrico (Matraz) a una cantidad de ½ del bulbo, obtenga y registre su peso en la balanza, coloque un embudo en

el matraz, (verificando de esta manera que el cuello de este sobrepase más allá de la marca de calibración). Seguidamente deposite el espécimen del suelo directamente en el embudo y con la varilla con papel toalla limpie con mucho cuidado el cuello del matraz sin tocar el agua del fondo.

Obteniendo la lechada (agua y suelo), agite el frasco volumétrico con cuidado y tome su peso y regístrelo como (peso del matraz + agua + suelo). Luego llene de agua destilada el frasco volumétrico hasta una altura que llegue donde empieza el cuello.

En la etapa de ebullición o extracción de aire, vierta agua en una olla a un nivel de ¾ de su capacidad y colocarla en una cocina a una temperatura media, colocando en ella el matraz con la lechada. Para extraer el aire atrapado en el frasco volumétrico agite las veces que sean necesarias y séquelo con una franela, la duración de la etapa de extracción de aire debe tener como mínimo unas 2 horas, hasta que la lechada deje de expulsar burbujas de aire y por último, se retira de la olla y se seca con franela para poder dejarlo reposar y que su temperatura baje.

Utilice la balanza de 0,1g de legibilidad y obtenga la masa de suelo + agua + matraz (aforado) y posterior a ello tome la temperatura del matraz + agua +suelo con el termómetro de 0,1 °C de legibilidad y de esta manera registre ambas lecturas en la hoja de datos correspondientes a este ensayo.

Cuando se tiene los datos del peso del matraz + agua + suelo y la temperatura de ensayo, entonces con estos datos valla a carta de calibración del matraz y obtenga el dato del peso del matraz + agua (aforado) y encuentre la gravedad específica mediante la siguiente formula:

$$G_s = \frac{W_s}{W_{m+a} + W_s + W_{m+a+s}}$$

Donde:

Gs= Gravedad específica

Ws= Peso de suelo

Wm+a= Peso matraz más agua

Wm+a+s= Peso matraz más agua más suelo

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la gravedad específica de los sólidos de las muestras.

Tabla 3. 16 Tabla resumen de gravedad específica de los sólidos

Tabla resumen de gravedad específica de los sólidos ASTM D854-02

N° Ensayo	Gravedad Específica de los sólidos
1	2,68
2	2,67

Valor de la gravedad específica de los sólidos de la muestra suelo

N° Ensayo	Gravedad Específica de los sólidos
Promedio	2,68

Fuente: Elaboración propia

3.5.2 Determinación del tamaño de las partículas por ensayo de hidrometría ASTM 422-63

Material y Equipo

Para determinar el tamaño de las partículas se realiza en ensayo de granulometría por sedimentación en el cual se utilizan los siguientes instrumentos:

Muestra de suelo “secada al aire”

Agente dispersor y/o de floculante

Balanza sensible a 0,01 g

Hidrómetro graduado para leer ya sea la gravedad especifica o gramos/litro de la suspensión

Cilindros de sedimentación (probetas): con una capacidad de 1000 ml

Termómetro con una precisión de 0.5°C (1°F)

Tamiz N° 200

Cronometro

Pipeta

Recipientes para muestras

Procedimiento

Exponga al aire la muestra de suelo recibida de campo a la temperatura ambiente, hasta que seque completamente y luego pasar por el tamiz No 200.

Tome 60 g de muestra, para realizar el ensayo y determinar su humedad higroscópica según la norma ASTM D 422-63.

Fotografía 3. 12 Preparación de muestra para ensayo de hidrómetro

Fuente: Elaboración propia

Preparación de la solución dispersante (defloculante)

Utilizando una balanza de 0,01g de legibilidad, obtenga una masa de 20 g de hexametafosfato de sodio. Deposite agua destilada o desmineralizada en una probeta de 500 ml (hasta la mitad de la altura) y agregue el agente dispersor (hexametafosfato de sodio) en ella. Luego agite la solución hasta que el hexametafosfato de sodio se disuelva completamente y se agrega agua hasta completar los 500 ml.

Fotografía 3. 13 Probeta más muestra de suelo

Fuente: Elaboración propia

Determinación de la corrección por menisco (Cm)

Limpiar con alcohol la superficie del vástago del hidrómetro y se sumerge en una probeta de 1000 ml llena con agua destilada o desmineralizada. Y tome dos lecturas en la escala graduada del hidrómetro, una de ellas en la parte superior del menisco y la otra en la parte inferior (siguiendo la superficie horizontal del agua). Registre la corrección del menisco (Cm) como la diferencia de las lecturas tomadas anteriormente:

Determinación de la corrección por defloculante

Limpiar con alcohol la superficie del vástago del hidrómetro, y se sumerge en una probeta de 1000 ml parcialmente llena con agua destilada, posteriormente tome una lectura en la parte inferior del menisco en la escala graduada del hidrómetro, y luego se retira de la probeta.

Agregar 125 ml de la solución dispersante y complete el llenado de la probeta con agua.

Agitar la solución, y luego sumerja nuevamente el hidrómetro tomando una nueva lectura en la parte inferior del menisco. Registre la corrección por defloculante (Cd) como la diferencia de las lecturas tomadas.

Determinación de la corrección por temperatura (Ct)

Se registró cada una de las temperaturas en cada una de las lecturas del hidrómetro en la probeta de ensayo. Posteriormente, determine la corrección para cada una de las temperaturas registradas, utilizando Tabla de factores de corrección por temperatura para el análisis granulométrico de un suelo por sedimentación dada por la norma ASTM D 422-63.

Dispersión e Hidrometría de la muestra de suelo

Se colocó la cantidad de 60g en un Erlenmeyer de 250 ml, y se agregan 125 ml de la solución dispersante. Posteriormente agite utilizando una varilla de vidrio hasta formar una lechada, luego se deja reposar por lo menos 16 horas.

Transfiera la lechada de suelo-agua antes preparada, al agitador mecánico y enjuague cualquier remanente en el Erlenmeyer con agua destilada o desmineralizada, luego agregue agua si es necesario, llenando hasta un nivel de 2/3 del vaso agitador. Posteriormente agite por un periodo de 1 minuto.

Luego, colocar la lechada a una probeta graduada y agregue agua destilada hasta que su volumen total sea de 1000 ml, enjuagando el vaso para prevenir la perdida de material remanente.

Se tapa con un tapón el extremo de la probeta, posteriormente se agita por un periodo de 1 min, haciéndola girar en un plano vertical de 180°. El número de giros durante el minuto deberán ser 60, contando hacia arriba y abajo como dos giros.

Colocar la probeta con la lechada sobre una mesa fija, y active simultáneamente el cronometro y tome las lecturas del hidrómetro y temperatura en los intervalos de tiempo: 2, 5, 15, 30, 60, 250, 1440 y 2880 minutos, insertando cuidadosamente el hidrómetro en aproximadamente 20 a 25 segundos antes de cada lectura.

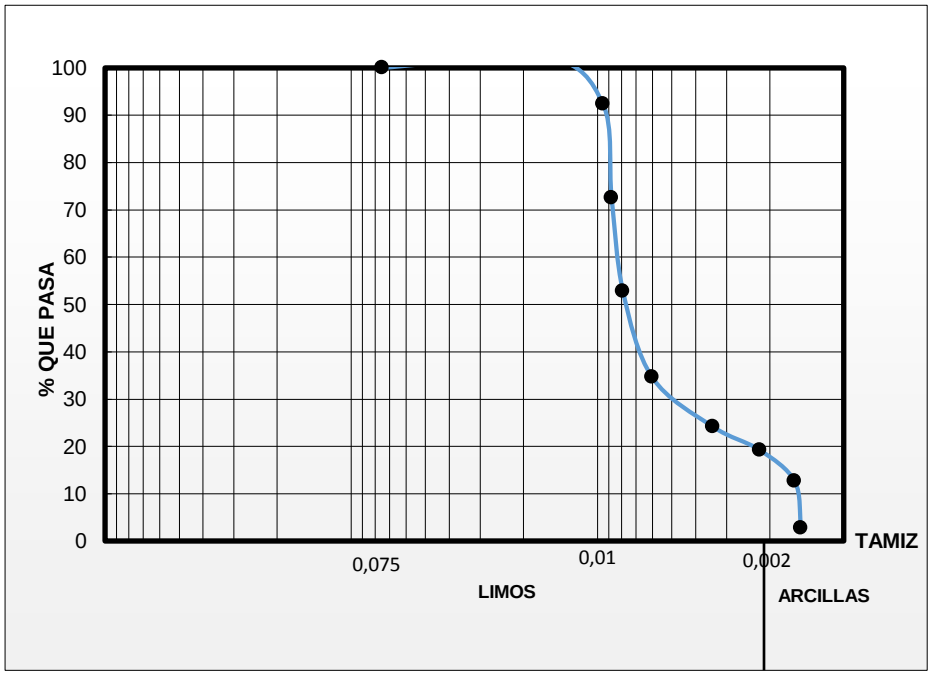
A continuación, se presentan resumidamente los resultados del análisis granulométrico e hidrométrico de las muestras de suelo natural.

Tabla 3. 17 Tabla resumen de ensayo de hidrómetro

Tabla resumen del análisis granulométrico por hidrómetro ASTM D422

Diam. Partícula mm	% Más Fino
0,075	100,00
0,016	102,30
0,009	92,40
0,008	72,60
0,007	52,80
0,006	34,65
0,003	24,25
0,002	19,30
0,001	12,71
0,001	2,80

% Pasa 200 =	100,00
% Limo parcial =	80,90
% Arcilla parcial =	19,1
% Pasa 200 del total =	96,48
% Limo del total =	78,05
% Arcilla del total =	18,43



Fuente: Elaboración propia

3.5.3 Determinación en laboratorio del contenido de agua (humedad) de los suelos y rocas a través de su masa ASTM D 2216-03

Lo primero para seguir con el análisis del suelo en estado natural es poder calcular el contenido de humedad de muestras de suelo en base a la norma ASTM D 2216-03 (Para

mayor información consultar norma), ya que esta labor se repetirá en todos los ensayos que precede al estudio de los mismos.

La determinación del contenido de humedad es un ensayo rutinario para determinar la cantidad de agua presente en un suelo en términos de su peso seco.

Podría definirse el contenido de humedad como la relación de la masa de agua contenida en los espacios porosos de un suelo o roca a la masa sólida de partículas en ese material, expresado como un porcentaje.

Procedimiento

Seleccione el tamaño de la muestra, para determinar el contenido de humedad en base a las especificaciones del ensayo que se desee realizar.

Debido a que el suelo analizado, para fines de investigación consta de una muestra alterada, utilizar el método que a continuación se describe:

Es posible la manipulación sin pérdida de humedad y sin segregación.

Tome material con una cuchara grande y mézclelo completamente.

Reduzca al tamaño requerido por medio del cuarteo o separación.

Si no es posible la manipulación ni el mezclado y/o separado, usar una cuchara.

Fotografía 3. 14 Preparación de muestra para ensayo de contenido de humedad

Fuente: Elaboración propia

Ejecución

Determine y registre el peso del recipiente (o tara) del espécimen limpio y seco (y su tapadera si se utilizará).

Coloque el espécimen de ensayo húmedo en el recipiente. Determine el peso del recipiente y el material húmedo utilizando una balanza de 0,01g. de precisión, para especímenes con masa hasta 200g. o una balanza de precisión de 0,1g. para especímenes mayores de 200g.

Coloque el recipiente con material húmedo en el horno de secado, seque el material hasta que alcance una masa constante. Manteniendo el horno de secado a una temperatura de 110 + 50C.

Retire el recipiente del horno, después de secar el material, déjelo enfriar junto con el material a temperatura ambiente o hasta que el recipiente pueda ser manejado cómodamente sin necesidad de utilizar guantes y así esto no afecte el funcionamiento de la balanza.

Tabla 3. 18 Tabla resumen de contenido de humedad

Tabla resumen del contenido de humedad en suelos ASTM D2216-03	
Método del horno	
Muestra N°	**%W**
1	6,50
2	6,94
Promedio	6,72

Fuente: Elaboración propia

3.5.4 Compactación AASHTO T 99-03

Se sabe que el suelo está formado por partículas de tamaño y forma variada, y que entre estos existen espacios intergranulares llamados vacíos, que se hallan llenos a la vez por aire, agua o ambos.

Así mismo, sabemos que cuando una masa de suelo se encuentra en estado suelto ocupa mayor volumen, porque tiene mayor número de vacíos. En cambio, cuando comprimimos esta masa de suelo se hace más compacta y observamos un decrecimiento del volumen

total, a causa de la disminución del volumen de vacíos. Esta operación de “comprimir” una masa de suelo, se llama “compactación”.

Al compactar un suelo, se obtienen las siguientes ventajas:

Se establece un contacto más firme entre las partículas.

Las partículas de menor tamaño son forzadas a ocupar los espacios formados por los de mayor dimensión.

Cuando un suelo es compacto, aumenta su valor de soporte y se hace más estable.

Como las partículas se encuentran firmemente adheridas después de la compactación, la masa de suelo será más densa y su volumen de vacíos quedará reducido a un mínimo, por lo tanto, la capacidad absorbente de agua de un suelo, quedará grandemente reducida por efecto de la compactación.

Para obtener una adecuada lubricación y disminuir así la resistencia a la fricción existente entre partículas, deberá de controlarse debidamente la cantidad de agua al compactar un suelo. Si es insuficiente, no habrá buena lubricación, y si es excesiva, las fuerzas hidrostáticas empujarán y tenderán a separarse las partículas.

Por lo tanto, se hace necesario calcular debidamente la cantidad de agua para generar la “humedad óptima” que ha de tener un suelo, a fin de obtener una buena lubricación que permita al compactarlo, alcanzar la mayor densidad posible, es decir la “densidad máxima”.

Muchas veces, al desconocer de los requerimientos de compactación que tiene un proyecto, se plantea realizar todas las compactaciones con la energía AASHTO T-180 ya que de esta manera se garantiza una mejor compactación, pero por otro lado se incrementan los gastos, siendo necesarias mayor grado de compactación implicando más recursos; al presupuestar algunas empresas formulan sus costos en base a la energía AASHTO T-99, para regular gastos ya que el grado de densidad se alcanza con menos proceso de compactación y en un menor tiempo.

Material y equipo

Muestra de suelo

Martillo de compactación de 10 lb

Molde con su respectivo (collarín y base) de 4¨ de diámetro

Regla enrrazadora.

Balanza con 0,1 g y 1 g de precisión

Horno de secado

Tamiz N° 4 (4.75 mm)

Bandeja metálica

Cucharon

Tenaza

Espátula

Brocha

Procedimiento

Para realizar este ensayo existen cuatro métodos los cuales son: Método A, Método B, Método C y Método D. La diferencia entre los métodos A y C es que para el A el suelo es tamizado en la malla Nº 4 y se pesan 3 kg para cada muestra y para el C se tamiza en la malla ¾ y se pesan 5 kg para cada muestra, en ambos se utiliza el molde de 4” de diámetro.

Por lo tanto, la diferencia entre los métodos B y D, es que para el B se utiliza la malla N° 4 y se pesan 7 kg para cada muestra y finalmente para el D se tamiza en la malla 3/4 y se pesan 11 kg para cada muestra, para ambos métodos se trabaja con el molde 6” de diámetro.

Selección del método

Para fines de eta investigación, se analizan datos obtenidos por el método A, en el cual se utiliza el molde de 4” de diámetro, el tamiz Nº 4 y un martillo de compactación de 10 lb.

Determinación del volumen y peso del molde de compactación: Mida 6 veces el diámetro del molde de compactación tanto en la parte superior e inferior del mismo utilizando un vernier (pie de rey) con una precisión de 0,01 pulgadas (obteniendo un promedio), determine y registre la masa del molde sin la base y sin el collarín con una balanza de 1 g

de precisión, por ultimo mida la altura del molde en la parte interior al menos cuatro veces alrededor de su circunferencia utilizando un vernier. Y luego calcule el promedio de las alturas.

Preparación de la muestra de ensayo

Seque la muestra al aire o en un horno de secado a una temperatura de 60°C, luego desmenuce todos los grumos existentes utilizando un mortero y pistilo, de manera que se reduzca el tamaño de las partículas.

Fotografía 3. 15 Preparación de muestra para compactación T-99

Fuente: Elaboración propia

Tamice en la malla Nº 4 una cantidad representativa de material pulverizado, lo suficiente para realizar 5 puntos y descarte el material retenido en ella.

Calcule la humedad natural del suelo, para poder determinar la cantidad de agua a agregar a cada una de las muestras para que puedan llegar a la humedad de prueba, tomando en cuenta la siguiente ecuación:

$$V_w = \frac{\%W_{ensayado} - \%W_{actual}}{100} * W_{ss}$$

Dónde:

Vw= Volumen de agua

%W= Porcentaje de humedad

Wss= Peso de suelo seco

Deposite cada muestra en una bandeja metálica y mezcle manualmente, con la cantidad de agua necesaria, utilice una probeta 1000 ml (según sea el porcentaje de humedad), para asegurar una distribución uniforme y déjelas reposar en bolsas plásticas durante 16 horas como mínimo.

Fotografía 3. 16 Muestra con 5 % de humedad para compactación

Fuente: Elaboración propia

Compactación de la muestra

Ensamble la placa en el molde y con el collarín asegurándolo correctamente, luego coloque el molde en una superficie plana y rígida, para que se realice el ensayo sin ningún tipo de error, inmediatamente ubique en el molde el suelo anteriormente preparado hasta crear una capa de espesor uniforme y que pueda ocupar la quinta parte del molde. Posteriormente el suelo colocado en el molde, compacte utilizando un martillo apisonador dejándolo caer desde la altura de la manga, proporcionando 25 golpes distribuidos uniformemente dentro del molde por cada capa.

Fotografía 3. 17 Compactación de suelo T-99

Fuente: Elaboración propia

Remueva el collarín del molde y desbaste cuidadosamente el suelo compactado hasta aplanar la parte superior del molde y utilice una regla enlazadora (llene los agujeros y presione con los dedos para luego emparejar con la regla enrazadora), desmonte la placa base del molde, después limpie la parte externa del molde con una brocha. Posteriormente determine la masa del molde compactado (sin placa base) y registre en una balanza de 1 g de precisión.

Fotografía 3. 18 Pesado de muestra más molde T-99

Fuente: Elaboración propia

Extraiga el espécimen compactado utilizando el gato hidráulico, luego corte en 4 porciones el espécimen y calcule una masa de 30 g por cada porción y luego coloque en taras debidamente pesadas. Luego obtenga la masa de cada porción humedad utilizando la balanza de 0,1 g de legibilidad. Seguidamente coloque al horno a una temperatura que

no sobrepase los 60º C en un tiempo minino de 24 horas y por último una vez sacados del horno deje enfriar, para tomar la masa seca de cada porción de suelo.

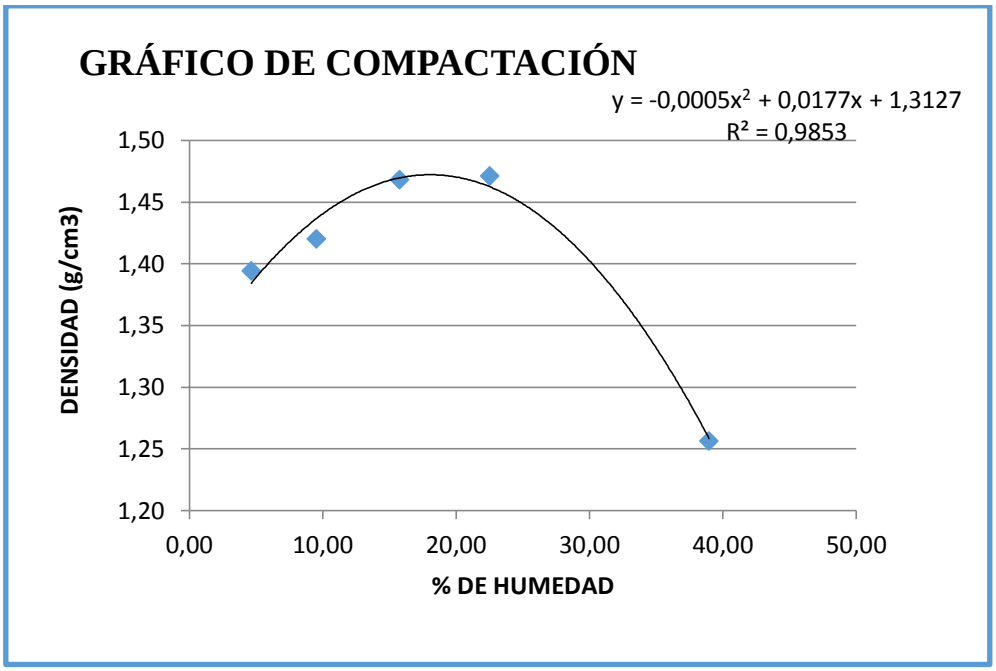
Ejecute el paso anterior en 6 ocasiones con los contenidos de humedad dependiendo los valores de compactación que se requieran.

Tabla 3. 19 Tabla resumen de compactación T-99

Compactación de suelos (proctor) AASHTO T-99					
Muestra=Única	**Volumen=** 931,50	cm^3			
Nº de capas	**3**	**3**	**3**	**3**	**3**
Nº de golpes por capa	25	25	25	25	25
Peso suelo húmedo + molde	5538,20	5627,70	5762,20	5858,00	5805,20
Peso del molde	4178,60	4178,60	4178,60	4178,60	4178,60
Peso suelo húmedo	1359,60	1449,10	1583,60	1679,40	1626,60
Volumen de la muestra	931,53	931,53	931,53	931,53	931,53
Densidad suelo húmedo (gr/cm^3)	1,46	1,56	1,70	1,80	1,75
Cápsula Nº	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Peso suelo húmedo + capsula	32,51	65,07	46,35	46,58	72,70
Peso suelo seco + cápsula	31,60	60,70	41,80	40,40	56,60
Peso del agua	0,91	4,37	4,55	6,18	16,10
Peso de la cápsula	12,04	14,81	12,93	12,97	15,30
Peso suelo seco	19,56	45,89	28,87	27,43	41,30
Contenido de humedad (%h)	4,65	9,52	15,76	22,53	38,98
Densidad suelo seco (gr/cm^3)	1,39	1,42	1,47	1,47	1,26

Densidad Máxima	**1,47**	**gr/cm^3**
Humedad Optima	**17,70**	**%**

Fuente: Elaboración propia



3.6 Caracterización de la cal

3.6.1 Pruebas para la caracterización física y química de la cal hidratada

En el caso de cal hidratada los ensayos que deben ejecutarse para su estudio se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla 3. 20 Norma para la caracterización física y química de la cal

Propiedad analizada	Tipo de ensayo o prueba	Norma o especificación técnica
Propiedades químicas	Contenido de óxidos	ASTM C25
	Valor pH de la cal	ASTM C25
Propiedades físicas	Peso específico de la cal	ASTM C110
	Peso específico suelto	ASTM C110
	Finura de molido de la cal	ASTM C110
	Humedad natural de la cal	ASTM C110
Clasificación de la cal		Según el índice de Vicat y el contenido de MgO

Fuente: Elaboración propia

De esta manera, con los resultados obtenidos en los ensayos que se indican en el cuadro anterior, se tendrá una mejor idea del tipo y calidad de la cal, para luego encarar la estabilización.

3.6.2 Resultados de la caracterización física y química de la cal

Algunas propiedades químicas de la cal como el contenido de óxidos que se encuentran presentes en el material, fueron determinados en el laboratorio de química de la UAJMS, los detalles de cada una de estas pruebas efectuadas en la cal hidratada se muestran a continuación:

Tabla 3. 21 Característica física y química de la cal

Descripción	**Contenido en porcentaje**
	Cal hidratada de El Puente
CaO	41,94
MgO	24,31
SiO3	1,12
Otros	32,63
Total	100
Clasificación	Cal árida o magra
Índice de pH	12,69

Fuente: Elaboración propia

Los resultados que muestra el cuadro anterior, establece que la cal procedente de El Puente no es un producto netamente oxido de calcio, sino que presenta un buen porcentaje de óxido de magnesio, lo cual es perceptible a simple vista pues este oxido le quita la blancura total a este material y consecuentemente lo clasifica como una cal dolomita o cal árida o magra, debido justamente al alto porcentaje de magnesio.

Así mismo, en la siguiente tabla se hace referencia a que la cal obtenida de El Puente no cumple con las especificaciones en cuanto a su composición química, pues el contenido total de óxidos presentes en la cal (CaO+MgO) no llega a cubrir el 90% de cal que exigen las normas internacionales para la estabilización de suelos.

Tabla 3. 22 Análisis granulométrico de la cal

Análisis granulométrico de la cal hidratada					
Porcentaje de material retenido		**Especificaciones según norma AST**		**Especificaciones según norma peruana y UNE**	
Tamiz N°	**El Puente**	**% Max. retenido**	**Obs.**	**% Max. retenido**	**Obs.**
N° 30 (0,59 mm)	2.37	3	Cumple	0.5	No cumple
N° 200 (0,074 mm)	26.29	25	No cumple	15	No cumple

Fuente: Elaboración propia

En resumen, la cal propuesta para realizar la estabilización no satisface con todas las especificaciones técnicas, lo cual se debe principalmente a su mal fabricación y conservación. Este factor sin duda influirá en la mezcla suelo-cal y precisamente como se verá más adelante afectará la cantidad de aditivo que se requiere para lograr estabilizar el suelo.

Debido a que, en nuestro medio, la cal con la que se cuenta es solo la que proviene de la fábrica El Puente, se deberá trabajar con esta teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente.

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN, CÁLCULO Y DISEÑO

4.1 Coeficiente de permeabilidad – método de cabeza variable

Material y equipo

Aparato de permeabilidad

Cronómetro

Termómetro

Temple con mástil para sujetar los tubos

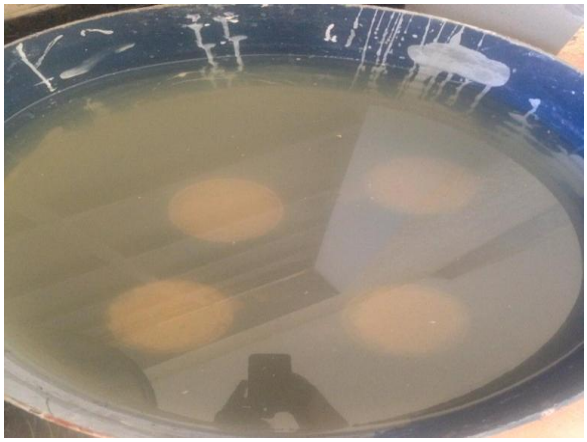
Piedra porosa

Procedimiento

Preparar la muestra de suelo compactando dentro del molde T-99 o T-180 según el molde con que se trabajó, para realizar el ensayo de compactación, para trabajar con una humedad optima y densidad máxima conocidas.

Dejar los moldes saturando en un tanque, se deberá trabajar con la mayor cantidad de moldes para obtener mayor cantidad de ensayos, dejar saturando el tiempo que sea necesario, para que la muestra se sature completamente. Para saber si estas muestras están totalmente saturadas se las pesa a diario, esta hasta ver que el peso de la misma se haga constante, además se observará la expansión que tendrá el suelo.

Fotografía 4. 1 Saturación de muestras



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 4. 2 Expansión de suelo y suelo con cal

Fuente: Elaboración propia

Para la realizar los ensayos de permeabilidad se contó con 2 permeámetros, de 3 pulgada diámetro.

Fotografía 4. 3 Permeámetro más muestra de suelo

Fuente: Elaboración propia

Para el cambio de molde, para el permeámetro de 3 plg. Se hizó construir un cilindro del mismo diámetro, para extraer la muestra.

Fotografía 4. 4 Cambio de molde de la muestra para ensayo de permeabilidad

Fuente: Elaboración propia

Para la extracción de la muestra se procedió a usar la prensa hidráulica del laboratorio de Hormigones.

Fotografía 4. 5 Extracción de muestra con prensa hidráulica

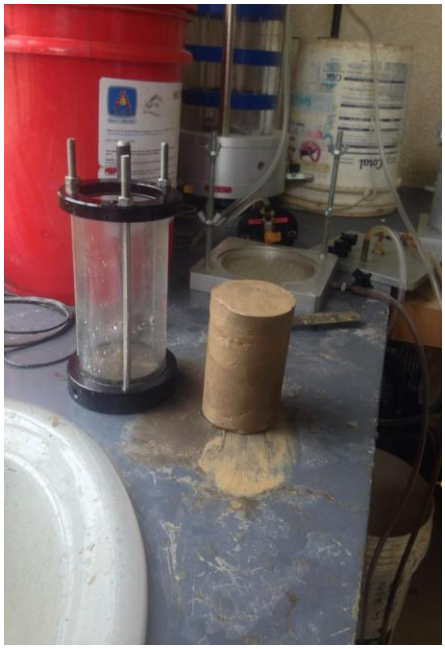
Fuente: Elaboración propia

Fotografía 4. 6 Muestra para el permeámetro

Fuente: Elaboración propia

Después de extraer la muestra se procede a colocar la muestra en los moldes de permeabilidad.

Fotografía 4. 7 Presentación de muestra y permeámetro



Fuente: Elaboración propia

Fotografía 4. 8 Muestra de suelo dentro del permeámetro

Fuente: Elaboración propia

Llenar la bureta (o tubería de entrada) hasta una altura conveniente y medir la cabeza hidráulica a través de la muestra obtener h1.

Fotografía 4. 9 Sellado y saturado de muestra

Fuente: Elaboración propia

Iniciar el flujo de agua y hacer funcionar simultáneamente el cronómetro. Dejar que el agua corra a través de la muestra hasta que la bureta (o tubería de entrada) se encuentre

casi vacía. Simultáneamente parar el flujo y registrar el tiempo transcurrido. Obtener la cabeza h2, Registrar la temperatura del ensayo.

Si es necesario registrar el área de la tubería de entrada a, se puede recoger el agua en un recipiente (probeta).

Volver a llenar la bureta (o tubería de entrada) de agua y repetir el ensayo dos veces adicionales. Utilizar los mismos valores para h1 y h2 y obtener los tiempos transcurridos.

Tabla 4. 1 Tabla resumen de permeabilidad (suelo natural)

Tabla resumen de permeabilidad ensayo de carga variable

Donde:

$$k = \frac{a * L}{A * t} * \ln \frac{h1}{h2}$$

L= Longitud de la muestra

H1, h2= Carga hidráulica en tiempos t1 y t2 respectivamente

A= Área de la muestra del suelo

a= Área del tubo de abastecimiento

t= Intervalo de tiempo entre el descenso de h1 a h2

k= Coeficiente de permeabilidad

N° de Mediciones	Área Muestra (cm2)	Área bureta (cm2)	Permeabilidad (k) (cm/s)
1	45,60	0,38	9,04122E-07
2	45,60	0,38	1,25652E-06
3	45,60	0,38	1,21082E-06
4	45,60	0,38	3,47046E-06
5	45,60	0,38	9,60133E-07
6	45,60	0,38	1,40712E-06
7	45,60	0,38	1,41407E-06
8	45,60	0,38	1,11456E-06
9	45,60	0,38	1,5343E-06
10	45,60	0,38	1,67306E-06
11	45,60	0,38	1,32568E-06
12	45,60	0,38	9,24043E-07
13	45,60	0,38	1,0429E-06
14	45,60	0,38	7,69907E-07
Promedio			**1,35769E-06**

Fuente: Elaboración propia

Justificación de la variante propuesta para la saturación de la muestra

El procedimiento para el ensayo de permeabilidad antes explicado difiere con respecto al método convencional según norma ASTM D.2434-68 y que se expone en el manual de laboratorio de suelos del ingeniero Joseph E. Bowles, la variación de métodos difiere en el proceso de saturación.

Con el fin de validar los resultados obtenidos con la variante de saturación propuesta, para realizar el ensayo de permeabilidad, se llevó a cabo un otro ensayo de permeabilidad, pero esta vez con el método explicado en la norma ASTM D.2434-68.

Tabla 4. 2 Tabla resumen de tabla permeabilidad (saturación convencional)

Tabla resumen permeabilidad ensayo de cabeza variable

Donde:

$$k = \frac{a * L}{A * t} * \ln \frac{h1}{h2}$$

L: Longitud de la muestra

H1, h2= Carga hidráulica en tiempos t1 y t2 respectivamente.

A= Área de la muestra del suelo

a= Área del tubo de abastecimiento

t= Intervalo de tiempo entre el descenso de h1 a h2.

k= Coeficiente de permeabilidad.

N° de Mediciones	Área Muestra (cm2)	Área bureta (cm2)	Permeabilidad ASTM (k) (cm/s)	Permeabilidad método propuesto (k) (cm/s)
1	45,60	0,38	9,88274E-07	1,41407E-06
2	45,60	0,38	9,88895E-07	1,25652E-06
3	45,60	0,38	9,90165E-07	1,0429E-06
4	45,60	0,38	9,86541E-07	1,11456E-06
Promedio			**9,88469E-07**	**1,20701E-06**

Fuente: Elaboración propia

Decisión y conclusión

Se tomó en cuenta la sugerencia propuesta en la guía de laboratorio del ingeniero Joseph E. Bowles, donde indica “que si es posible proponer una forma mejor (o más practica) de realizar el ensayo” , la propuesta de saturación es una forma más práctica de procedimiento, si se tienen varias muestras a analizar y no se cuentan con muchos equipos,

y como se puedo observar la variación numérica es del 18,11 %, se llega a la conclusión que el método es viable al no existir diferencias significativas entre ambos métodos.

4.2 Selección del agente estabilizante

La selección del mejor agente estabilizante en base a algunas de las propiedades del suelo es de mucha importancia, porque se tiene un aprovechamiento máximo de las mejoras del suelo al ser tratado con el estabilizante adecuado, y se evita la utilización de otros agentes que puedan producir resultados desfavorables. El siguiente procedimiento, servirá en la selección del mejor agente estabilizador de acuerdo a los criterios para la estabilización de suelos para pavimento, Technical Manual N° 5-822-14. Air Force Manual N° 32-1019. Headquarters, Departments of the Army, and the Air Force Washington, D.C.

La selección del agente estabilizante se hace usando la Tabla 4.3 y la Tabla 4.4. El triángulo de la granulometría del suelo en la Tabla 4.3 está basado en las características de tamaño de partículas de los suelos y en las características de pulverización. El proceso de selección del estabilizante se continúa con la Tabla 4.3 como se indica para cada área mostrada en la Tabla 4.4.

Las restricciones se basan en la granulometría y en el índice de plasticidad (IP), se usa la segunda columna de la Tabla 4.3; en esta, se enlistan los símbolos para la clasificación de suelos que se aplica para cada área determinada por la Figura 4.4, esto se hace para verificar que el área seleccionada es la apropiada, y debido a ello, la distribución granulométrica y los límites de Atterberg son usados para iniciar el proceso de selección.

Los datos que se requieren para entrar a la Figura 4.4 son:

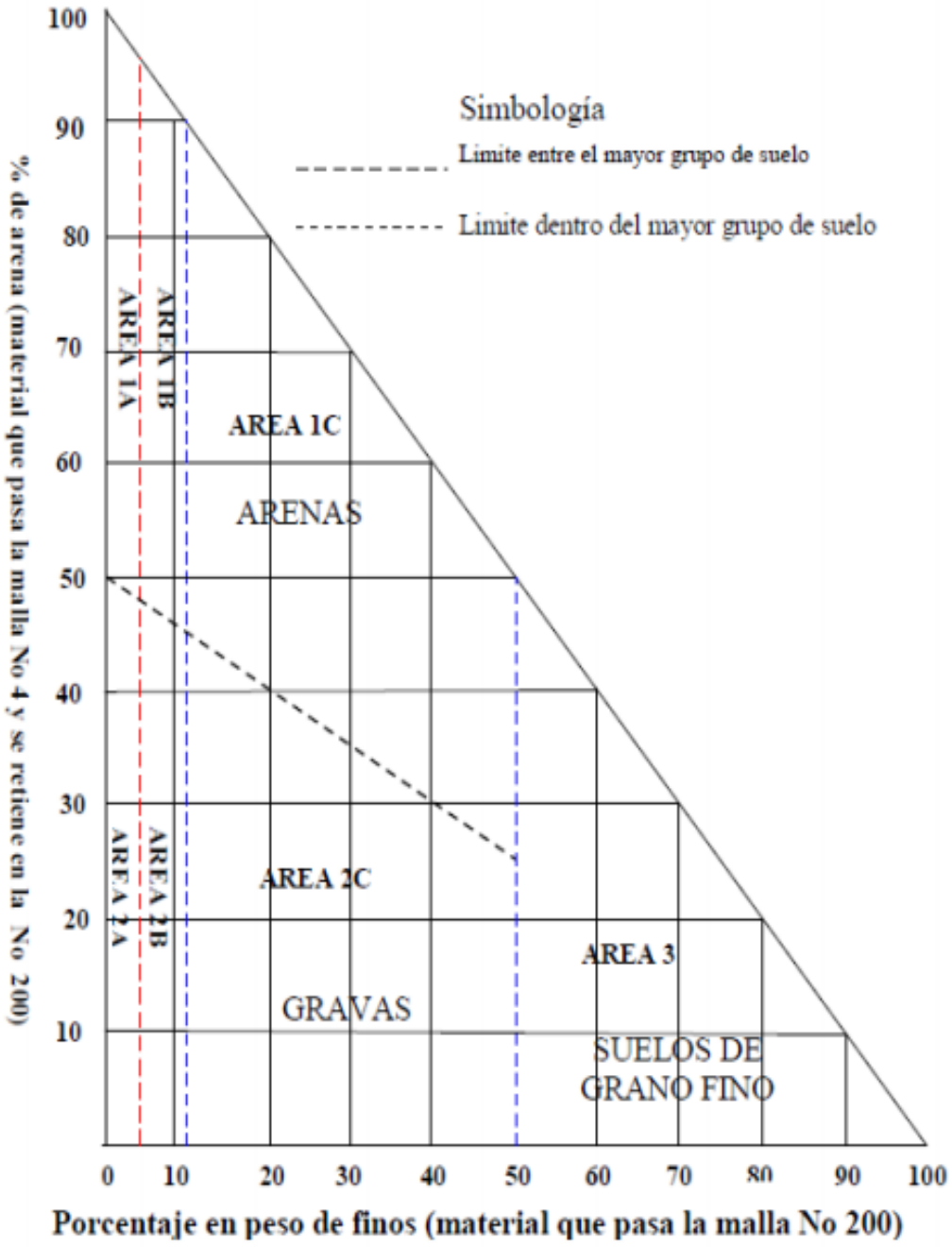
Porcentaje de material que pasa la malla N° 200 y el porcentaje de material que pasa la malla N° 4, pero que se retiene en la malla N° 200.

Al triángulo se entra con estos dos valores y donde se intercepten esa es el área (1A, 2A, 3, etc.).

El área determinada por la tabla 4.3 y el suelo clasificado se encuentra en la segunda columna de la Tabla 4.3.

El posible agente estabilizador del suelo se encuentra en la tercera columna y las restricciones, para el uso del agente estabilizante considerado se encuentran en columna 4 y 5 del mismo cuadro informativo.

Tabla 4. 3 Selección del estabilizante



Fuente: Norma AASHTO

Tabla 4. 4 Selección de estabilizante según el tipo de suelo

Área	Clase de suelo	Tipo de estabilizante aditivo recomendado	Restricción en el límite líquido e índice plástico del suelo	Restricción para el porcentaje que pasa la malla N°200	Observaciones
1A	SW,SP	(1) Bituminosos	Índice Plástico <25		
		(2) Cemento Portland			
		(3) Cal-cemento-cemento-ceniza volátil			
1B	SW-SP SP-SM SW-SC SP-SC	(1) Asfaltos	Índice Plástico <10		
		(2) Cemento Portland	Índice Plástico <30		
		(3) Cal-cemento-cemento-ceniza volátil	Índice Plástico <12		
			Índice Plástico <25		
1C	SM,SC SM-SC	(1) Bituminosos	Índice Plástico <10	No exceda en 30% en peso	
		(2) Cemento Portland			
		(3) Cal-cemento-cemento-ceniza volátil	Índice Plástico <12		
			Índice Plástico <25		
2A	GW,GP	(1) Bituminosos			
		(2) Cemento Portland			
		(3) Cal-cemento-cemento-ceniza volátil	Índice Plástico <25		
2B	GW-GM GP-GM GW-GC GP-GC	(1) Bituminosos	Índice Plástico <10		Solamente material bien graduado y que contenga hasta 45% en peso de material que pasa la malla N°4
		(2) Cemento Portland	Índice Plástico <30		
		(3) Cal-cemento-cemento-ceniza volátil	Índice Plástico <12		
			Índice Plástico <25		
2C	GM,GC, GP,GC	(1) Asfaltos	Índice Plástico <10	No exceda en 30% en peso	Solamente material bien graduado y que contenga hasta 45% en peso de material que pasa la malla N°4
		(2) Cemento Portland	Índice Plástico <12		
		(3) Cal-cemento-cemento-ceniza volátil	Índice Plástico <25		
3	CH,CL, MH,ML, OH,OL, ML,CL	(1) Cemento Portland	Límite Líquido<40		Solamente material bien graduado y que contenga hasta 45% en peso de material que pasa la malla N°4
			Límite Plástico<20		
		(2) Cal	Índice Plástico >12		

Fuente: Norma AASHTO

Para el análisis del suelo en esta investigación clasificado como CH, con 100% que pasa la malla N° 4 y 97 % que pasa la malla N° 200, con un límite líquido de 59% y límite plástico de 33%.

Se tiene que el 3 % del material esta entre la malla N° 4 y la malla N° 200 y el índice plástico es 33%.

Entrando a la Figura 4.3 con los valores de 97 % que pasa la malla N° 200 y 3% entre la N°4 y N°200, la intersección de estos valores se encuentra en el área 3.

Con esto se va a la columna de la Tabla 4.4 y se encuentra el área 3 y se verifica la clasificación del suelo, CH, en la segunda columna.

En la tercera columna, se encuentran los agentes estabilizantes que se pueden usar para ese suelo en particular. A demás de tomar en cuenta las restricciones que se presentan en las siguientes columnas.

Para propósitos de esta investigación se elige la cal como agente estabilizador. Utilizando cal hidratada refinada tipo especial según la norma ASTM C 206 y C 207.

4.3 Criterios para la dosificación de la mezcla suelo-cal

Para poder determinar el porcentaje de cal adecuado u óptimo para la mezcla suelo-cal, existen varios métodos, entre los que tenemos métodos que están estandarizados y otros que no, entre los que tenemos:

Método usando el pH para estimar la proporción suelo-cal requerida para la estabilización de suelos ASTM D 6276-03 (usando un peachimetro).

Determinación de valores de pH para mezcla suelo-cal utilizando papel tornasol.

Proceso alternativo utilizando los límites de Atterberg para seleccionar el porcentaje óptimo de cal.

Prueba de resistencia (CBR) para obtener el porcentaje óptimo de cal.

El método elegido, para obtener el porcentaje óptimo de cal, para el presente proyecto es el del pH usando el peachimetro, que es el único normado por la ASTM.

4.4 Métodos para la estimación del % óptimo de cal para la estabilización

4.4.1 Método usando el pH, para estimar la proporción suelo-cal requerida, para la estabilización de suelos ASTM D 6276-03

Métodos para encontrar el porcentaje óptimo de cal, puede haber muchos y la eficacia de cada uno depende de la experiencia del que lo practique, muchos de estos no están normalizados por la ASTM, para nuestro caso se utilizará el procedimiento ASTM D-6276-03 el cual se describe a continuación (Para mayor información consultar norma).

Este procedimiento, proporciona los medios para estimar el requisito de la proporción del suelo-cal para la estabilización de un suelo plástico. Se realiza en suelos que pasan el tamiz de 425µm (N° 40). La proporción óptima del suelo-cal, para la estabilización de suelos plásticos, será aquella que brinde un mejoramiento en las características propias del suelo, determinadas principalmente por la resistencia a la compresión o el índice de plasticidad.

Se utiliza para, determinar el porcentaje más bajo de la cal que genere un pH de 12.4 en un suelo a estabilizar.

Una serie de especímenes son preparados conteniendo un rango de porcentajes de cal en una muestra de suelo. Las medidas del pH se hacen en las mezclas de los especímenes en suspensión, para determinar el contenido mínimo de la cal de la mezcla del suelo-cal para obtener un pH de por lo menos 12,4.

Preparación del suelo

El suelo puede ser secado al horno a temperatura menor o igual a 60 grados centígrados.

Obtenga 350 gramos de material que pase por tamiz N° 40.

Mezcle bien el material que pasa el tamiz de los 425µm (N° 40).

La calibración y la estandarización

Calibrar el contador de pH de acuerdo con las instrucciones del fabricante usando solución búfer de pH 4,7 y 10 a una temperatura de 25 ± 1°C

Preparación de Especímenes

Con la muestra secada al horno, obtenga cinco especímenes, con un equivalente de 25.0g de suelo.

Determine la masa de cada espécimen de 25.0g de suelo secado al aire ó al horno de acuerdo a la siguiente formula:

$$Ma = 25X\ (1.0 + W/100)$$

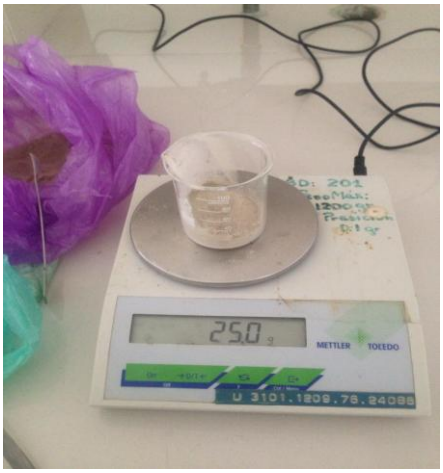
Donde:

Ma = Masa del espécimen de suelo secado al aire o al horno

W = Contenido de agua, de la muestra seca determinado

Ponga cada espécimen en las botellas de plástico y tapar herméticamente.

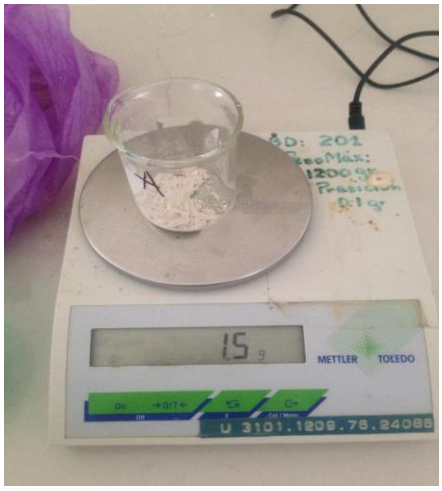
Fotografía 4. 10 Pesado de muestra de suelo para ensayo de pH

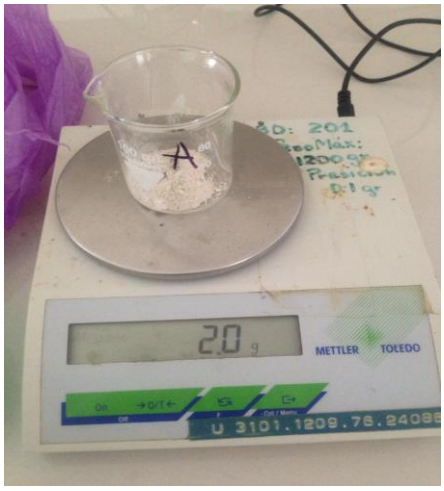


Fuente: Elaboración propia

Obtenga seis muestras representativas de cal que cumpla los requisitos de la especificación C 977. Seis especímenes con cantidades de 1, 3, 4, 5, 6 y 8 % de la masa de suelo secado en el horno de 25g. El sexto espécimen de 2,00g de cal representa una solución saturada de la cal. Coloque los 2,00g de cal en una botella plástica y tape herméticamente.

Fotografía 4. 11 Pesado de cal para diferentes porcentajes





Fuente: Elaboración propia

Agregue a uno de los primeros cinco especímenes de suelo la cal en las botellas plásticas, tape firmemente, marque el porcentaje en la botella, y homogeneizar por agitación.

Repita este procedimiento para los cuatro especímenes restantes de suelo y cal y el espécimen de cal saturada.

Agregue 100 ml de agua a cada uno de las mezclas de la suelo-cal y a la botella que contiene la cal de 2,00 g.

Sacuda cada una de las mezclas suelo-cal-agua, por un mínimo de 30s o hasta que los especímenes se mezclen homogéneamente. Continúe sacudiendo los especímenes por 30s cada 10 minutos durante 1 h.

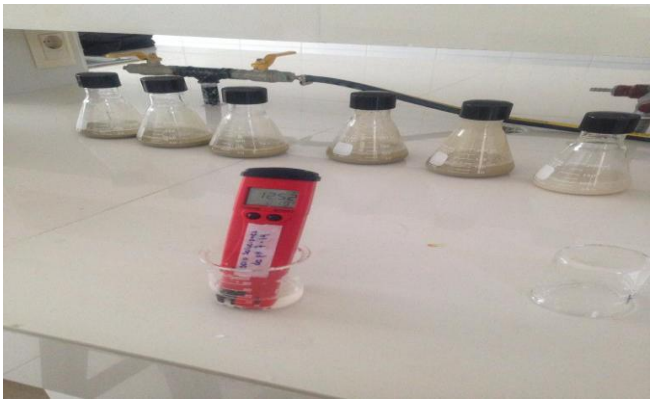
En caso de ser necesario, caliente o enfrié el espécimen para mantener la temperatura del espécimen a 25 ±1°C.

Fotografía 4. 12 Mesclado de suelo y cal a diferentes porcentajes

Fuente: Elaboración propia

Dentro de los 15 minutos siguientes de terminado el proceso de mezclado de 1 hora, determine el pH en cada mezcla suelo-cal-agua y de la mezcla de la cal-agua de 0,01 unidad del pH. Mantenga la temperatura de la mezcla en 25 ±1°C al determinar el pH.

Fotografía 4. 13 Lecturado del pH para mezcla suelo-cal



Fuente: Elaboración propia

Registre el valor de pH para cada mezcla del suelo-cal-agua y para la mezcla de la cal-agua. El ensayo fue realizado para muestras con contenidos de cal del 1 al 8% para fines de esta investigación, obteniéndose los resultados que a continuación se muestran más adelante.

Los datos muestran que, para el tipo de suelo analizado, un 4% de cal es el porcentaje óptimo para estabilizar ese material en particular, ya que cumple la especificación ASTM D-6276 para un pH de 12,40, los resultados para las demás mezclas de suelo-cal presentados son únicamente para ver el comportamiento del valor de pH, no siendo necesario determinarse en la práctica de diseño.

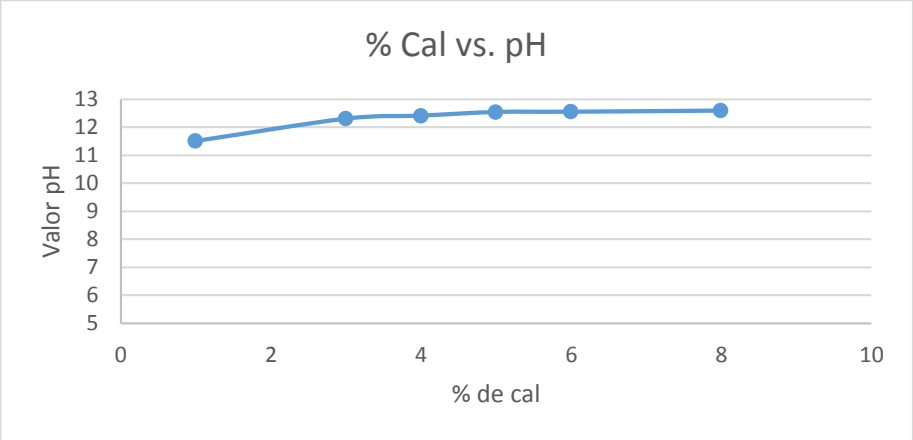
A medida que se incrementa el contenido de cal el valor pH se vuelve constante en valor cercano a 12,40, lo que es un parámetro que indica que el suelo está estabilizado.

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de pH de la mezcla suelo-cal:

Tabla 4. 5 Estimación del % óptimo de cal para la mezcla suelo-cal

Estimación de la proporción de la cal necesaria, para estabilizar un suelo a partir de la medida del pH ASTM D6276						
Muestra= Única	**Peso=**	25,00	gr			
N° de muestra	**% Cal**	**Peso suelo (gr)**	**Peso cal (gr)**	**Cantidad de agua (ml)**	**Temperatura (°C)**	**Valor pH**
1	1	25	0,25	100	24,40	11,50
2	3	25	0,75	100	24,60	12,30
3	4	25	1,00	100	24,70	12,41
4	5	25	1,25	100	24,70	12,54
5	6	25	1,50	100	24,70	12,55
6	8	25	2,00	100	24,90	12,59
Condición saturada	100	0,00	2,00	100	24,50	12,69
pH			**12,41**			
% de Cal Óptimo			**4,00**			

Fuente: Elaboración propia



4.4.2 Proceso alternativo utilizando los límites de Atterberg para seleccionar el porcentaje óptimo de cal

Un proceso alternativo y que al igual que el papel pH no está normado para la determinación de cal optima en una estabilización, consiste en encontrar los límites de Atterberg y ver como baja la plasticidad en mezclas de suelo-cal.

El procedimiento es el mismo que para los límites de Atterberg comunes utilizando las normas AASHTO T-89, para límite líquido y AASHTO T-90, para límite de plasticidad e índice de plasticidad, con el único cambio de agregar porcentaje de cal en distintos porcentajes.

El valor óptimo de cal que estabiliza el suelo será aquel cuyo valor de IP tienda a cero, los resultados siguientes corresponden al suelo analizado en esta investigación:

Tabla 4. 6 Tabla resumen de estimación de % óptimo de cal mediante límites Atterberg

Tabla resumen de límites de Atterberg ASTM D4318 para obtener % de cal óptimo			
Muestra	Límite líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
M1 al 2 % cal	57	41	14
M2 al 4 % cal	54	47	7
M3 al 6 % cal	55	45	10

Fuente: Elaboración propia

4.5 Elaboración de especímenes y pruebas para la muestra suelo-cal

Estabilizar el suelo significa lograr aumentar su capacidad portante incidiendo en las mejoras de sus propiedades índices, tales como las detalladas en las secciones anteriores para suelo natural.

En la estabilización con cal se persigue como fin primordial aumentar la capacidad portante y hacer que ésta capacidad se mantenga invariable en función del tiempo bajo cualquier condición climática o evento natural, como ya se destacó anteriormente la estabilización se hace ventajosa cuando tenemos un índice de plasticidad mayor a diez (IP>10) y mediante la utilización de cal hidratada.

4.5.1 Límites de Atterberg

La cal ejerce gran influencia en la plasticidad de un suelo, porcentajes apropiados de cal puede reducir la plasticidad en su totalidad, lo que vendría a reducir los cambios volumétricos dañinos para cimentaciones de vías para uso vehicular.

Aplicando el porcentaje óptimo de cal de 4% (determinado en este capítulo, apartado 4.5.1) al suelo en estudio, se le realizaron nuevamente los ensayos para la determinación de los límites de Atterberg, y verificar así la influencia que tiene la cal en este suelo.

Fotografía 4. 14 Muestra de suelo más 4% de cal para ensayo de límites

Fuente: Elaboración propia

Los valores muestran como la adición de cal redujo considerablemente la plasticidad del suelo desde un IP=30 % a IP= NP (No Plástico) con 4% de cal, lo que es considerado como óptimo para fines de esta investigación.

Fotografía 4. 15 Ensayo de límite líquido y límite plástico para muestra suelo-cal

Fuente: Elaboración propia

En la sección 4.5.2 del capítulo IV se muestra como a medida que se incrementa el contenido de cal en el suelo estudiado, la plasticidad va reduciendo.

Tabla 4. 7 Tabla resumen de límites de Atterberg (suelo-natural)

Tabla resumen de límites de Atterberg ASTM D4318			
Muestra	Límite líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
Los Chapacos M1	56	48	8
Los Chapacos M2	57	48	9
Los Chapacos M3	57	49	8
Determinación del valores elegido			
Muestra	Límite líquido (%)	Límite Plástico (%)	Índice de Plasticidad (%)
Los Chapacos M2	57	48	9

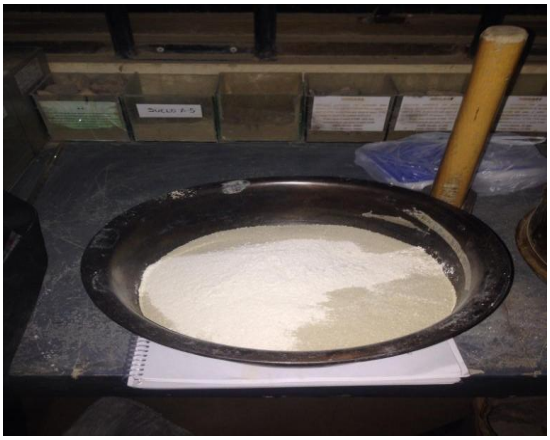
Fuente: Elaboración propia

4.5.2 Granulometría de la muestra suelo-cal método de lavado

Este procedimiento cubre la determinación de la cantidad de material más fino que el tamiz de 75µm (N° 200) en suelo por lavado en base a la norma AASHTO T 11-99 (Para mayor información consultar norma).

El suelo más fino que el tamiz de 75µm (N° 200), puede ser separado de partículas mayores eficazmente y completamente por el tamizado en húmedo, que por el tamizado en seco. Por consiguiente, cuando se desean determinaciones exactas de material más fino que 75 µm en suelo fino y grueso, se utiliza este método de ensayo en la muestra antes del tamizado en seco de acuerdo con la especificación AASHTO T 27 (análisis por tamizado de suelo grueso y fino).

Fotografía 4. 16 Muestra más 4% de cal par ensayo de granulometría método de lavado



Fuente: Elaboración propia

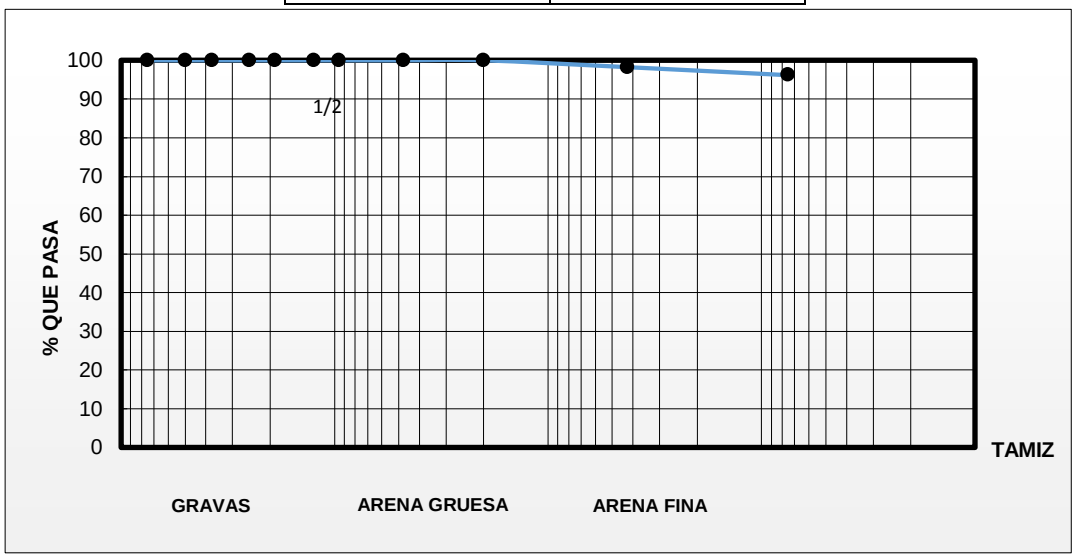
Los resultados de este método de ensayo son incluidos en el cálculo de la especificación AASTHO T 27, y el cálculo total de suelo más fino que 75µm por lavado, más la cantidad obtenida por tamizado seco en la misma muestra, es reportado con los resultados de AASHTO T 27. Secar la muestra de ensayo hasta alcanzar una masa constante.

Después de secar y determinar la masa, colocar la muestra de ensayo en el contenedor y agregar suficiente agua para cubrirla. Ningún detergente, agente dispersante, u otra sustancia se añadirá al agua. Agitar la muestra con suficiente vigor para que haya una separación completa de todas las partículas más finas que el tamiz de 75-µm (N° 200) de las partículas más gruesas, y que el material fino quede en suspensión. Regresar todo el suelo retenido en el tamiz N° 200, limpiando con un chorro de agua la muestra lavada.

Tabla 4. 8 Granulometría de suelo método de lavado (suelo-cal)

Granulometría método de lavado ASTM D422

Tamaño (mm)	%Que Pasa del Total
2,00	100,00
0,42	98,27
0,07	96,23



Fuente: Elaboración propia

4.5.3 Determinación de la gravedad específica de los sólidos

El ensayo se realiza siguiendo los procedimientos que se describen en la sección 4.3.1

Fotografía 4. 17 Tamizado de cal para ensayo de Peso específico

Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos para el ensayo de gravedad específica a la muestra seleccionada para estabilización son los siguientes:

Tabla 4. 9 Tabla resumen de gravedad específica de sólidos (suelo natural)

Tabla resumen de gravedad específica de los sólidos ASTM D854-02

N° Ensayo	Gravedad Específica de los sólidos
1	2,47
2	2,47

Valor de la gravedad específica de los sólidos de la muestra suelo-cal

N° Ensayo	Gravedad Específica de los sólidos
Promedio	2,47

Fuente: Elaboración propia

4.5.4 Determinación del tamaño de las partículas por hidrometría

Los resultados obtenidos, para el ensayo granulométrico a la muestra seleccionada para la estabilización son los siguientes:

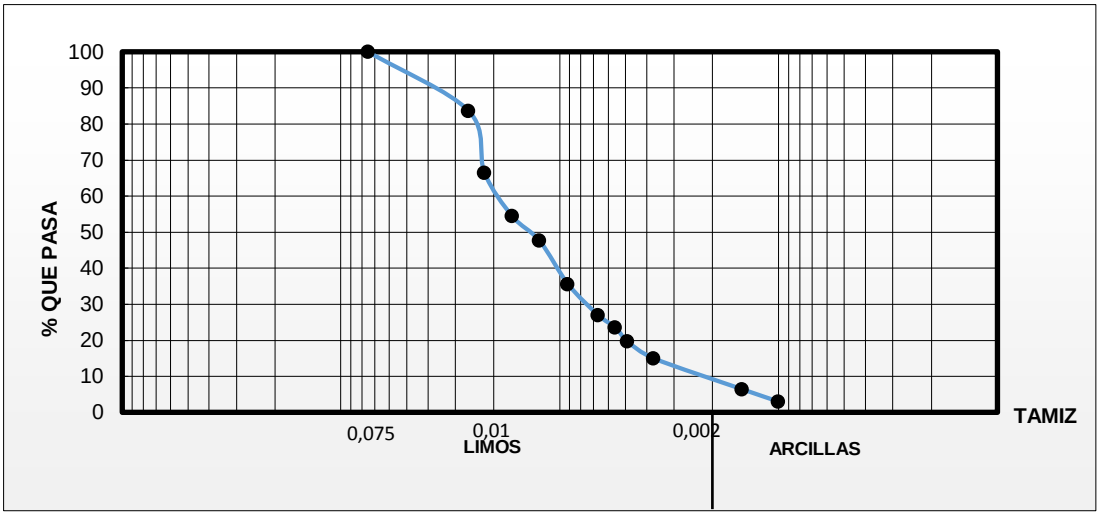
Tabla 4. 10 Cuadro resumen de hidrometría

Tabla resumen del análisis granulométrico por hidrómetro ASTM D422

Diam. mm	% Más Fino
0,075	100,00
0,026	83,60
0,022	66,43
0,016	54,41
0,012	47,55
0,009	35,53
0,007	26,95
0,006	23,51
0,005	19,57
0,004	14,93
0,001	6,35
0,001	2,91

% Pasa 200 =	100,00
% Limo parcial =	91,00
% Arcilla parcial =	9,85
% Pasa 200 del total =	96,23
% Limo del total =	86,75
% Arcilla parcial =	9,48

Fuente: Elaboración propia



4.5.5 Clasificación de la mezcla suelo-cal

Una vez definida la nueva plasticidad del suelo, veamos cómo se comporta su clasificación; la granulometría se ve alterada significativamente con la adición de cal debido a que la cal presenta un tamaño constante material fino que pasa la malla N° 200.

4.5.5.1 Clasificación AASHTO M-145

Utilizando los datos obtenidos en la sección 4.7.1 para la mezcla suelo-cal y realizando el procedimiento como se indica a continuación en base a la norma AASHTO M 145, se obtiene los resultados en el cuadro resumen al final de la clasificación.

4.5.5.2 Clasificación ASTM D2487-00 (SUCS)

Nuevamente se realizó la clasificación de suelos mediante el Sistema de Clasificación de Suelos (SUCS), el cual es realizado bajo las especificaciones de la norma ASTM D 2487 (Para mayor información consultar norma).

Tabla 4. 11 Tabla resumen de clasificación de suelos (suelo-cal)

Tabla resumen de clasificación de suelos AASHTO M-145 Y ASTM D2487				
Clasificación de suelos				
Muestra	AASHTO			SUCS
	Clasificación	Índice de grupo	Descripción	Clasificación
Los Chapacos	A-2-5	13	Limos ligeros	MH Limo elástico

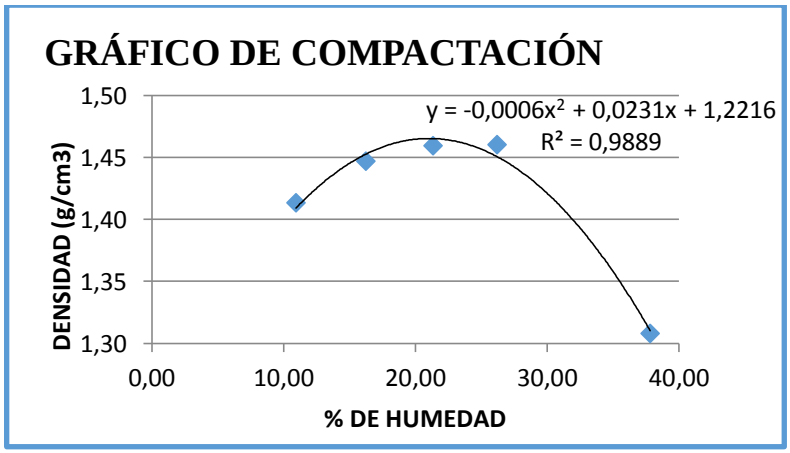
Fuente: Elaboración propia

4.5.6 Determinación de la relación humedad-densidad de la mezcla suelo-cal

Tabla 4. 12 Ensayo de compactación (suelo-cal)

Compactación de suelos (proctor) AASHTO T-99					
Muestra= Única	**Volumen=**	943,30	cm^3		
Nº de capas		3	3	3	3	3
Nº de golpes por capa		25	25	25	25	25
Peso suelo húmedo + molde		5647,60	5755,40	5839,10	5906,80	5869,50
Peso del molde		4168,70	4168,70	4168,70	4168,70	4168,70
Peso suelo húmedo		1478,90	1586,70	1670,40	1738,10	1700,80
Volumen de la muestra		943,30	943,30	943,30	943,30	943,30
Densidad suelo húmedo (gr/cm^3)		1,57	1,68	1,77	1,84	1,80
Cápsula Nº		**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Peso suelo húmedo + capsula		55,40	64,40	71,70	58,40	84,90
Peso suelo seco + cápsula		51,20	57	61,30	49,10	65,30
Peso del agua		4,20	7,40	10,40	9,30	19,60
Peso de la cápsula		12,80	11,50	12,60	13,60	13,50
Peso suelo seco		38,40	45,50	48,70	35,50	51,80
Contenido de humedad (%h)		10,94	16,26	21,36	26,20	37,84
Densidad suelo seco (gr/cm^3)		1,41	1,45	1,46	1,46	1,31
	Densidad Máxima		**1,44**	**gr/cm^3**		
	Humd. Óptima		**19,25**	**%**		

Fuente: Elaboración propia



4.5.7 Ensayo de permeabilidad en mezcla suelo-cal

El ensayo se realiza siguiendo los procedimientos que se describen en la sección 4.3.5

Los resultados, para el ensayo de permeabilidad son los siguientes:

Tabla 4. 13 Tabla resumen de permeabilidad (suelo-cal)

Tabla resumen de permeabilidad ensayo de carga variable

Donde:

$$k = \frac{a * L}{A * t} * \ln \frac{h1}{h2}$$

L= Longitud de la muestra

H1, h2= Carga hidráulica en tiempos t1 y t2 respectivamente

A= Área de la muestra del suelo

a= Área del tubo de abastecimiento

t= Intervalo de tiempo entre el descenso de h1 a h2

k= Coeficiente de permeabilidad

N° de Mediciones	Área Muestra (cm2)	Área bureta (cm2)	Permeabilidad (k) (cm/s)
1	45,60	0,38	5,46002E-07
2	45,60	0,38	7,90256E-07
3	45,60	0,38	3,92902E-07
4	45,60	0,38	4,9763E-07
5	45,60	0,38	2,06149E-07
6	45,60	0,38	1,48971E-07
7	45,60	0,38	1,28239E-07
8	45,60	0,38	1,27283E-07
9	45,60	0,38	1,24634E-07
10	45,60	0,38	1,14701E-07
11	45,60	0,38	9,28053E-08
12	45,60	0,38	1,45962E-07
13	45,60	0,38	1,18626E-07
14	45,60	0,38	1,36579E-07
Promedio			**2,55053E-07**

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. 14 Tabla resumen de ensayos realizados

N°	Granulometría (suelo)				N°	Límites de Atterberg (suelo)			Clasificación de suelos (suelo)	
	4	10	40	200		LL	LP	IP	AASHTO	SUCS
1	100	100	99,93	99,55	6	39	15	24	A-6 (21)	CL arcilla ligera
2	100	100	99,89	99,6	7	35	18	17	A-6 (13)	CL arcilla ligera
3	100	100	99,82	99,07	8	40	23	17	A-6 (13)	CL arcilla ligera
4	100	100	99,88	99,68	9	57	38	119	A-7-5 (13)	CH arcilla densa
5	100	100	98,86	97,24	10	60	29	31	A-7-5 22)	CH arcilla densa
N°	**Granulometría (suelo-cal)**				**N°**	**Límites de Atterberg (suelo-cal)**			**Clasificación de suelos (suelo-cal)**	
11	100	100	98,27	96,23	14	56	48	8	A-2-5 (13)	MH limo elástico
12	100	100	97,92	95,97	15	57	48	9	A-2-5 (14)	MH limo elástico
13	100	100	98,1	95,98	16	57	49	8	A-2-5 (14)	MH limo elástico

N°	Peso específico (suelo)	N°	Peso específico (suelo-cal)	N°	Hidrómetro (suelo)		N°	Hidrómetro (suelo-cal)	
17	2,68	19	2,47	21	% Limo	% Arcilla	23	% Limo	% Arcilla
18	2,67	20	2,47	22	78,05	18,43	24	86,75	9,48

N°	Contenido de Humedad (suelo)	N°	Compactación (suelo)		N°	Compactación (suelo-cal)	
			Densidad. máxima	Humedad Optima		Densidad máxima	Humedad Optima
		25	**1,47**	**17,7**	28	**1,44**	**19,25**
23	6,50	26	1,58	20,65	29	1,51	17,2
24	6,94	27	1,50	16,00	30	1,47	26,15

N°	% Optimo de cal		N°	Límites de Atterberg (suelo-cal)		
				LL	LP	IP
	pH	% Optimo	32	57	41	14
31	**12,41**	**4**	33	54	47	7
			34	55	45	10

N°	Permeabilidad (suelo)	N°	Permeabilidad (suelo-cal)
35	9,04E-07	49	5,46002E-07
36	1,26E-06	50	7,90256E-07
37	1,21E-06	51	3,92902E-07
38	3,47E-06	52	4,9763E-07
39	9,60E-07	53	2,06149E-07
40	1,41E-06	54	1,48971E-07
41	1,41E-06	55	1,28239E-07
42	1,11E-06	56	1,27283E-07
43	1,53E-06	57	1,24634E-07
44	1,67E-06	58	1,14701E-07
45	1,33E-06	59	9,28053E-08
46	9,24E-07	60	1,45962E-07
47	1,04E-06	61	1,18626E-07
48	7,70E-07	62	1,36579E-07

Fuente: Elaboración propia

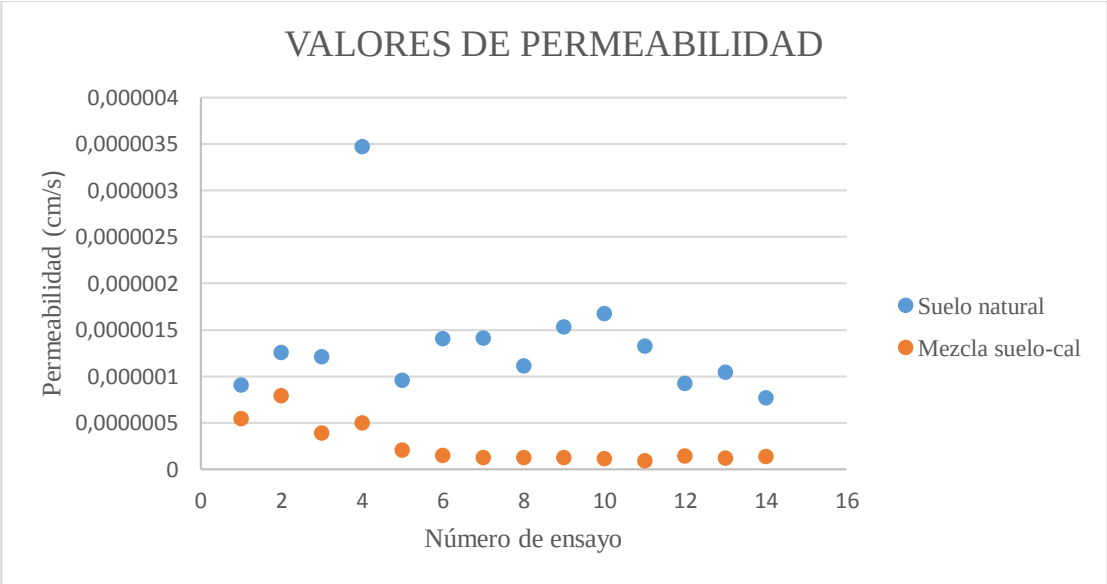
4.6 Análisis de resultados

A continuación, se representa un análisis comparativo entre las propiedades índices del suelo natural y el suelo estabilizado con cal con el 4 % en peso.

Tabla 4. 15 Tabla resumen de resultados

N°	Suelo natural	Mezcla suelo-cal
1	9,04122E-07	5,46002E-07
2	1,25652E-06	7,90256E-07
3	1,21082E-06	3,92902E-07
4	3,47046E-06	4,9763E-07
5	9,60133E-07	2,06149E-07
6	1,40712E-06	1,48971E-07
7	1,41407E-06	1,28239E-07
8	1,11456E-06	1,27283E-07
9	1,5343E-06	1,24634E-07
10	1,67306E-06	1,14701E-07
11	1,32568E-06	9,28053E-08
12	9,24043E-07	1,45962E-07
13	1,0429E-06	1,18626E-07
14	7,69907E-07	1,36579E-07

Fuente: Elaboración propia



4.6.1 Análisis estadístico

4.6.1.1 Tratamiento estadístico descriptivo

Tendencias centrales

Tabla 4. 16 Tendencias centrales del análisis estadístico

Muestra	Media	Moda	Mediana
Suelo natural	1,35769E-06	0	1,23367E-06
Suelo-cal	2,55053E-07	0	1,4127E-07

Fuente: Elaboración propia

Dispersión

Tabla 4. 17 Dispersión de datos dela análisis estadístico

Muestra	Desviación Estándar	Varianza
Suelo natural	6,61491E-07	4,37571E-13
Suelo-cal	2,15295E-07	4,63518E-14

Fuente: Elaboración propia

4.6.1.2 Tratamiento estadístico inferencial

Prueba de hipótesis

Hipótesis nula (Ho). - No existe mejoras en la propiedad permeabilidad, una vez sometido el suelo a una estabilización con cal:

$$Ho: Perm._{con\ cal} \leq Perm._{\sin cal}$$

Hipótesis alternativa (H1). - Si existe mejoras en la propiedad permeabilidad, una vez sometido el suelo a una estabilización con cal:

$$H1: Perm._{con\ cal} > Perm._{\sin cal}$$

Nivel de significancia

Se trabajará con un nivel de confianza de 95%, y así obteniendo un nivel de significancia de 5%, es decir $\propto$=0,05.

Valor crítico y de prueba (Excel)

Prueba t, para medias de dos muestras emparejadas

	Suelo sin cal	*Suelo con cal*
Media	1,3577E-06	2,5505E-07
Varianza	4,3757E-13	4,6352E-14
Observaciones	14	14
Coeficiente de correlación de Pearson	0,23876756	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	13	
Estadístico t	6,39728412	
P(T<=t) una cola	1,1767E-05	
Valor crítico de t (una cola)	1,7709334	
P(T<=t) dos colas	2,3534E-05	
Valor crítico de t (dos colas)	2,16036866	

Valor P <= Nivel de significancia, se rechaza hipótesis nula

Valor P > Nivel de significancia, se acepta hipótesis nula

P	∝
2,353E-05	0,05

Valor crítico y de prueba usando Minitab

IC y Prueba T pareada: sin cal. con cal
Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
sin cal	14	0,0000013577	0,0000006615	0,0000001768
con cal	14	0,0000002551	0,0000002153	0,0000000575

Estimación de la diferencia pareada

Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para la diferencia_μ
0,0000011026	0,0000006449	0,0000001724	(0,0000007303. 0,0000014750)

diferencia_μ: media de (sin cal - con cal)

Prueba

Hipótesis nula	H_0: $Perm._{con\ cal} \leq Perm._{\sin cal}$
Hipótesis alterna	H_1: $H1$: $Perm._{con\ cal} > Perm._{\sin cal}$

Valor T	Valor p
6,40	0,0000235342

Decisión y conclusión

Se rechaza la hipótesis nula.

Se observa que el valor de prueba P=0,00002353 es menor al valor crítico con un nivel de significancia $\propto$= 0,05 por lo que se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, concluyendo que si existe una diferencia muy significativa entre el valor medio de la permeabilidad del suelo antes y después de su estabilización con cal.

4.7 Formas de aplicación

Básicamente la aplicación de la estabilización suelo-cal, fue concebida para mejorar las características del suelo, directamente a la propiedad que más relevancia tiene, la resistencia o capacidad portante, pero el punto central de este documento es la permeabilidad, así que se hará énfasis en este tema, tomando como especificaciones técnicas las mismas que para la resistencia.

La aplicación más importante de este tipo de estabilización se da en el mejoramiento de sub-rasantes, donde existe la presencia de suelo arcilloso altamente expansivo y de baja resistencia, entonces se tiene las especificaciones técnicas para este tipo de estabilización.

Preparación del suelo y almacenamiento de la cal

Escarificación o esponjamiento del suelo o del préstamo y su colocación en capas compatibles con el mezclador a utilizar. De esta forma se mejora significativamente el rendimiento del proceso posterior de mezclado.

El suministro y almacenamiento de la cal debe hacerse teniendo en cuenta los criterios de accesibilidad, distancias, espacio necesario, seguridad e higiene, y ritmo de producción de la obra.

El almacenamiento de la cal en obra debe hacerse en contenedores que eviten que la cal entre en contacto con la humedad y con el aire para garantizar su conservación. Es muy importante también controlar y regular la humedad natural del suelo, de tal forma que, si esta es superior a la humedad óptima del ensayo proctor, convendrá aplicar un porcentaje mayor de cal a fin de reducirla. Por el contrario, si esta fuese inferior a la óptima, habrá que regar las capas en cualquiera de las fases aquí descritas.

Extendido de la cal

Adición y extensión de la cantidad, calculada previamente mediante los estudios de laboratorio pertinentes, de la cal en forma de polvo (vía seca) o de lechada (vía húmeda). Para ello, se utilizarán los equipos que garanticen la precisión requerida.

Mezclado

Mezclado de la cal y el suelo en todo el espesor de la capa mediante las pasadas necesarias para lograr su homogeneidad. Para ello se pueden utilizar equipos recicladores/estabilizadores de suelos, pulvimezcladores, motoniveladoras etc., que aseguren la eficacia necesaria.

Compactación y terminación

Compactación mecánica y humectación hasta conseguir las densidades necesarias, nivelación y curado de la capa mezclada mediante las técnicas convencionales de movimiento de tierras.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos y analizados anteriormente se obtienen las siguientes conclusiones:

El objeto de esta investigación es ver el comportamiento de la permeabilidad en un suelo natural versus este mismo suelo estabilizado químicamente (cal), los resultados obtenidos en laboratorio evidencian que la adición de cal provoca que la permeabilidad en la mezcla suelo-cal (con 4% de cal) disminuya en un 81,21%, con respecto a su estado natural, haciendo al suelo más impermeable.

La variante de saturación de la muestra, para el ensayo de permeabilidad es aceptable, así lo indica el análisis estadístico que se realizó con respecto a este punto, donde se verifica que no existe una variación significativa entre los dos métodos de saturación aplicados, dando por viable el método planteado en este documento.

La adición de cal al suelo (con un 4%) genera cambios físico químicos en el suelo, provocando cambios notorios en el índice de plasticidad, donde se observa una disminución del mismo, reduciendo su valor inicial de 29% a 5 %, reduciendo así en gran medida su plasticidad.

Otro cambio notorio, en el comportamiento de la mezcla suelo-cal es la reducción que existe en la expansión del mismo, no es el punto central de este proyecto, pero se pudo observar este comportamiento del suelo al realizar la saturación de las muestras.

Vale mencionar también, otro cambio que sucede al añadir la cal al suelo, el cambio en su granulometría, más propiamente en el diámetro de las partículas del suelo, mediante el ensayo de hidrómetro se observa el incremento en el diámetro de las partículas, esto debido a la unión de las partículas del suelo y de la cal, haciendo que el porcentaje de finos disminuya gradualmente.

Debido al uso de cal en la estabilización, como se indicó anteriormente la plasticidad de los suelos reduzca gradualmente, cambiando totalmente la clasificación del suelo, en el

caso particular del suelo en estudio pasamos de un CH (arcilla densa) a un MH (limo elástico) (clasificación SUCS).

Con la bibliografía consultada se puede afirmar que los valores de permeabilidad encontrados están dentro de los rangos establecidos por tablas presentadas por diferentes autores, pero para los valores de permeabilidad en la mezcla suelo-cal no se encontró ninguna referencia con respecto a sus valores, no obstante, en lo que diferentes autores coinciden es que evidentemente el valor de permeabilidad debe disminuir, haciendo que el suelo tenga una permeabilidad parecida a una arcilla muy densa y sin fisuras, esta disminución dependerá del grado de compactación con el que someta la muestra al ensayo de carga variable y el %W de contenido de humedad con el que se compacte la muestra, los resultados obtenidos demuestran eso, que existe un disminución de la permeabilidad.

5.2 Recomendaciones

Primeramente, tener paciencia al momento de realizar el ensayo de permeabilidad, esto debido a que el ensayo es uno de los que más demora en su ejecución, debido sobre todo a la saturación de la muestra, esto principalmente en el tema de las arcillas.

En el presente documento se calculó el coeficiente de permeabilidad, para muestras que están compactadas a su densidad máxima y humedad optima, con fines académicos se recomienda en futuros trabajos calcular la permeabilidad a diferentes densidades, esto para ver el comportamiento de la permeabilidad.

Para poder determinar el porcentaje óptimo de cal, en el presente documento se utilizó el método del pH, no obstante, no es el único, existen otros métodos como el de los límites de Atterberg, papel tornasol y el de resistencia, que podrían ser de utilidad si no se cuenta con algún equipo para uno de los diferentes métodos.

En caso de proponer alguna variable a algún ensayo que estén por realizar, buscar bibliografía que justifique esta variación, en caso de no poseer dicha bibliografía respaldar con otro ensayo, como se realizó en el presente documento en el caso de la saturación de muestra para la permeabilidad y realizar el análisis estadístico para complementar y validar el método.

Al momento de realizar el mezclado del suelo con la cal debe tenerse el cuidado especial, para lograr una buena afinidad de ambos materiales, en las guías de laboratorio indica que se debe realizar mediante una mezcladora mecánica, pero si no se cuenta con dicho equipo procurar que el método que utilicen sea eficiente y logre la mezcla adecuada.

Para que la estabilización se lleve a cabo, la mezcla suelo-cal debe alcanzar un pH mínimo de 12.4, ya que de lo contrario sólo se hace una modificación al suelo, si no se puede llegar a dicho valor usar otra cal que garantice el valor de pH requerido.