

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La estabilización de un suelo con polvo de ladrillo es una técnica de mejoramiento de suelos, cuyo fin es modificar las características y propiedades del suelo, mediante el cual se someten los suelos finos a cierta manipulación o tratamiento, lo cual permite el aprovechamiento de suelos de deficiente calidad y mejora sus propiedades, además posibilita la circulación por terrenos intransitables y reduce la sensibilidad al agua, todo con el fin de aumentar la resistencia ante la acción de cargas externas y el intemperismo, de modo que se pueda aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un suelo firme, estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas en las sub-rasantes de caminos no pavimentados.

Este proceso de estabilización de suelo con polvo de ladrillo, distingue las propiedades fundamentales de resistencia o capacidad portante, estabilidad volumétrica, compresibilidad, permeabilidad, durabilidad y disminución de la plasticidad del suelo estabilizado con polvo de ladrillo, para esto se aplicara la granulometría, límites de atterberg, la compactación Proctor modificado (T-180) y el valor relativo de soporte de california C.B.R. a las diferentes mezclas de suelo-polvo de ladrillo, con el fin de determinar la densidad máxima seca y su correspondiente humedad optima, para encontrar la resistencia y expansión de cada una de las muestras.

En la actualidad, se viene desarrollando el uso y estabilización de suelos con diferentes estabilizantes, alrededor de todo el mundo, con el fin de obtener una mayor durabilidad de los materiales que conforman la estructura del pavimento; además de tener capas de mayor capacidad de soporte y que de igual forma sean más resistentes a los agentes atmosféricos.

En los últimos años, en Colombia se realizó una investigación del comportamiento del suelo estabilizado con polvo de ladrillo, los resultados muestran que se produce un

incremento en la resistencia del suelo frente a las cargas y a diferentes condiciones climáticas. La utilización de materiales alternativos en el campo de la construcción presenta una evolución que abarca el buen funcionamiento en sus propiedades mecánicas y físicas, además de una optimización en el ámbito económico y ambiental, donde se presenta un interés en el uso de materiales que sirvan como cementantes dentro diferentes obras viales de ingeniería.

Lo que pretende el autor con este trabajo, siguiendo las normas, especificaciones y procedimientos adecuados para su validación, determinar el comportamiento de un suelo estabilizado con polvo de ladrillo, en base a diferentes ensayos de compactación proctor modificado (T-180) y el valor relativo de soporte de california C.B.R., obteniendo diversos valores de humedad óptima, densidad seca máxima, resistencia a través del C.B.R. y la expansión de las diferentes mezclas de suelo-polvo de ladrillo, de tal manera que se pueda realizar un tratamiento estadístico, análisis de resultados y la propuesta de aplicación para respaldar dichos valores encontrados.

El presente documento brindara un aporte practico, teórico y además de relevancia social, este trabajo usa la teoría de estabilizaciones de suelos, sub-rasantes, caminos no pavimentados y las diferentes normas AASHTO, ASTM y manuales técnicos de la ABC. El aporte practico consiste en la ejecución de varios ensayos de contenido de humedad, hidrómetro, granulometría, límites de atterberg, clasificación, compactación proctor modificado (T-180) y el valor relativo de soporte de california C.B.R. al suelo-polvo de ladrillo en diferentes porcentajes (0, 4, 7, 10, 14 y 18 %) de polvo de ladrillo para obtener los valores de clasificación de suelos, densidad máxima, resistencia al corte y expansión de dichos materiales, para poder realizar una propuesta de aplicación con el porcentaje óptimo de polvo de ladrillo, finalmente este trabajo de investigación tiene mucha relevancia social, puesto que se pretende utilizar estos valores para realizar estabilizaciones de suelo-polvo de ladrillo, sobre todo en obras viales.

1.2 JUSTIFICACIÓN GENERAL

Durante muchos años, y en nuestro medio el ladrillo ha sido y es un material de construcción muy utilizado, y por lo tanto, se genera muchos residuos del mismo, los

cuales han sido acumulados en lugares especiales o simplemente botados en zonas públicas, o en ríos o quebradas. Tal situación ha causado un problema grave al medio ambiente y la salud pública.

Entonces al realizar esta Evaluación del polvo de ladrillo como estabilizante de suelo en caminos no pavimentados, nos podrá valorar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos en sub-rasantes de los caminos no pavimentados.

Una vez conocido el comportamiento de la mezcla suelo-polvo de ladrillo, se podrá elaborar propuesta de aplicación del suelo-polvo de ladrillo en sub-rasantes de caminos no pavimentados, al porcentaje óptimo de polvo de ladrillo que se encuentre en el laboratorio.

El mal estado de los caminos no pavimentados en nuestro medio, se dan porque no existe un tratamiento adecuado para el ripiado o estabilizado de suelos, debido a los diferentes costos y acceso a los materiales. Por lo que en este trabajo de investigación presentara una alternativa de estabilización de suelos en sub-rasantes de los caminos no pavimentados.

1.3 PLANTEAMIENTO AL PROBLEMA

1.3.1 SITUACIÓN PROBLÉMICA

Actualmente en nuestro medio no se cuenta con un manejo adecuado de los residuos industriales, tales como los desechos de residuos de ladrillos, el mal manejo de estos residuos suele generar botaderos clandestinos, que provocan no solo obstrucciones en ríos, terrenos y vías públicas, sino, también riesgos directos e indirectos sobre la salud humana y el medio ambiente; por lo cual eso se convierte en un inconveniente para la sociedad, como la reproducción de ratas, moscas y otros transmisores de enfermedades, así como la contaminación del aire y del agua que han sido relacionados con el almacenamiento, recogida y evacuación de los residuos industriales. A pesar de que los desechos sólidos de ladrillo siempre se han generado en el mundo, el problema tiende

a empeorar debido al desmedido aumento de la producción y el consumo de bienes y servicios.

Por tanto, debería plantearse y aprobarse normas para la gestión de un mejor manejo de estos residuos industriales mediante su reducción, reciclaje, reusó, reprocesamiento, transformación y vertido, lo cual se debe convertirse en una prioridad para nuestra sociedad.

También se presenta el problema de caminos no pavimentados deficientes que no cumplen con las propiedades mínimas requeridas para la construcción de sub-rasantes en caminos no pavimentados, por lo que no prestan un buen servicio a los usuarios.

Púes no está de más, experimentar las posibles mezclas de suelo-polvo de ladrillo con diferentes porcentajes de polvo de ladrillo para realizar la investigación del proyecto de "Evaluación del polvo de ladrillo como estabilizante de suelo en caminos no pavimentados", para buscar mejores propiedades físico-mecánico de las sub-rasante de los caminos no pavimentados en nuestro medio y paralelamente deshacerse limpiamente de un residuo contaminante como estrategia de optimización de los recursos.

1.3.2 PROBLEMA

¿Cuál es el efecto que tienen las propiedades de resistencia o capacidad portante del suelo estabilizado con polvo de ladrillo en sub-rasantes de caminos no pavimentados, ante la acción de cargas externas y condiciones climáticas más severas?

1.4 OBJETIVOS DEL PROYECTO

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar el comportamiento del suelo cuando se le adiciona polvo de ladrillo en diferentes porcentajes, de tal manera pueda identificarse el comportamiento en las

propiedades mínimas requeridas para la construcción de sub-rasantes en caminos no pavimentados.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar toda la teoría de la estabilización de suelos, específicamente utilizando como estabilizante polvo de ladrillo en los caminos no pavimentados.
- Identificar los lugares donde tenga suelo cohesivo fino, apto para la realización de los ensayos de laboratorio.
- Identificar el lugar donde se pueda obtener el polvo de ladrillo para utilizar en la estabilización del suelo en estudio.
- Caracterizar el polvo de ladrillo para conocer sus características del material que se utilizara en la estabilización del suelo.
- Caracterizar el suelo-polvo de ladrillo que se utilizaran en la estabilización del suelo, y así obtener una base de datos.
- Calcular resultados de la combinación de la masa de un suelo con diferentes porcentajes de polvo de ladrillo.
- Elaborar una propuesta de aplicación del suelo-polvo de ladrillo en sub-rasantes de caminos no pavimentados, al porcentaje óptimo de polvo de ladrillo.
- Formular las conclusiones y recomendaciones sobre el tema de estudio.

1.5 HIPÓTESIS

Si se aplica al suelo una cantidad de polvo de ladrillo para modificar las propiedades del suelo cohesivo fino, entonces se podrá evaluar el Comportamiento de las propiedades del suelo con polvo de ladrillo, y así se podrá validar esta técnica de estabilización de suelos y se elaborara una propuesta de aplicación de estabilización de suelo con polvo de ladrillo en sub-rasantes de caminos no pavimentados en nuestro medio.

1.6 DEFINICIÓN DE VARIABLES

Variable independiente

Tipo de suelo y polvo de ladrillo.

Variables dependientes

Comportamiento físico-mecánico de las propiedades del suelo estabilizado con polvo de ladrillo.

Conceptualización y operacionalización

Se realizara la conceptualización y operacionalización de las variables independientes y dependiente como se indica a continuación:

Variables Independientes

		Operacionalización		
Variable nominal	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor- acción Técnicas

V1 Tipo de suelo y polvo de ladrillo.	Se refiere a los diferentes materiales que componen la mezcla suelo-polvo de ladrillo.	Polvo de ladrillo	(0 – 18)%	Manual de estabilizaciones de suelos, AASTHO, ASTM, etc.
		Suelo-polvo de ladrillo	Contenido de humedad	ASTM D2216
			Hidrómetro	ASTM D2216
			Granulometría	ASTM D422
			Límites	ASTM D4318
			Clasificación	AASTHO – SUCS
			Compactación	AASTHO T-180-272
			CBR	AASTHO T-193

Variable Dependiente

Operacionalización

Variable nominal	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor- acción Técnicas
V2 Comportamiento físico-mecánico de las propiedades del suelo estabilizado con polvo de ladrillo	Se refiere al Comportamiento físico-mecánico de las propiedades del suelo estabilizado con polvo de ladrillo	Análisis granulométrico	Curva granulométrica	Clase de mezcla suelo
		Límites de Atterberg	Índice de plasticidad	Clase de mezcla suelo
		Compactación	Contenido de humedad óptimo	Clase de mezcla suelo
			Máxima Densidad	Métodos, medir densidad
		CBR	Resistencia	Métodos, medir peso
			Expansión	Métodos, extensómetro

1.7 DISEÑO METODOLÓGICO

1.7.1 COMPONENTES

UNIDAD DE ESTUDIO

Comportamiento físico-mecánico de las propiedades del suelo-polvo de ladrillo.

La unidad o el área de estudio consisten en evaluar el comportamiento físico-mecánico de las propiedades del suelo-polvo de ladrillo, esto para el suelo cohesivo fino con diferentes cantidades de ladrillo molido.

POBLACIÓN

Diferentes tipos de suelos y diferentes tipos de materiales estabilizadores.

La población comprenderá los diferentes tipos de suelos, tanto materiales granulares como material fino, también abarca los diferentes tipos de materiales estabilizadores, tanto para mejorar la expansión y su resistencia de los suelos, los tipos de suelos a tomar en cuenta en el proyecto se clasificaran según el sistema AASHTO.

MUESTRA

Suelo cohesivo fino y polvo de ladrillo

La muestra incluirá específicamente los suelos finos y polvo de ladrillo, las propiedades a tomarse en cuenta para el proyecto concretamente son los siguientes ensayos: límites de Atterberg, granulometría, compactación y ensayo de CBR, según el sistema AASHTO.

MUESTREO

Aleatorio probabilístico

Consiste en obtener muestras de suelos finos y ladrillo molido de los bancos de préstamo, de tal manera cada una de las muestras tengan la misma probabilidad de ser

elegida para el trabajo, esto marcando un área donde se encuentren dichas muestras y elegir las aleatoriamente sin discriminación alguna.

1.7.2 DEFINICIÓN DEL MÉTODO PARA LA SELECCIÓN DE MUESTRAS

Para el proyecto se utilizará el muestreo probabilístico anteriormente descrito, puesto que al ir a traer material del banco de préstamo, este material se encontrará alojado en un área determinada, entonces, se delimitará un área menor que contenga el material que se adecue para el proyecto y se tomarán muestras cada cierta distancia de un punto de muestreo a otro, esto para toda el área delimitada, con la finalidad de que todas las muestras que se tomen tengan la misma probabilidad de ser elegidos para el proyecto. Las distancias de un punto de muestreo a otro variarán dependiendo de la exactitud que se quiera obtener y de los tipos de suelo que tenga el banco de préstamo, puesto que tendremos que delimitar un área, la cual tenga el material que se necesita.

También se utilizará el muestreo aleatorio probabilístico con reposición o reemplazamiento, puesto que para el proyecto se repetirá el uso de un determinado suelo. Es así que para las diferentes mezclas de suelos clasificados según el sistema AASHTO, poco a poco se va variando las características de estos suelos de un tipo a otro, y se puede encontrar coincidencias de que las características de un mismo tipo de suelo sean casi las mismas para otro tipo de suelo; entonces se podrá reutilizar un tipo de suelo para varios ensayos, esto dependiendo de la cantidad de material que se necesite para las diferentes pruebas.

Descripción

Primeramente se visitará un banco de préstamo para la extracción del material, posteriormente se ubicará o delimitará un área total, dicha área tendrá que tener, según inspección visual el material con las características que se necesita para el proyecto. Se elegirá el área por el tamaño de las partículas que posee dicha área delimitada, luego el

área total se sub dividirá en áreas muchos más pequeñas para realizar la selección, una vez que el área mayor este dividido, se recogerá las muestras de forma aleatoria, es decir, las muestras a ser usadas para el proyecto se elegirán de forma discontinua. Esta selección será discontinua, de tal manera que se tome una muestra y no se deje una sin ser elegir y así progresivamente hasta abarcar con el total del área mayor antes delimitada.

1.7.3 PROCEDIMIENTO

Lo que se pretende con el presente proyecto es determinar el comportamiento físico-mecánico de las propiedades del suelo-polvo de ladrillo, aplicado al suelo con diferentes cantidades de polvo de ladrillo, considerando el índice de plasticidad, la densidad seca máxima y humedad óptima de los mismos, como también su expansión y resistencia del suelo-polvo de ladrillo en base a diversos ensayos a realizar en laboratorios debidamente normalizados. Para la realización de los ensayos para la estabilización de suelo-polvo de ladrillo se utilizará el laboratorio del servicio departamental de caminos de Tarija; a continuación se describen los procesos a seguir:

- Recopilación de Información.
- Ubicación del banco de préstamo.
- Toma de muestras del material en obra.
- Obtención de datos
- Aplicación práctica.
- Realización de análisis y comparación de los resultados obtenidos.
- Elaboración de una propuesta de aplicación de suelo-polvo de ladrillo al porcentaje óptimo, para la sub-rasante en caminos no pavimentados.
- Análisis económico.
- Conclusiones y recomendaciones.

1.7.4 TÉCNICAS

Posteriormente, terminado el reconocimiento de los bancos de préstamo y la recolección de los materiales mediante el muestreo aleatorio probabilístico se continuara con la caracterización de los materiales.

Para conocer las características o propiedades de los materiales a usar en el proyecto se efectuara una caracterización con los siguientes ensayos:

Cuarteo del material:

Antes de empezar con la caracterización se procederá al cuarteo del material elegido, con la finalidad de que la muestra a utilizar; obtenga todas características al igual que las demás muestras a utilizar, para ello se depositara todo el material seleccionado a en un recipiente y se realizara en mezclado total de toda la muestra. A continuación se dividirá dicha muestra en cuatro partes iguales, de las cuales dos partes serán utilizadas para el proyecto, tomando en cuenta la cantidad mínima de material que se necesita para cada ensayo.

Una vez tomadas las muestras del material se ejecutaran los ensayos en el laboratorio que se detallan a continuación, tanto para el suelo en estado natural, como para el suelo estabilizado con polvo de ladrillo; los cuales se detallan a continuación:

- Contenido de humedad de las muestras
- Análisis granulométrico mediante el hidrómetro.
- Análisis granulométrico mediante el método de lavado.
- Ensayos para la determinación del Límite Líquido (LL), Límite Plástico (LP) e Índice de Plasticidad (IP).
- Compactación Proctor Modificado (T-180).
- CBR. (Valor Relativo de Soporte de California)

- Propuesta de aplicación de estabilización del suelo-polvo de ladrillo, en sub-rasantes de caminos no pavimentados.

1.8 ALCANCE DEL PROYECTO

En el capítulo I, se presenta toda la información previa del proyecto de investigación, como ser la introducción de la investigación, que establece los conceptos y propósitos del mismo, el planteamiento del problema que enfoca la situación problemática y problema por el cual se realiza el proyecto, los objetivos general y específicos, los mismos que se pretenden cumplir con el proyecto y la hipótesis de la investigación, con sus variables dependientes e independientes bien conceptualizadas y operacionalizadas, también incluye el diseño metodológico en el cual se selecciona las muestras, la metodología de la investigación y las técnicas a realizarse en laboratorio; y por último contempla el alcance del proyecto de investigación.

El capítulo II del proyecto se basa en la teoría sobre la Evaluación del polvo de ladrillo como estabilizante de suelo en caminos no pavimentados, el cual abarca todos los temas importantes referido a la utilización de materiales para mejorar la sub-rasante en caminos no pavimentados, dicha información es prioritaria para llevar a cabo de manera correcta el proyecto, entre los más importantes esta la introducción, la sub-rasante en caminos no pavimentados, la estabilización de suelos, tipos, ventajas y razón de la estabilización, la estabilización de suelo-polvo de ladrillo, características, ventajas y desventajas, materiales utilizados en la estabilización de suelos, entre ellos está el suelo, ladrillo molido y el agua, y caminos no pavimentados, sus características estructurales, tales como la sub-rasante y capa de rodadura.

El capítulo III incluye todo el relevamiento de información que el proyecto requiera, entre los más importantes, se tiene el reconocimiento de los bancos de préstamo, para conocer qué tipo de material contienen dichos bancos de préstamo; los criterios de muestreo para tener en claro de qué forma se realizara la obtención de las muestras de los suelos, como también la obtención del polvo de ladrillo, sus características del suelo

natural y el suelo-polvo de ladrillo y los criterios de caracterización para contar con información sobre las normas y procedimientos a seguir para cada tipo de ensayo que se realice y que grado de exactitud presentan dichos ensayos; los laboratorios a utilizar y si se encuentran normalizados, también tratará todo el análisis de resultados y se establece la correlación sobre comportamiento del valor de soporte de california, CBR, que presenta el suelo-ladrillo molido, para esto se realizara el análisis de los resultados sobre el comportamiento físico-mecánico de las propiedades del suelo-polvo de ladrillo, se presenta la propuesta final de aplicación sobre la estabilización del suelo-polvo de ladrillo a su contenido óptimo, para sub-rasantes en caminos no pavimentados en nuestro medio.

El capítulo IV expone las conclusiones y recomendaciones a las que se arribaron al terminar el proyecto; dichas conclusiones se refieren principalmente si los objetivos, tanto general como específicos se cumplieron o en qué grado o porcentaje se lograron ejecutar. También incluye las conclusiones de los resultados y de la propuesta de aplicación en sub-rasantes para caminos no pavimentados. Finalmente las recomendaciones muy importantes que se tomaran en cuenta aspectos para poder ejecutar el proyecto de investigación, es decir que requisitos que se necesitan para ejecutar la propuesta final presentada y utilizar de manera eficiente los valores obtenidos durante la realización del proyecto.

CAPÍTULO II

ASPECTOS GENERALES SOBRE LA UTILIZACIÓN DE MATERIALES PARA MEJORAR LA SUB-RASANTE EN CAMINOS NO PAVIMENTADOS

2.1 INTRODUCCIÓN

Cuando un suelo presenta resistencia suficiente para no sufrir deformaciones ni desgastes inadmisibles, por la acción del uso o de los agentes atmosféricos y conserva además, esta condición bajo los efectos climatológicos normales en la localidad, se dice que el suelo es estable.

El suelo natural posee a veces la composición granulométrica y la plasticidad así como el grado de humedad necesario para que, una vez apisonado, presente las características mecánicas que lo hacen utilizable como firme de un camino.

Los métodos empleados en la antigüedad para utilizar los suelos en la construcción eran empíricos y, como las demás actividades artesanas, se transmitían de generación en generación.

Por otro lado, los conocimientos en la actualidad sobre este campo se basan principalmente en estudios sistemáticos con fundamento científico corroborado mediante la experimentación.

En general puede decirse que todos los suelos pueden ser estabilizados, pero si la estabilización ha de lograrse por aportaciones de otros suelos o por medios de otros elementos el costo de la operación puede resultar demasiado alto si el suelo que se trata de corregir no posee determinadas condiciones.

Entre las aplicaciones de un suelo modificado o estabilizado se encuentran la mejora de los suelos granulares susceptibles a las heladas y el tratamiento de los suelos limosos y/o arcillosos para reducir los cambios de volumen.

El incremento de los costos de construcción y mejoramiento de la vialidad en general, ha planteado a los Ingenieros viales un reto: la investigación y desarrollo de nuevas técnicas que permitan una utilización más racional de los recursos disponibles.

El alto costo del transporte de granulares obliga a su preservación, recuperación y reutilización (reciclaje) para lograr la indispensable transitabilidad en la vialidad, además de su innegable aporte a la conservación ambiental.

Los suelos para la construcción de carreteras, en general, son variables y complejos. Existen muchos que en su estado natural no reúnen las características para materiales de fundación y construcción, por lo cual, se presentan tres decisiones para su utilización:

- Aceptar el material como está y efectuar el diseño de acuerdo con las restricciones impuestas por su calidad.
- Remover y desechar el suelo del lugar y sustituirlo por uno de características apropiadas.
- Mejorar sus propiedades, de tal manera que se obtenga uno que reúna en mejor forma los requisitos necesarios o cuando menos que la calidad obtenida sea adecuada.

2.2 ESTABILIZACIÓN DE SUELOS

Se denomina Estabilización de Suelos al proceso de someter a los suelos naturales a ciertos tratamientos para aprovechar sus mejores cualidades de manera que puedan soportar las condiciones adversas inherentes al diseño, rindiendo en todo tiempo el servicio adecuado que de ellos se espera, es decir dar a los suelos resistencia al esfuerzo cortante, a la deformabilidad o compresibilidad, dar estabilidad volumétrica ante la presencia del agua, reducir la infiltración y capilaridad, siempre buscando, una mejoría sustancial en el comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos y/o de la estructura que se coloque sobre ellos, a lo largo de su vida útil.

La estabilización de un suelo es el procedimiento con el cual se busca mejorar las condiciones existentes que tiene el suelo en estado natural, esto se realiza mezclando el suelo con otro suelo diferente o con algún estabilizante o aditivo, el cual se describe como un conjunto de procesos mecánicos, físicos y físico-químicos; tendientes a modificar las propiedades de los suelos que interesan para un determinado uso en ingeniería, haciendo que el material “suelo” sea adecuado para la utilización prevista reemplazando a otros materiales no disponibles o más costosos.

Debido a este hecho y a sus diversas utilidades, el ingeniero tiene grandes oportunidades para desarrollar sus habilidades, utilizando a los suelos como un material de construcción o mejoramiento de vías no pavimentadas y de esta manera dar soluciones a problemas que presentan la mayoría de las carreteras terciarias en Bolivia y en el departamento de Tarija en particular.

Es por eso que la estabilización de suelos que no reúnen los requisitos mínimos para la construcción o mejoramiento de carreteras, surge como una alternativa de solución a esta problemática.

Este método consiste en la mejora integral de las propiedades geo mecánicas del suelo natural, de tal manera que se obtenga un suelo que cumpla los requisitos necesarios en la construcción de caminos, como son resistencia a esfuerzo cortante, durabilidad en condiciones desfavorables e impermeabilidad.

La estabilización del suelo también involucra la corrección de una deficiencia para darle una mayor resistencia al terreno o bien, disminuir su índice de plasticidad.

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

La estabilización de un suelo es un proceso orientado hacia el mejoramiento integral de sus propiedades geo mecánicas: el incremento de la resistencia al esfuerzo cortante y la disminución de su compresibilidad y su permeabilidad, por lo que la estabilidad de un suelo está asociada a su capacidad portante a las funciones drenables y no drenables contenidas en él.

Figura 1. Estabilización de suelos



Fuente: civilgeeks.com

2.2.1 TIPOS DE ESTABILIZACIÓN

2.2.1.1 ESTABILIZACIÓN FÍSICA

Se utiliza para mejorar el suelo produciendo cambios físicos, hay varios métodos como lo son:

Mezclas de Suelos: este tipo de estabilización es de amplio uso pero por si sola no logra producir los efectos deseados, necesitándose siempre de por lo menos la compactación como complemento.

Por ejemplo, los suelos de grano grueso como las grava-arenas tienen una alta fricción interna lo que les permite soportar grandes esfuerzos, pero esta cualidad no hace que sea estable como capa de asiento del firme de una carretera ya que, al no tener cohesión sus partículas se mueven libremente y con el paso de los vehículos se pueden separar e incluso salirse del camino.

Las arcillas, por lo contrario, tienen una gran cohesión y muy poca fricción lo que provoca que pierdan estabilidad cuando hay mucha humedad.

La mezcla adecuada de estos dos tipos de suelo puede dar como resultado un material estable en el que se puede aprovechar la gran fricción interna de uno y la cohesión del otro para que las partículas se mantengan unidas.

Llamamos estabilización de un suelo al proceso mediante el cual se someten los suelos naturales a cierta manipulación o tratamiento de modo que podamos aprovechar sus mejores cualidades, obteniéndose un firme estable, capaz de soportar los efectos del tránsito y las condiciones de clima más severas.

Ahora con polvo de ladrillo: se realizara una investigación de su comportamiento físico-mecánico del suelo-polvo de ladrillo, y poder ofrecer una alternativa de estabilización de sub-rasantes de caminos no pavimentados.

2.2.1.2 ESTABILIZACIÓN QUÍMICA

Se refiere principalmente a la utilización de ciertas sustancias químicas patentizadas y cuyo uso involucra la sustitución de iones metálicos y cambios en la constitución de los suelos involucrados en el proceso.

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

Cal: disminuye la plasticidad de los suelos arcillosos y es muy económica.

Cemento portland: aumenta la resistencia de los suelos y se usa principalmente para arenas o gravas finas.

Otros productos utilizados son:

Productos Asfálticos: es una emulsión muy usada para material triturado sin cohesión.

Cloruro de sodio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

Cloruro de calcio: impermeabilizan y disminuyen los polvos en el suelo, principalmente para arcillas y limos.

Escorias de fundición: se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

Polímeros: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

Caucho de Neumáticos: este se utiliza comúnmente en carpetas asfálticas para darle mayor resistencia, impermeabilizarla y prolongar su vida útil.

2.2.1.3 ESTABILIZACIÓN MECÁNICA

Es aquella con la que se logra mejorar considerablemente un suelo sin que se produzcan reacciones químicas de importancia, además es una de las estabilizaciones de suelos más antiguas e importantes.

Sus principales objetivos son:

- Reducir la relación de vacíos en el interior del suelo, de acuerdo a la estructura mineral del material natural.
- Incrementar la resistencia al corte producido por el tránsito.
- Lograr que el suelo no sea susceptible a cambios bruscos de volumen, principalmente en la presencia de agua.

Se la puede realizar de dos formas: Compactación Estática mediante rodillos cilíndricos y Compactación Dinámica mediante rodillos vibrantes.

Los métodos estáticos dan mejores resultados para los suelos ricos en finos, mientras que para suelos de materiales gruesos, los métodos dinámicos son los más eficientes.

Por otro lado, se ha visto que en suelos finos tiene una importancia decisiva la energía de compactación y la cantidad de agua contenida en un suelo, sobre todo cuando se emplean humedades más altas que la óptima, pues por ejemplo, la energía aplicada por métodos dinámicos puede ocasionar que el compactado del lado húmedo presente resistencias del orden de hasta cuatro veces menor que la resistencia que, a igualdad de circunstancias, presenta el mismo suelo compactado en forma estática.

La compactación como método de estabilización de suelo en carreteras resulta adecuado y de bajo costo, esto si el material natural tiene una granulometría equilibrada entre material grueso y fino.

Pero si el suelo tiene mayor porcentaje de material grueso o fino, la compactación resulta complicada ya que la distribución de granos es desigual, por lo que la densificación del suelo para incrementar su resistencia a corte resulta débil y de poca duración.

Otro factor importante que puede afectar la compactación es el clima, el cual deberá ser poco húmedo, ya que el material fino y el agua forman una masa inmanejable para su compactación.

Por esto el mejoramiento de una capa de rodadura mediante el método de compactación solamente, deberá ser seleccionado entre otros considerando estos factores que garanticen su durabilidad.

Figura 2. Estabilización mecánica de suelos



Fuente: Taringa.net

2.2.2 RAZÓN POR LA QUE SE REALIZA LA ESTABILIZACIÓN

Se efectúa la estabilización para mejorar varias propiedades esenciales de los suelos; pero también puede producirse el caso de que algunas de estas propiedades lleguen a deteriorarse inmediatamente o con el paso del tiempo. Para evitar esta situación, es importante elegir o especificar un sistema de estabilización y ver que sea el más correcto posible.

Además, es necesario determinar el porcentaje óptimo de estabilizante, y tener la seguridad que sea el adecuado para cada caso particular.

Por otro lado es importante realizar la investigación del comportamiento de los materiales estabilizados, analizando a corto y largo plazo las propiedades que se mejoran y se mantienen al paso del tiempo, estando conscientes del costo que implica la tarea, de las múltiples propiedades del suelo, las más importantes que se buscan mejorar con las estabilizaciones son las siguientes:

2.2.2.1 DISMINUIR LA PLASTICIDAD

La plasticidad del suelo está relacionada con el concepto de límites de Atterberg, término conocido en la mecánica de suelos.

Los límites de Atterberg relacionan la capacidad que tienen los suelos cohesivos para adsorber agua sobre la superficie de sus partículas, ya que cuanto mayor es la cantidad de agua que contiene un suelo, menor es la interacción entre sus partículas adyacentes y más se aproxima el suelo en su comportamiento al de un material líquido; por lo tanto, una alteración en los valores de estos límites indicara una modificación del agua adsorbida por el suelo.

Por lo que el término limoso se aplica cuando las fracciones de finos del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menor y el término arcilloso se aplica cuando las fracciones de finos tienen un índice de plasticidad de 11 o mayor. BRAJA M. DAS. (2001)

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

2.2.2.2 ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA Y COMPRESIBILIDAD

Estabilidad volumétrica

La estabilidad volumétrica de un suelo se refiere al apreciable cambio de volumen que sufren los suelos, debido al cambio de humedad y los esfuerzos internos afectados por el agua.

Cuando un suelo saturado se seca, cambia su volumen (retracción).

Esta pérdida de volumen se debe a la desecación ocurrida en el suelo, que provoca una modificación en la tensión capilar del menisco formado en cada, poro de la superficie.

Luego se produce una tracción en el agua del suelo y la correspondiente compresión en la estructura del mismo, siendo ésta última bastante considerable e inclusive actúa como una carga en el mismo.

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

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

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

Compresibilidad

La compresibilidad es una propiedad que está relacionada íntimamente con el cambio volumétrico del suelo, el cual se manifiesta a través de un asentamiento.

Este asentamiento es producido por el peso propio del material o por cargas externas superficiales que originan un cambio en la relación de vacíos, flexión y la distorsión o, cambio de formas de la fase sólida del suelo inmediatamente debajo de la carga.

Sin embargo, en las arcillas el factor más importante de la compresibilidad es la repulsión eléctrica entre sus partículas que tienen cargas iguales o, que están rodeadas de cationes con cargas semejantes que las mantienen apartadas.

La reducción de la compresibilidad del suelo puede lograrse llenando los poros del mismo, es decir, cementando los granos con un material rígido.

Pero también, es posible reducir esta propiedad cambiando las fuerzas del agua absorbida por el mineral de arcilla.

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

2.2.2.3 PERMEABILIDAD

La permeabilidad es una propiedad que indica la mayor o menor facilidad que tiene el agua de fluir a través de los vacíos del suelo, estando sujeta a un gradiente hidráulico determinado.

Esta propiedad depende de una serie de factores y propiedades físicas del suelo, algunas de ellas como la temperatura, viscosidad del agua, el tamaño, la forma y el área de los conductos a través de los cuales circula el agua, son factores determinantes de esta propiedad.

La permeabilidad puede reducirse llenando los poros con un material impermeable o, modificando la estructura del mineral de arcilla con el fin de impedir la floculación de las partículas. Por otro lado, se puede aumentar la permeabilidad quitando los granos finos del suelo o creando una estructura conglomerada.

Los métodos de estabilización tales como la compactación de suelos y el uso de algunas sustancias químicas, pueden modificar significativamente la permeabilidad; pero el uso de esta última técnica debe ser cuidadosamente analizado, ya que en algunos casos puede ejercer efectos desfavorables en otras propiedades de los suelos estabilizados.

2.2.2.4 RESISTENCIA O CAPACIDAD PORTANTE Y DURABILIDAD

Resistencia o capacidad portante

La resistencia o capacidad portante de un suelo es la propiedad que se refiere a la capacidad que tiene el suelo de soportar cargas continuas de tráfico, para no sufrir fallas y deformaciones inadmisibles en su estructura.

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

Durabilidad

La durabilidad es la propiedad que tiene el suelo de mantener las propiedades mecánicas a través del tiempo, ofrecer resistencia al intemperismo, la erosión y abrasión del tráfico.

Esta propiedad de durabilidad se refiere a los suelos que están sujetos a solicitaciones de trabajo, más específicamente en las superficies de rodadura, y su menor o mayor deterioro dependerá su menor o mayor calidad del mismo, de ahí que viene a la importancia del análisis de las estabilizaciones.

Un suelo estabilizado puede utilizarse como un revestimiento que soporte directamente los efectos del tránsito sobre su superficie

2.2.3 VENTAJAS DE LA ESTABILIZACIÓN

Desde el punto de vista económico, la alternativa de la estabilización de suelos para construir múltiples capas y gruesas bases y sub-bases es muy atractiva y por lo tanto es muy ventajosa.

Desde el punto de vista de la Ingeniería, la estabilización de suelos puede suministrar las siguientes ventajas si se compara con los suelos existentes no estabilizados:

- Funciona como una plataforma de trabajo.
- Impermeabiliza el suelo.
- Mejora la resistencia.
- Controla el cambio de volumen del suelo.
- Mejora la capacidad de manejo del suelo.
- Disminuye los espesores de pavimentos.
- Suministra una superficie de desgaste temporal.
- Reduce la producción de polvo.
- Mejora los materiales de segunda clase.
- Aumenta la durabilidad.
- Seca los suelos húmedos.
- Conserva los agregados.

- Reduce los costos.
- Conserva energía.

2.2.4 SELECCIÓN DEL ESTABILIZANTE

Un principio fundamental para la elección del estabilizante, es el aspecto económico en la construcción de caminos no pavimentados o municipales, esto fue lo que nos llevó a realizar el presente estudio

Idealmente, se deben ejecutar pruebas de campo para determinar el tipo y características del subsuelo existente y de los materiales que se pueden adicionar.

Luego se deben efectuar pruebas de laboratorio para analizar las propiedades de Ingeniería, esto debido a que los suelos existentes en la sub-rasante del camino, son materiales susceptibles a cambios de volumen y baja resistencia de la sub-rasante en caminos.

Al considerar la estabilización química, se debe tener en cuenta varios grupos principales de aditivos:

Cal.

Cemento Portland.

Asfalto.

Polvo de ladrillo.

También se utiliza materiales unos con otros o en combinación con cenizas o cloruro de calcio.

Las pruebas de laboratorio y la experiencia han demostrado como estos componentes actúan para mejorar las propiedades de varios tipos de suelos.

Para seleccionar el estabilizador se debe tomar en cuenta el tipo de suelo existente en el lugar donde se va a estabilizar, como también el suelo que se va a mezclar con el

estabilizante, y así determinar qué tipo de estabilizante va ser utilizado en dicha estabilización de suelos.

Este trabajo se enfoca la investigación de evaluación del polvo de ladrillo como estabilizante de suelo en caminos no pavimentados.

2.2.5 EVALUACIÓN DE MÉTODOS DE ESTABILIZACIÓN

Debido a la gran variabilidad de suelos en la superficie terrestre, cada método de estabilización de suelos, resulta aplicable solamente a un número limitado de ellos y a otros no.

Puede suceder que en unos cuantos metros se puede tener variabilidad en los suelos, de tal manera que aplicando un cierto sistema de estabilización, este puede no ser efectivo para todos los suelos encontrados.

Para enfrentar esto, es indispensable identificar el material natural que se está estudiando, mediante análisis de mecánica de suelos en laboratorio (Análisis granulométrico, Límites de Atterberg, Clasificación de suelos, Ensayo de Compactación proctor modificado T-180, Ensayo de valor de soporte de california CBR).

Así mismo conocer el tipo y la cantidad de tránsito que circula la zona y las características climáticas del lugar.

De acuerdo a las características de la zona de estudio se consideraron 4 aspectos decisivos en la construcción y mejoramiento de caminos, para evaluar las alternativas de estabilización descritas anteriormente: Aspecto Socio-económico, Geológico, Climático y ambiental.

2.3 ESTABILIZACIÓN DE SUELO-POLVO DE LADRILLO

La estabilización de suelo-polvo de ladrillo es una combinación en diferentes porcentajes de suelo añadiendo polvo de ladrillo, con el cual se buscara mejorar las

propiedades de los suelos estabilizados, mediante la compactación mecánica de los suelos, para este fin se evaluara el polvo de ladrillo como estabilizante de suelo en caminos no pavimentados, donde se realizaran varios ensayos de laboratorio.

También se ha establecido el mejor índice de plasticidad (I.P.) en suelos considerados para estabilización con polvo de ladrillo.

Por ejemplo, para materiales arenosos el I.P. debe ser menor de 30, mientras que para suelos de gradación fina debe ser menor de 20, en el caso de suelos limosos el IP debe ser menor a 10.

Esta limitación es necesaria para asegurar una mezcla conveniente del suelo con el estabilizador.

El polvo de ladrillo reduce el índice de plasticidad de muchos suelos, a menudo se utiliza una combinación de suelo-polvo de ladrillo para estabilizar algunas áreas de la ingeniería vial.

El suelo-polvo de ladrillo es una mezcla íntima de suelo, con determinadas porciones de suelo natural, agua y polvo de ladrillo que se compacta y cura para obtener mayor densidad.

La estabilización de suelos con polvo de ladrillo para mejorar las propiedades, características y permitir su aprovechamiento es una técnica moderna, económica y sostenible como una alternativa de construcción de sub-rasantes en caminos no pavimentados.

2.3.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS MATERIALES QUE CONSTITUYEN LA MEZCLA DE SUELO-POLVO DE LADRILLO

Los suelos más adecuados para su tratamiento y estabilización con polvo de ladrillo son aquellos que tienen un componente limoso importante.

Los efectos de la estabilización con polvo de ladrillo son los siguientes:

- Aumento de la resistencia o capacidad portante

- Aumento de la durabilidad
- Aumento del índice CBR
- Disminución de la plasticidad
- Disminución de la permeabilidad
- Disminución de la estabilidad volumétrica
- Disminución de la compresibilidad del suelo

La cantidad de polvo de ladrillo puede variar entre 0 y 18 % del peso seco de la mezcla, en porcentajes de 0, 4, 7, 10, 14 y 18 %

En promedio las dosificaciones de polvo de ladrillo se manejan alrededor del 10 %, y se procura que no exceda este porcentaje debido al incremento en el costo del proceso de construcción.

La comprobación de la dosificación de polvo de ladrillo en cada momento es importante, tanto desde el punto de vista económico como del funcional para adaptarse de la mejor manera a las características del suelo ya que una dosificación insuficiente no cumplirá el objetivo de mejoramiento mecánico y por otra parte una dosificación excesiva puede inducir fenómenos de fatiga bajo las cargas a las cuales será sometida la estructura.

Figura 3. Camino de suelo con polvo de ladrillo



Fuente: Taringa.net

2.3.2 SUELOS

Casi en su totalidad, los diferentes tipos de suelos son aptos para ser usados en este tipo de trabajos, excepto los suelos orgánicos, suelos con altos contenidos de sales (que pueden afectar un buen desempeño del cemento), suelos arenosos probablemente reactivos y las arcillas de alta plasticidad,

De preferencia se deben usar materiales granulares debido a su facilidad en la pulverización o disgregación y a su mezcla, requiriendo además un menor porcentaje de cemento, factor que incide directamente en el aspecto económico de la mezcla.

Con el fin de tener una referente sobre la distribución granulométrica de los áridos, haciéndose una puntualización que indica que los materiales con porcentajes pasantes de la malla No. 200 entre el 5% y el 35% son los que producen suelos - cemento más económicos, limitándose el tamaño máximo a 50 mm y con un porcentaje de material pasante la malla No. 4 no menor del 55%

Se debe tener en cuenta q limitar los requerimientos granulométricos y el tipo de suelo, lo que se busca es obtener un mejor comportamiento estructural en función de la cantidad de polvo de ladrillo a colocarse, lo que redundaría en una disminución en cuanto al costo.

Un suelo estabilizado con polvo de ladrillo no debe considerarse como un material inerte, pues al momento de adicionarle polvo de ladrillo y agua se darán reacciones químicas que generarán cambios a lo largo del tiempo, modificando sus propiedades físicas, tanto a corto, mediano y largo plazo.

Por lo que a tiempo de seleccionar un suelo, debe tenerse en cuenta, tanto el aspecto constructivo como el cumplimiento de los requerimientos estructurales, ya que en el momento de mezclado y compactado algunos suelos se comportan de mejor manera que otros y se obtienen por ende mejores resultados en cuanto a resistencia y durabilidad.

2.3.2.1 GENERALIDADES SOBRE LOS SUELOS

Dependiendo del origen de sus elementos, los suelos se dividen en dos grandes grupos:

Suelo Residual

Cuando los productos de la descomposición de las rocas permanecen en el mismo lugar de origen aun afectadas por su degradación y Suelos Transportados, cuando los productos de la descomposición de las rocas son transportados hacia otro lugar generalmente lejos del origen.

A continuación se describen los suelos más comunes, cuyo nombre es generalmente utilizado para su clasificación en el terreno.

Las Arenas y las Gravas

Son suelos de fragmentos granulares, redondos o angulosos, poco o nada alterados de rocas minerales.

Estos suelos no poseen cohesión entre sus fragmentos.

Los limos

Son suelos de grano fino (material que pasa malla No 200), pero con plasticidad menor a la que presenta una arcilla, son menos plásticos, su índice de plasticidad es menor que las arcillas, los cuales generalmente cuentan con materia orgánica finamente dividida.

Algunas veces contienen fragmentos visibles de materia vegetal parcialmente descompuesta o de otros elementos orgánicos.

Las Arcillas

Son suelos formados de partículas derivadas de la descomposición química y mineralógica que sufren los constituyentes de las rocas, generalmente por el intemperismo. Son suelos plásticos cuando están húmedos y cuando están secos son muy duros, tienen además permeabilidad extremadamente baja.

El término arcilla se usa habitualmente con diferentes significados:

- Desde el punto de vista petrológico la arcilla es una roca sedimentaria, en la Mayor parte de los casos de origen detrítico, con características bien definidas.
- Arcilla en términos granulométrico, abarca los sedimentos con un tamaño de grano inferior a 0.075mm.
- Desde el punto de vista de la ingeniería una arcilla es un material natural que cuando se mezcla con agua en la cantidad adecuada se convierte en una pasta plástica.

Para identificar un suelo se utiliza el nombre del material predominante como sustantivo y el de menor proporción como adjetivo calificativo. Por ejemplo Arena

Limosa, indica un suelo en el cual predomina la arena y contiene cierta cantidad de limo (según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos SUCS).

2.3.2.2 PROPIEDADES DE LOS SUELOS COHESIVOS

Las propiedades de los suelos cohesivos son las que se examinan en forma sintética y precisa, estas propiedades del suelo y flujo son datos que se necesitan para iniciar una evaluación de sus características.

Peso específico (densidad)

Cuanto más denso es un suelo tanto más sólido es el mismo, pero existen arcillas densas con hinchamiento las cuales para el estado de saturación pierden la solidez y su resistencia a la erosión.

El peso específico de los suelos cohesivos fluctúa comúnmente entre pequeños límites de 2,60 a 2,75 gramos por centímetro cúbico; por lo tanto no influyen en la erosión.

Porosidades y humedad

En estado natural conservan el equilibrio establecido de las fuerzas internas cuando menos es la porosidad, para igual cohesión, tanto mejor resiste el suelo a la erosión.

Con la variedad de la humedad se modifican la resistencia a la erosión y la plasticidad.

Con el aumento de la saturación, un suelo cohesivo puede pasar del estado sólido al fluido.

Se identifica el límite de plasticidad superior cuando al rolar la muestra no se conforma fisura, conservando la arcilla cualquier forma; el límite de plasticidad inferior, cuando disminuyen bruscamente las fuerzas de cohesión, apareciendo la fluidez.

En arcillas muy plásticas (con un alto número de plasticidad mayor a 0,15) existe una gran resistencia a la erosión (hasta un 30 por ciento) y una gran resistencia elasto-plástica a la fatiga (resistencia a las cargas pulsatorias).

Cohesión

Es la atracción entre partículas, originada por las fuerzas moleculares y las películas de agua.

Por lo tanto, la cohesión de un suelo variará si cambia su contenido de humedad.

La cohesión se mide en kilogramo sobre centímetro cuadrado en este sentido los suelos arcillosos tienen cohesión alta de 0,25 kilogramo sobre centímetro cuadrado a 1,5 kilogramo sobre centímetro cuadrado, o más.

Por otro lado los suelos limosos tienen muy poca, y en las arenas la cohesión es prácticamente nula por eso se dice que las arenas no son suelos cohesivos y se pueden identificar muy fácilmente solo apreciando su textura.

2.3.2.2 PROPIEDADES DE LIMOS Y ARCILLAS

Las propiedades de limos y arcillas, son características que poseen estos suelos, los cuales se pueden determinar observando las muestras de suelos y realizando ensayos para evaluar así su comportamiento de resistencia en estado seco

Para saber la resistencia de un bloque o terrón de suelo se toma un espécimen seco del suelo y se golpea con un martillo.

En la arcilla la resistencia seca es alta y en el limo la resistencia seca es baja.

Dilatancia

El fenómeno de dilatancia en los materiales granulares responde a un aumento de volumen del material al aplicarle una deformación de corte, se puede determinar

colocando una porción de suelo muy húmeda en la palma de la mano que al golpearla con la otra mano por debajo, hace que el agua del suelo aflore y luego pueda desaparecer, lo cual ocurre rápido en limos o lentamente en arcillas.

Tenacidad

Mide la plasticidad del suelo y se evalúa formando rollitos de 1/8 pulgadas o 3 milímetros. Si con suelos húmedos los rollitos así no se agrietan ni desintegran, se tienen arcillas, si lo hacen son limos.

Sedimentación o dispersión

Se disgrega el suelo triturándolo para separar los granos; se hace una suspensión en agua y en recipiente de vidrio se mezcla y homogeneiza la mezcla, luego se deja reposar: así, la arena se deposita en segundos, el limo en minutos y pocas horas, y la arcilla en varias horas e incluso días, quedando turbia el agua.

2.3.2.3 PESO ESPECÍFICO DE LOS MATERIALES

La gravedad específica G_s de un suelo sin ninguna calificación se toma como el valor promedio para los granos del suelo. Si en el desarrollo de una discusión no se aclara adecuadamente a qué gravedad específica se refieren algunos valores numéricos dados, la magnitud de dichos valores puede indicar el uso correcto pues la gravedad específica de los granos del suelo es siempre bastante mayor que la gravedad específica volumétrica determinada incluyendo los vacíos de los suelos en el cálculo.

La gravedad específica de cualquier sustancia se define como el peso unitario del material en cuestión dividido por el peso unitario del agua destilada a 4°C. Así, si se consideran solamente los granos del suelo se obtiene G_s como:

$$G_s = \gamma_{\text{material}}$$

$$\gamma_{\text{agua}}$$

La misma forma de ecuación se utiliza para definir la gravedad específica del conjunto, la única diferencia en esa definición es el γ_{material} . La gravedad específica del material puede también calcularse utilizando cualquier relación de peso de la sustancia al peso del agua siempre y cuando se consideren volúmenes iguales de material y sustancia:

El problema consiste en obtener el volumen de un peso conocido de gramos de suelo y dividirlo por el peso del mismo volumen de agua, es decir, aplicar la última ecuación, pues esta forma es más difícil de captar como también de evaluar en el laboratorio. El volumen conocido el principio de Arquímedes, según el cual un cuerpo sumergido dentro de una masa de agua desplaza un volumen de agua igual al del cuerpo sumergido.

Como el método de trabajo del laboratorio para determinar la gravedad específica del suelo utilizando un rasco volumétrico es en realidad un método indirecto. Se deriva a continuación una expresión para calcular la gravedad específica:

$$G_s = \frac{W_s}{W_{bw} + W_s - W_{bws}}$$

Donde:

W_s = Peso del suelo.

W_{bw} = Peso recipiente más agua.

W_{bws} = Peso recipiente, agua mas suelo.

Puede obtenerse un incremento pequeño en precisión si se tiene en cuenta el efecto de la temperatura sobre la densidad del agua expresando la ecuación de la siguiente forma:

$$G_s = \frac{\alpha \cdot W_s}{W_{bw} + W_s - W_{bws}}$$

Donde:

α = Corrección de temperatura, se calcula como:

$$\alpha = \frac{Y_T}{Y_{20^\circ\text{C}}}$$

El peso específico de los suelos depende de la clase de material ó minerales que lo componen así como su mayor ó menor contenido de materia orgánica, y varía de 2 a 3.

2.3.2.4 TEORÍA DE LOS ENSAYOS QUE DETERMINAN LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS

HUMEDAD DE LOS SUELOS

Se define como contenido de humedad de suelos, a la cantidad de agua que posee una determinada muestra de suelo, expresada en porcentaje y referida al peso seco de la misma.

La fórmula para encontrar dicha humedad es la siguiente:

$$w(\%) = \frac{P_a}{P_{ss}} * 100$$

Dónde:

W (%)= Contenido de humedad

Pa = Peso del agua

Pss = Peso del suelo seco

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR MEDIO DEL HIDRÓMETRO

El análisis hidrométrico por medio del hidrómetro se basa en el principio de la sedimentación de granos de suelo en agua.

Cuando un espécimen de suelo se dispersa en agua, las partículas se asientan a diferentes velocidades, dependiendo de sus formas, tamaños y pesos.

Por simplicidad, se supone que todas las partículas de suelo son esferas y que la velocidad de las partículas se expresa por la ley de Stokes, la cual expresa lo siguiente:

$$V = \frac{\int_s - \int_w}{18 \times \eta} \times D^2$$

Dónde:

V = velocidad

\int_s = densidad de las partículas de suelo

\int_w = densidad del agua

η = viscosidad del agua

D = diámetro de las partículas del suelo

En el laboratorio, la prueba del hidrómetro se conduce en un cilindro de sedimentación con 50 g de muestra seca al horno.

El cilindro de sedimentación tiene 457 mm de altura y 63.5 mm de diámetro; el cilindro está marcado para un volumen de 1000 ml.

Como agente dispersor se usa generalmente el hexametáfosfato de sodio. El volumen de la suspensión de suelo dispersado se lleva hasta los 1000 ml añadiendo agua destilada.

Cuando un tipo de hidrómetro se coloca en la suspensión de suelo en un tiempo t , medido desde el principio de la sedimentación, mide la densidad de sólidos en la vecindad de su bulbo a una profundidad L .

La densidad de sólidos es una función de la cantidad de partículas de suelo presentes por volumen unitario de suspensión en esa profundidad.

En un tiempo t , las partículas de suelo en suspensión a una profundidad L tendrán un diámetro menor que D .

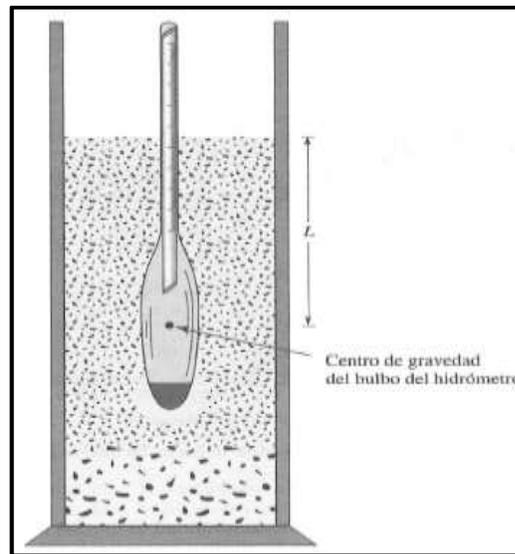
Las partículas más grandes se habrán asentado más allá de la zona de medición. Los hidrómetros son diseñados para dar la cantidad de suelo, en gramos, aún en suspensión.

Los hidrómetros son calibrados para suelos que tienen una densidad de sólidos (G_s) de 2.65; para suelos de otra densidad de sólidos, es necesario hacer correcciones.

Conocida la cantidad de peso en suspensión, L y t , podemos calcular el porcentaje de suelo por peso más fino que un cierto diámetro. Note que L es la profundidad medida desde la superficie del agua hasta el centro de gravedad del bulbo del hidrómetro donde se mide la densidad de la suspensión.

El valor de L cambia con el tiempo t , el análisis por hidrómetro es efectivo para separar las fracciones de suelo hasta un tamaño de aproximadamente 0.5μ .

Figura 4. Método del hidrómetro



Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja M. das

Para el cálculo del ensayo del hidrómetro se utilizaron las siguientes tablas:

Cuadro 1. Propiedades del agua

Temp (°C)	Peso unitario del Agua (gr/cm ³)	Viscosidad del Agua (poises)	Temp. (°C)	Peso unitario del Agua (gr/cm ³)	Viscosidad del Agua (poises)
4	1,00000	0,01567	23	0,99757	0,00936
16	0,99897	0,01111	24	0,99733	0,00914
17	0,99880	0,01083	25	0,99708	0,00894
8	0,99862	0,01056	26	0,99682	0,00874
19	0,99844	0,01030	27	0,99655	0,00855
20	0,99823	0,01005	28	0,99627	0,00836

21	0,99802	0,00981	29	0,99598	0,00818
22	0,99780	0,00958	30	0,99568	0,00801

Fuente: Guía de laboratorio de suelos. (UAJMS)

Cuadro 2. Factores de corrección “a” para el peso unitario de solidos

Peso unitario de los solidos	Factor de corrección “a”	Peso unitario de los solidos	Factor de corrección “a”
2,85	0,96	2,65	1,00
2,80	0,97	2,60	1,01
2,75	0,98	2,55	1,02
2,70	0,99	2,50	1,04

Fuente: Guía de laboratorio de suelos. (UAJMS)

Cuadro 3. Factores de corrección por temperatura Ct

Temp. (°C)	Ct	Temp. (°C)	Ct	Temp. (°C)	Ct	Temp. (°C)	Ct
15	-1,10	19	-0,30	23	0,70	27	2,00
16	-0,90	20	0,00	24	1,00	28	2,50
17	-0,70	21	0,20	25	1,30	29	3,05
18	-0,50	22	0,40	26	1,65	30	3,80

Fuente: Guía de laboratorio de suelos. (UAJMS)

Cuadro 4. Valores de k para varias combinaciones de pesos unitarios y temperaturas

Temp. (°C)	Peso unitario de los sólidos del suelo (gr/cm ³)							
	2,50	2,55	2,60	2,65	2,70	2,75	2,80	2,85
16	0,0151	0,0148	0,0148	0,0144	0,0141	0,0139	0,0137	0,0136
17	0,0149	0,0146	0,0144	0,0142	0,0140	0,0138	0,0136	0,0134
18	0,0148	0,0144	0,0142	0,0140	0,0138	0,0136	0,0134	0,0132
19	0,0145	0,0143	0,0140	0,0139	0,0136	0,0134	0,0132	0,0131
20	0,0143	0,0141	0,0139	0,0137	0,0134	0,0133	0,0131	0,0129
21	0,0141	0,0139	0,0137	0,0135	0,0133	0,0131	0,0129	0,0127
22	0,0140	0,0137	0,0135	0,0133	0,0131	0,0129	0,0128	0,0126
23	0,0138	0,0136	0,0134	0,0132	0,0130	0,0128	0,0126	0,0124
24	0,0137	0,0134	0,0132	0,0130	0,0128	0,0126	0,0125	0,0123
25	0,0135	0,0133	0,0131	0,0129	0,0127	0,0125	0,0123	0,0122
26	0,0133	0,0131	0,0129	0,0127	0,0125	0,0124	0,0122	0,0120
27	0,0132	0,0130	0,0128	0,0126	0,0124	0,0122	0,0120	0,0119
28	0,0130	0,0128	0,0126	0,0124	0,0123	0,0121	0,0119	0,0117

29	0,0129	0,0127	0,0125	0,0123	0,0121	0,0120	0,0118	0,0116
30	0,0128	0,0126	0,0124	0,0122	0,0120	0,0118	0,0117	0,0115

Fuente: Guía de laboratorio de suelos. (UAJMS)

Cuadro 5. Valores de k para varias combinaciones de pesos unitarios y temperaturas

Lect. Original Hidrom.	Prof. Efect. L (cm)						
0	16,3	16	13,7	31	11,2	46	8,8
1	16,1	17	13,5	32	11,1	47	8,6
2	16,0	18	13,3	33	10,9	48	8,4
3	15,8	19	13,2	34	10,7	49	8,3
4	15,6	20	13,0	35	10,5	50	8,1
5	15,5	21	12,9	36	10,4	51	7,9
6	15,3	22	12,7	37	10,2	52	7,8
7	15,2	23	12,5	38	10,1	53	7,6
8	15,0	24	12,4	39	9,9	54	7,4
9	14,8	25	12,2	40	9,7	55	7,3
10	14,7	26	12,0	41	9,6	56	7,1

11	14,5	27	11,9	42	9,4	57	7,0
12	14,3	28	11,7	43	9,2	58	6,8
13	14,2	29	11,5	44	9,1	59	6,6
14	14,0	30	11,4	45	8,9	60	6,5
15	13,8						

Fuente: Guía de laboratorio de suelos. (UAJMS)

También se utilizaron las siguientes fórmulas para calcular el ensayo del hidrómetro adoptando valores de las tablas anteriores:

Se tomo el valor del peso específico del suelo igual a 2.70 gr/cm³

- Con los valores de L,K y el tiempo, se calcula el valor D, con la ecuación:

$$D = K * \sqrt{\frac{L}{t}}$$

Dónde:

D = Diámetro de la partícula (mm)

L = Profundidad efectiva de caída de las partículas en un tiempo dado (Tabla 5)

T = Tiempo de la profundidad de las partículas (min)

K = constante de las características del suelo (Tabla 4)

- Se calcula la lectura corregida del hidrómetro a través de la ecuación:

$$R_c = R_{real} - C_{cero} + C_t$$

Dónde:

Rc = Lectura corregida del hidrómetro

Rreal = Lectura directa del hidrómetro

Ccero = Corrección de cero, se presenta cuando existe lecturas negativas

Ct = Corrección por temperatura (tabla 3)

- Se evalúa el porcentaje más fino del diámetro de la partícula D, con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ mas fino} = Rc * \frac{a}{Ws} * 100$$

Dónde:

% más fino = porcentaje más fino del diámetro de la partícula D (%)

Rc = Lectura corregida del hidrómetro

a = Factor de corrección para el peso unitario de sólidos (tabla 2)

Ws = Peso del suelo colocado en la suspensión (gr)

GRANULOMETRÍA DE LOS SUELOS

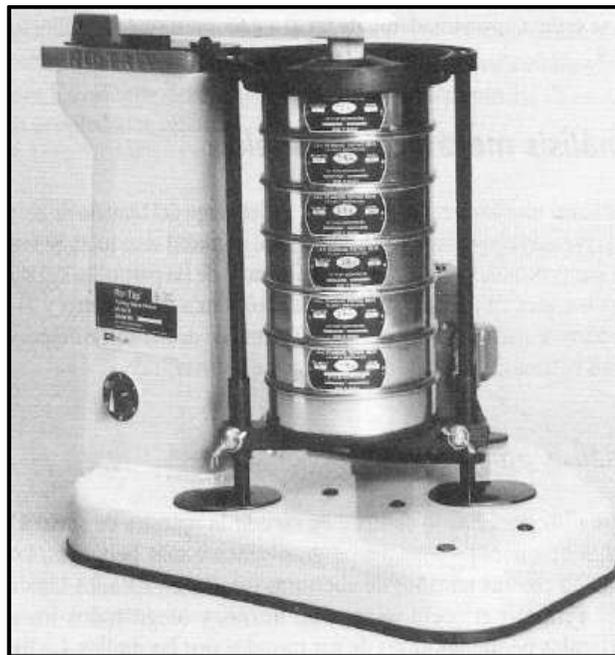
En los comienzos de la investigación de las propiedades de los suelos se creyó que las propiedades dependían directamente de la distribución de las partículas constituyentes según tamaños; por ello era preocupación especial de los ingenieros la búsqueda de métodos adecuados para obtener tal distribución.

Solamente en suelos gruesos, cuya granulometría puede determinarse por mallas, la distribución por tamaños puede revelar algo referente a las propiedades físicas del material, la experiencia indica que los suelos gruesos bien graduados, es decir, con amplia gama de tamaños, tienen comportamiento ingenieril más favorable, en lo que

se refiere a algunas propiedades importantes, que los suelos de granulometría muy uniforme presentan.

El análisis mecánico es la determinación del rango del tamaño de partículas presentes en un suelo, expresado como un porcentaje del peso (o masa) seco total. El análisis con cribado se usa para tamaños de partículas mayores de 0.075 mm de diámetro. El análisis por cribado consiste en sacudir la muestra de suelo a través de un conjunto de mallas que tienen aberturas progresivamente más pequeñas, este proceso se utilizara para realizar la caracterización de las muestras o suelos a utilizar en el proyecto.

Figura 5. Conjunto de mallas para el análisis mecánico de suelo.

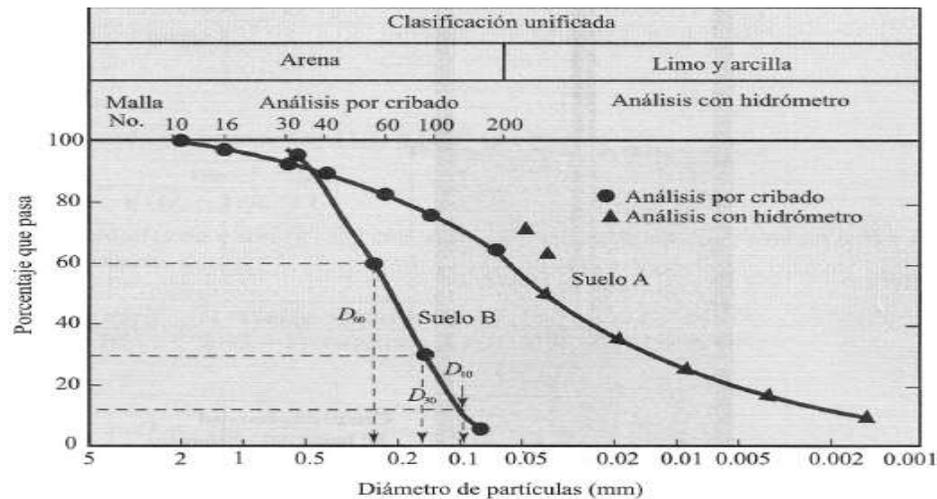


Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja M. das

Curva de distribución granulométrica

Los resultados del análisis mecánico (análisis por cribado) se presentan generalmente en gráficas semilogarítmicas como curvas de distribución granulométrica (o de tamaño de grano).

Figura 6. Ejemplo de curva granulométrica.

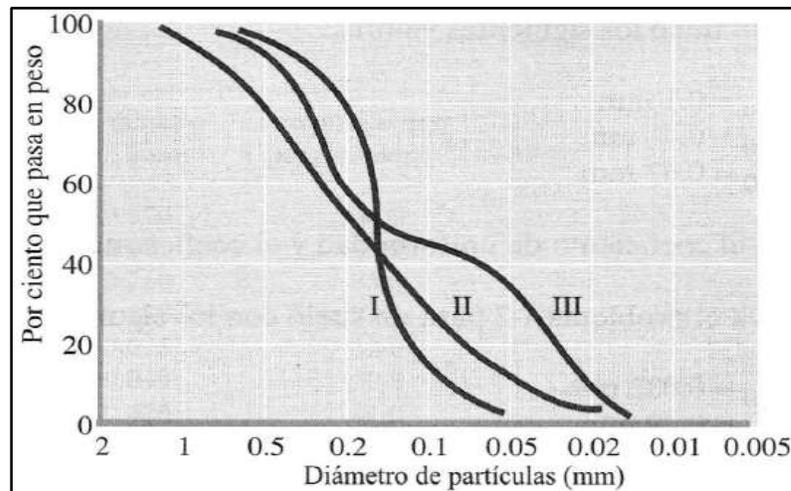


Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja M. das

Los diámetros de las partículas se grafican en escala logarítmica y el porcentaje correspondiente de finos en escala aritmética. También se utilizaran estas graficas o curvas para caracterizar el material que se va a utilizar.

Siempre que se cuente con suficiente número de puntos, la representación gráfica de la distribución granulométrica debe estimarse preferentemente en tablas.

Figura 7. Tipos diferentes de curvas granulométricas.



Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja M. das

La curva de distribución granulométrica muestra no sólo el rango de los tamaños de partículas presentes en un suelo, sino también la distribución de varios tamaños de partículas.

Esas curvas se muestran en la figura 7.

La curva I representa un tipo de suelo en el que la mayoría de los granos son del mismo tamaño, y se le llama suelo mal graduado.

La curva II representa un suelo en el que los tamaños de las partículas están distribuidos sobre un amplio rango y se le llama bien graduado.

Un suelo puede tener una combinación de dos o más fracciones uniformemente graduadas.

Finalmente la curva III representa tal suelo y se le llama de granulometría discontinua.

LÍMITES DE ATTERBERG

Existen suelos que al ser remodelados, cambiando su contenido de agua si es necesario, adoptan una consistencia característica, que desde épocas antiguas se ha denominado Plástica.

Estos suelos han sido llamados arcillas, originalmente por los hombres dedicados a la cerámica; este término pasó a la mecánica de suelos, en épocas más recientes, con idéntico significado.

La plasticidad es, en este sentido, una propiedad tan evidente que ha servido para clasificar suelos en forma puramente descriptiva, pronto se reconoció que existía una relación específica entre la plasticidad y las propiedades fisicoquímicas determinantes del comportamiento mecánico de las arcillas, si el índice de plasticidad de los suelos es mayor a 10, entonces se trata de suelos arcillosos, pero si el índice de plasticidad es menor a 10, entonces se trata de un suelo limoso.

En este momento la plasticidad se convirtió en una propiedad ingenieril de interés científico estricto, dejando de ser una cualidad puramente descriptiva o de trabajabilidad en cerámica, las investigaciones posteriores han probado que la plasticidad de un suelo es debida a su contenido de partículas más finas de forma laminar.

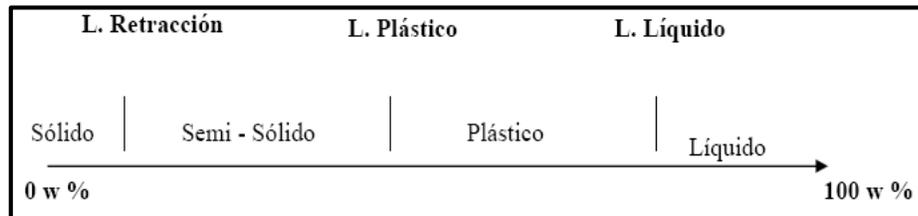
Los límites de Atterberg o también llamados límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo de su propia naturaleza y la cantidad de agua que contengan.

Un suelo se puede encontrar en un estado sólido, semisólido, plástico y líquido o viscoso.

La arcilla, por ejemplo, si está seca se encuentra muy suelta o en terrones, añadiendo agua adquiere una consistencia similar a una pasta, y añadiendo más agua adquiere una consistencia fluida.

Cada uno estos cambios o estados varían según el contenido de humedad que se lo agrega al suelo durante el ensayo.

Figura 8. Variación de la plasticidad según el contenido de humedad.



Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja M. das

Estados de consistencia

Para medir la plasticidad de las arcillas se han desarrollado varios criterios, de los cuales uno solo, el debido a Atterberg, se mencionara.

Atterberg hizo ver que, en primer lugar, la plasticidad no era una propiedad permanente de las arcillas, sino circunstancial y dependiente de su contenido de agua. Una arcilla muy seca puede tener la consistencia de un ladrillo, con plasticidad nula, y esa misma, con gran contenido de agua, puede presentar las propiedades de un lodo semilíquido o, inclusive, las de una suspensión líquida.

Entre ambos extremos, existe un intervalo del contenido de agua en que la arcilla se comporta plásticamente, en segundo lugar, Atterberg hizo ver que la plasticidad de un suelo exige, para ser expresada en forma conveniente, la utilización de dos parámetros en lugar de uno solo, como hasta su época se había creído, además, señalo esos parámetros y un modo tentativo, hoy perfeccionado, de evaluarlos.

Según su contenido de agua en orden decreciente, un suelo susceptible de ser plástico puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia, definidos por Atterberg.

- Estado líquido, con las propiedades y apariencia de una suspensión.
- Estado semilíquido, con las propiedades de un fluido viscoso.
- Estado plástico, en que el suelo se comporta plásticamente
- Estado semilíquido, en el que el suelo tiene la apariencia de un suelo, pero aun disminuye de volumen al estar sujeto a secado.
- Estado sólido, en que el volumen del suelo no varía con el secado.

Plasticidad de los suelos

Se denomina plasticidad de suelos al rango de contenido de humedad de un suelo, el cual soporta deformaciones pero sin agrietarse, también es llamado índice de plasticidad y su cálculo se determina mediante la diferencia entre el límite líquido y límite plástico.

$$IP = LL - LP$$

Dónde:

IP = Índice de plasticidad

LL = Límite líquido

LP = Límite plástico

COMPACTACIÓN DE SUELOS

En la construcción de terraplenes para carreteras, presas de tierra y muchas otras estructuras de la ingeniería, los suelos sueltos deben ser compactados para incrementar sus pesos específicos.

La compactación incrementa las características de resistencia de los suelos, aumentando así la capacidad de carga de las cimentaciones construidas sobre ellos.

La compactación disminuye también la cantidad de asentamientos indeseables de las estructuras e incrementa la estabilidad de los taludes de los terraplenes.

Los rodillos de ruedas lisas, los rodillos patas de cabra, los rodillos con neumáticos de hule y los rodillos vibratorios son usados generalmente en el campo para la compactación del suelo. Los rodillos vibratorios se usan principalmente para la densificación de los suelos granulares.

Cuando se agrega agua al suelo durante la compactación, ésta actúa como un agente ablandador de las partículas del suelo, que hace que se deslicen entre sí y se muevan a una posición de empaque más denso.

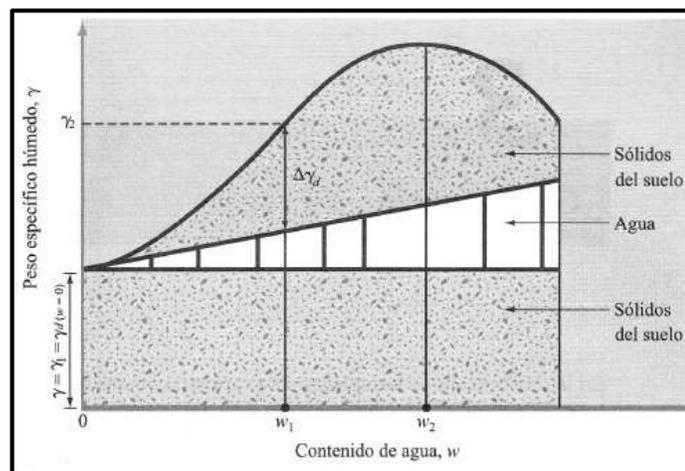
El peso específico seco después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua.

Cuando el contenido de agua es gradualmente incrementado y se usa el mismo esfuerzo compactador para la compactación, el peso de los sólidos del suelo en un volumen unitario crece en forma gradual.

Más allá de un cierto contenido de agua, cualquier incremento en el contenido de agua tiende a reducir el peso específico seco, debido a que el agua toma los espacios que podrían haber sido ocupados por las partículas sólidas.

El contenido de agua bajo el cual se alcanza el máximo peso específico seco se llama contenido de agua óptimo.

Figura 9. Principio de la compactación.



Fuente: Principios de ingeniería de cimentaciones, Braja M. das

Definición de compactación

Se entiende por compactación de suelos a un proceso mecánico al cual se somete un determinado suelo para mejorar algunas características, como la resistencia, compresibilidad, y disminución de la deformación de dichos suelos provocados a causa de las cargas que puede llegar a soportar, esta compactación se la realiza expulsando el aire que se encuentra en el suelo y de esta manera reducir la cantidad de vacíos y lograr un acomodamiento de todas las partículas que conforman el suelo, aumentando su densidad, al realizar la compactación se elimina los vacíos del suelo y generalmente no el agua que contiene el suelo.

Finalidad de la compactación

Una compactación puede seguir muchos objetivos, como ser que el suelo compactado adquiera una resistencia suficiente para resistir con seguridad el propio peso de alguna estructura civil o las cargas que transmiten las ruedas al suelo en una construcción vial. También el suelo compactado no debe deformarse tanto, por efecto de las cargas que resiste, de manera que no se dañe dicho suelo ni la estructura que soporta, es decir, no debe retraerse ni exenderse excesivamente.

Procedimientos para encontrar los valores máximos de la curva de compactación

Los valores máximos de la curva de compactación se pueden encontrar gráficamente por simple visualización, siempre y cuando las escalas utilizadas en cada uno de los ejes estén de acuerdo a los valores de dicha curva.

Para una mayor precisión se puede recurrir a la utilización de las derivadas, para ello es imprescindible conocer la ecuación de la curva de compactación, entonces por simple procedimiento de derivadas, donde la pendiente sea cero se encontrara el punto máximo.

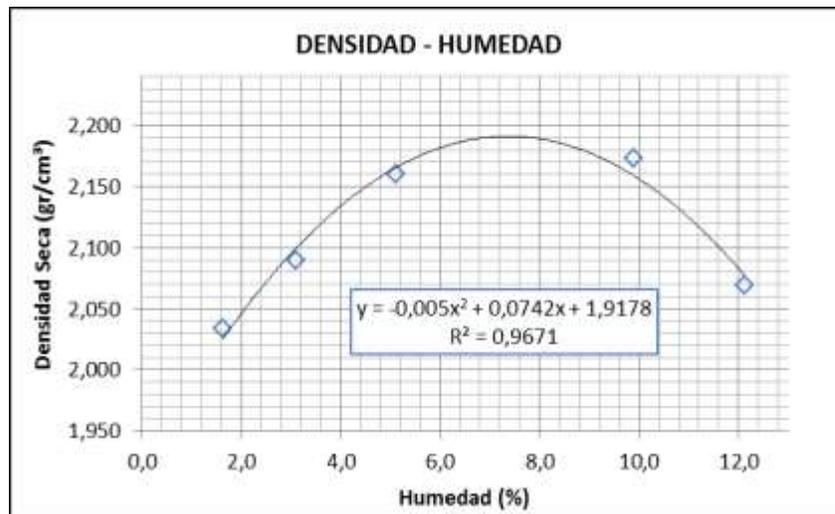
Grado de compactación

El grado de compactación de un suelo es la relación, en porcentaje, entre la densidad seca alcanzada en obra y la densidad máxima seca obtenida en laboratorio, esto para un mismo suelo, es decir, si se realiza la compactación en una vía y sacamos la densidad in situ de esa vía ya compactada, esa densidad deberá ser muy cercana o igual a la densidad máxima obtenida en laboratorio, el control en obra se hace generalmente a través de ensayos de determinación del grado compactación y comparando esos resultados con el porcentaje de requisito en las especificaciones de una vía, como 90%,95%,100%,etc, esto depende del destino y la importancia de la obra.

Curva de compactación

La curva de compactación de suelos es una gráfica que se dibuja en un eje de coordenadas, en la cual el eje de las abscisas van los valores de contenido de humedad de los suelos expresado en porcentaje y en el eje de las ordenadas van los valores correspondientes a la densidad seca máxima, dicha grafica es útil para conocer los valores máximos de humedad y densidad de un determinado suelo, una vez ya se haya realizado la compactación por métodos estandarizados, dicha grafica es la siguiente:

Figura 10. Curva de compactación.



Fuente: Propia

Humedad óptima

Es el contenido de agua bajo el cual un suelo alcanza la máxima densidad seca, un contenido de humedad mayor del óptimo tiende a reducir el peso específico seco, debido a que el agua toma los espacios que podrían haber sido ocupados por las partículas sólidas.

Densidad seca máxima

Es la densidad a la cual una muestra de suelo puede llegar a adquirir, siempre y cuando la compacten a la humedad óptima de dicho suelo.

EL VALOR RELATIVO DE SOPORTE (ENSAYO CBR)

El CBR de un suelo es la carga unitaria correspondiente a 0.1" ó 0.2" de penetración, expresada en por ciento en su respectivo valor estándar.

También se dice que mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controlada. El ensayo permite obtener un número de la relación

de soporte, que no es constante para un suelo dado sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo.

El número CBR (o simplemente CBR), se obtiene de la relación de la carga unitaria (lbs/pulg².) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón de penetración (19.4 cm²) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón (lbs/pulg².) requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado.

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas al contenido de humedad óptimo para un suelo específico, el cual es determinado utilizando el ensayo de compactación estándar o modificado.

Para los cálculos del C.B.R. se utilizaron las siguientes formulas:

- El peso unitario de la muestra

$$P_{uh} = \frac{pms}{\text{Vol. molde}}$$

Dónde:

P_{uh} = peso unitario de la muestra humedad (gr/cm³)

P_{ms} = Peso muestra seca (gr)

- El peso unitario de la muestra seca

$$P_{ums} = \frac{P_{uh}}{100 + \%W} * 100$$

Dónde:

P_{ums} = peso unitario de la muestra seca (gr/cm³)

P_{uh} = peso unitario de la muestra de humedad (gr/cm³)

%W = Porcentaje de humedad (%)

- La expansión se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ exp} = \frac{(L_f - L_i)}{h} * 100$$

Dónde:

% exp. = Porcentaje de expansión (%)

L_f = Lectura final del extensómetro (cm)

L_i = Lectura inicial del extensómetro (cm)

H = Altura total del espécimen

- La determinación del C.B.R. se realiza para las penetraciones de 0.1 y 0.2 pulgadas en sus correspondientes cargas calculadas:

$$\text{Para } 0.1'' \text{ tenemos} \quad \text{CBR} = \frac{\text{carga} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right)}{70.3 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right)} * 100$$

$$\text{Para } 0.2'' \text{ tenemos} \quad \text{CBR} = \frac{\text{carga} \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right)}{105.5 \left(\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right)} * 100$$

Si los CBR 0.1'' y 0.2'' tienen similitud, se recomienda usar 0.2''

Si el CBR 0.2'' es muy superior a 0.1'', deberá repetirse el ensayo''

- Y por último se realizan las siguientes graficas:

Carga vs penetración. Se grafica considerando escalas adecuadas, donde Las abscisas corresponden a la carga (Kg/cm²) y las ordenadas a la penetración (pulgadas)

Densidad seca vs CBR. Se grafica considerando escalas adecuadas, donde Las abscisas corresponden a la densidad seca (gr/cm³) y las ordenadas al CBR (%), en este grafico se calcula el CBR al 100% y 95%

A continuación se presenta un cuadro con la clasificación de suelos según el valor de C.B.R.

Cuadro 6. Clasificación de suelos según el valor de C.B.R

C.B.R	Clasificación del suelo	Uso
2 – 5	Muy mala	Sub-rasante
5 – 8	Mala	Sub-rasante
8 – 20	Regular – Buena	Sub-rasante
20 – 30	Excelente	Sub-rasante
30 – 60	Buena	Sub-base
60 – 80	Buena	Base
Mayor a 80	Excelente	Base

Fuente: Assis A., 1988.

2.3.3 POLVO DE LADRILLO

Generalmente se puede utilizar desechos de ladrillos de construcción molidos.

Estos pueden ser de primera, segunda o tercera calidad, pero deben estar bien cocidos.

Dependiendo del tipo de suelo y de las propiedades deseadas, el contenido de polvo de ladrillo varía desde 0% hasta valores como 18% del peso seco del suelo.

De una manera general, el contenido de ladrillo molido requerido se incrementa a medida que aumenta el contenido de arcilla de los suelos utilizados".

Por otro lado el polvo de ladrillo que se lo adiciona al suelo actúa de acuerdo a dos procesos, los mismos que se describen a continuación:

- En este primer proceso se modifican las propiedades del suelo como el límite plástico (LP), el ladrillo molido al entrar en contacto con el agua generan una absorción considerable, el mismo que es tomado por el suelo para modificar sus cargas superficiales y variar de esta forma las condiciones de plasticidad, esto ocurre en el segundo proceso.
- **Mesclado de las partículas:** una vez que han sido modificadas las propiedades de plasticidad del suelo, debido a la absorción, se da inicio al segundo proceso durante el cual el polvo de ladrillo actúa sobre el suelo adhiriéndose a sus partículas lo que genera un incremento a la resistencia al corte del material final.

3.3.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL POLVO DE LADRILLO

- **Absorción**

La absorción en este tipo de material cerámico es importante, ya que el ladrillo molido pasa por un proceso de cocción y es un material muy seco que tiene una absorción considerable cuando entra en contacto con el agua, la norma básica de edificación NBE- FL-90 muros resistentes de fábrica, nos indica un rango de absorción que varía entre el 8 y 20% de absorción de agua que absorbe el ladrillo en contacto con la superficie del agua.

- **Resistencia**

Para poder obtener un buen resultado en los ensayos que realizaremos más adelante de la mezcla de suelo-polvo de ladrillo, es importante conocer la resistencia a compresión

que tiene el ladrillo que utilizaremos, en nuestro caso es el ladrillo común o más conocido como gambote, de acuerdo a la norma básica de edificación NBE- FL-90 muros resistentes de fábrica de ladrillo.

2.3.4 AGUA

La mayoría de las especificaciones técnicas y la literatura en general únicamente definen que el agua a utilizarse deberá ser potable o cumplir con cierto grado de pureza, libre de materia orgánica, álcalis o ácidos.

Algunas especificaciones españolas y colombianas indican que el agua a ser utilizada en mezclas de suelos estabilizados con polvo de ladrillo no se deberá exceder de un contenido de sulfato de 1 gr/lit además su ph deberá estar entre 5.5 y 8.

El mezclado del polvo de ladrillo con el material genera reacciones químicas, las cuales en suelos granulares no plásticos es menos complicada que la que se da cuando se realizan las mezclas con suelos finos arcillosos.

2.3.5 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA ESTABILIZACIÓN CON POLVO DE LADRILLO

- **Ventajas**

Una de las mayores ventajas de la estabilización con polvo de ladrillo es la facilidad para mejorar los suelos utilizando el material en banco existente ya que cuando este no sirve simplemente es necesario cambiarlo o simplemente buscar mejoramientos sobre el mismo que resultan costosos. Uno de los principales inconvenientes es la consecución de materiales de buena calidad en las zonas de desarrollo de los proyectos, inconveniente que se supera con la estabilización suelo-polvo de ladrillo.

La alta densificación que alcanza una base en suelo-polvo de ladrillo permite que la presión de las llantas se transmita mejor.

Debido a la alta resistencia de la base estabilizada con polvo de ladrillo, los espesores de pavimento son menores que los obtenidos al emplear una base granular, convencional.

Es capaz de soportar climas en condiciones extremas.

Hoy se utilizan equipos de altísimo rendimiento que permiten elaborar los procesos constructivos de manera más rápida y económica.

Con el tiempo gana resistencia y esto favorece su conservación y vida útil.

- **Desventajas**

Aumento de costo por la adición del polvo de ladrillo al suelo.

La exigencia en cuanto a calidad en el proceso constructivo es mayor que en el método convencional.

El aumento en las actividades constructivas, respecto al método convencional.

El control de emisión de finos al aplicar el polvo de ladrillo.

Conseguir la liga entre capas es más difícil.

Produce mayor agrietamiento en los pavimentos de no tener claridad sobre la proporción en el diseño y el proceso constructivo.

2.4 CAMINOS NO PAVIMENTADOS

Las características principales de nuestras carreteras a nivel nacional es que se encuentran en mal estado, ya que estas no tienen un tratamiento adecuado como en otros países, debido a la falta de maquinaria y material adecuado para realizar los tratamientos de estabilización de suelos en sub-rasantes de caminos no pavimentados en nuestro medio.

Los caminos rurales no pavimentados constituyen la infraestructura esencial para el desarrollo social y económico de las comunidades rurales, comúnmente ubicadas en zonas donde el acceso a los servicios básicos es muy limitado y las dinámicas comerciales se ven obstaculizadas por las dificultades para el transporte de los productos y los insumos.

Los caminos municipales no pavimentados tiene características diferentes dependiendo de las regiones en donde se localizan, en general se ubican en una topografía ondulada o accidentada, en algunos casos en terrenos planos, suelos arcillosos, limosos, arenosos, con gravas o hasta muy pedregosos, la temperatura es variable durante todo el año

En el trazado de este tipo de caminos se encuentra en diferentes tipos de materiales aluviales coluviales con suelos finos, con vegetación escasa, la temperatura por otro lado es variable en todo el año y la temporada de lluvias estacional durante el año es bastante intensa y ocasiona grandes problemas en este tipo de caminos.

2.4.1 IMPORTANCIA DE LOS CAMINOS NO PAVIMENTADOS

Los caminos rurales son un tipo de infraestructura que tienen la finalidad de asegurar que las comunidades rurales tengan acceso oportunos a bienes y servicios, que puedan promover prosperidad y crecimiento económico, con la finalidad de contribuir a la calidad de vida, el bienestar social, la salud y la seguridad de los habitantes rurales, sin que afecte la calidad del medio ambiente donde viven.

La planificación y el análisis de caminos rurales son actividades clave para garantizar la satisfacción de las necesidades presentes y futuras de los usuarios de las comunidades, que minimice los impactos al medio ambiente, y que además, tome en cuenta las necesidades futuras de la región.

Para esto se requiere considerar dos elementos básicos: a) las demandas actuales y futuras del camino, y b) la ubicación del mismo.

La ubicación de los caminos es esencial para garantizar la sostenibilidad propia del camino, evitando excesos de costos en su construcción, determinando los mejores

accesos a las zonas carentes de accesos, y a la vez, minimizando la distancia de recorrido entre los puntos de destino.

2.4.2 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES DE LOS CAMINOS NO PAVIMENTADOS

Una vía no pavimentada es un camino con una capa de rodadura conformada por suelo natural o por una estructura de agregados pétreos, en general los materiales de afirmados o simplemente afirmados, pueden ser de dos tipos, según las características del material que se utiliza como capa de rodadura.

- Caminos cuya capa de rodadura está constituida por el mismo material natural del lugar, esto se debe a que el suelo es apto para la estructura o sino no existe material cerca para conformar la estructura vial
- Caminos cuya capa de rodadura está constituida por agregados pétreos naturales provenientes de canteras conocidas o de excedentes de excavaciones (gravas, cantos rodados, etc.) y donde los materiales que la componen se ajustan a determinadas especificaciones técnicas en relación con su tamaño, composición granulométrica, resistencia y su calidad de finos.

En general el espesor de la capa de afirmado varía entre 10 y 20 centímetros

2.4.3 LA SUB-RASANTE

La sub-rasante es la superficie del terreno sobre la cual se construye el pavimento de una estructura vial.

Su capacidad relativa de soporte, es decir su resistencia a la deformación bajo la acción de cargas externas, es uno de los factores que influyen directamente en el comportamiento estructural de los firmes, junto con el tráfico, las características de los materiales empleados y las condiciones ambientales.

En vías de baja intensidad de tráfico, los suelos para las sub-rasante deben ser mejorados o estabilizados con un material estabilizante, salvo excepciones se utiliza los que se encuentran en la misma traza, en definitiva de debe partir del máximo aprovechamiento de materiales locales.

Por esta razón en este tipo de vías se pueden llegar a admitir cantidades de sub-rasantes inferiores a las exigibles en carreteras más importantes.

Es la capa de terreno de un camino, que resulta del movimiento de obras de tierra a lo largo de la traza del camino, que soporta la estructura firme y que se extiende hasta una profundidad que no afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto en el proyecto.

Esta capa puede estar formada en corte o relleno y una vez compactada debe tener las secciones transversales y pendientes especificadas en los planos finales de diseño del camino.

Las características de estos suelos como son la granulometría, sensibilidad al agua, compactación son algunos de los factores que determinan el alcance de las mejoras a realizar.

La capa sub-rasante para un camino no pavimentado deberá tener como mínimo aceptable los siguientes parámetros:

- Grado de compactación del 90% respecto a la máxima compactación proctor modificada (T-180) realizada en laboratorio.
- C.B.R. entre 3 – 9 %

La sub-rasante es la capa superficial, de terreno natural. Para construcción de caminos se analizará hasta 0.45 m de espesor, y para rehabilitación los últimos 0.20 m.

Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura,

constituyen las variables básicas para el diseño del afirmado, que se colocará encima.

En este sentido se identificarán cinco categorías de sub-rasante:

Cuadro N° 7 Valores de C.B.R.

S0 : SUBRASANTE MUY POBRE	CBR < 3%
S1 : SUBRASANTE POBRE	CBR = 3% - 5%
S2 : SUBRASANTE REGULAR	CBR = 6 – 10%
S3 : SUBRASANTE BUENA	CBR = 11 – 19%
S4 : SUBRASANTE MUY BUENA	CBR > 20%

**Fuente: Manual de Carreteras no pavimentadas de bajo volumen de tránsito.
Marzo 2008**

Se considerarán como materiales aptos para la coronación de la sub-rasante, suelos con CBR igual o mayor de 6%.

En caso de ser menor se procederá a eliminar esa capa de material inadecuado y se colocará un material granular con CBR mayor a 6%; para su estabilización.

La profundidad mínima especificada de esta capa figura en el catálogo de estructuras de capas granulares, que se presenta más adelante.

Igualmente se estabilizarán las zonas húmedas locales y áreas blandas sobre la sub-rasante natural se colocará una capa de arena de espesor 20 cm mínimo y sobre ella, se añadirá una capa de espesor mínimo de 0.30m de material grueso rocoso o de piedras grandes.

2.4.3.1 MATERIALES BÁSICOS PARA LA SUB-RASANTE

Áridos

Los áridos son conjunto de partículas discretas de naturaleza pétreo que pueden constituir el esqueleto de las capas de la sub-rasante.

Las características de los áridos que los hacen adecuados para su empleo en sub-rasante dependen fundamentalmente de la naturaleza mineralógica del material del que proceden, sin embargo la forma de explotación de los yacimientos y bancos de préstamos tiene una decisiva importancia para la obtención de un árido, pues es posible que ente proceso se pueda obtener un árido aceptable de una procedencia mediocre o viceversa.

El empleo de cada tipo de árido depende fundamentalmente de las disponibilidades de los materiales en las zonas relativamente próximas a la obra.

Por ello es normal que en cada zona se utilicen casi siempre material local cuya idoneidad ha sido sancionada por la experiencia en obras anteriores.

El material debe estar clasificado por tamaños, de forma que se pueda componer con facilidad la granulometría deseada, no han de producir reacciones indeciables con los conglomerantes, ligantes o algún estabilizante que se pueda utilizarse.

Han de ser resistentes al desgaste y en lo general, pero especialmente para algunas aplicaciones deben estar lo más limpio y posible, no debiendo admitirse en ningún caso su contaminación con sustancias orgánicas.

Tipología

Los áridos se pueden clasificar por su origen: áridos artificiales (subproductos) y áridos naturales (procedentes de yacimientos o canteras).

Entre los áridos artificiales (subproductos) se pueden distinguir los siguientes:

- Residuos reciclables de pavimento rígido y pavimentos flexibles. Son materiales procedentes de la demolición de estructuras construidas, que se las recicla para ser re utilizadas, siendo muy buenas y resistentes para utilizar en la estructura de la sub-rasante.
- Residuos industriales de ladrillo molido. Este tipo de material proceden de un proceso de industrialización de fábrica, es decir es un material cocido en el horno de alta temperatura, se lo puede aplicar para vías terciarias de baja intensidad de tráfico

Entre los áridos naturales se pueden distinguir los siguientes:

- Áridos calizos. Son materiales procedentes, en general de canteras y se las puede aplicar en la sub-rasante por tratarse de materiales fácilmente pulimentables no suelen dar problemas de adhesividad, sin embargo si suelen ser comunes los problemas de limpieza o incluso a veces de contaminación con suelos finos.
- Lutitas y arenas silíceas. Proceden de yacimientos granulares, por lo que en su caso puede ser necesario un machaqueo previo, en lo general son materiales relativamente resistentes al desgaste, no pulimentables y que pueden presentar algunos problemas de adhesividad.

2.4.4 CAPA DE RODADURA

Para la conformación de la capa de rodadura hay dos alternativas de construcción esta puede ser granular o estabilizada:

- La capa de rodadura granular está constituida por materiales triturados o de canto rodado, como ser la piedra triturada o el ripio, también mezclas con material de relleno o bien por una combinación de piedra o grava, con arena y suelo en estado natural.

- La capa de rodadura estabilizada está constituida por una mezcla de suelo natural o un suelo seleccionado con un agente estabilizante, este puede ser con cemento, cal, polvo de ladrillo, etc.

Como elemento de referencia solamente, se presenta el cuadro que correlaciona el espesor recomendado para el revestimiento, en función del porcentaje de vehículos pesados que transitan en determinado camino rural.

Cuadro 8. Espesores mínimos sugeridos para capas de rodaduras

Volúmenes aproximados de Vehículos pesados (TPD)	Condiciones de soporte del suelo (C.B.R.)	Espesor mínimo sugerido (cm)
0 a 5	Bajo	16,5
	Mediano	14
	Alto	11,5
5 a 10	Bajo	21,5
	Mediano	18
	Alto	14
10 a 25	Bajo	29
	Mediano	23
	Alto	18

25 a 50	Bajo	37
	Mediano	29
	Alto	21,5

Observaciones: Soporte bajo CBR menor o igual a 3%, Soporte mediano CBR mayor a 3% y menor o igual a 10%, Soporte alto CBR mayor a 10%

Fuente: Scoth Dakota local Transportation Agency

En los caminos municipales no pavimentados ubicados en la ciudad de Tarija o en las diferentes localidades, el material a utilizarse en la conformación de la capa de rodadura, es de tipo compactado que consiste en una mezcla bien graduado de agregados naturales con granos duros y durables o de fragmentos de agregados naturales mezclados con arena fina, arcilla, polvo de piedra u otro material similar de corte o relleno, producido por fuentes probadas que produzcan una mezcla uniforme que cumpla con los requisitos de las especificaciones técnicas, en cuanto debe mantener una nivelación constante de suelo y que tenga la propiedad de compactarse en una capa estable y densa.

El material debe estar libre de productos vegetales lodo o excesiva cantidad de arcilla u otras substancias extrañas y perjudiciales.

CAPÍTULO III

UTILIZACIÓN DEL POLVO DE LADRILLO COMO ESTABILIZANTE DE SUB-RASANTES DE CAMINOS NO PAVIMENTADOS

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo explica toda la aplicación práctica del proyecto, se realizara una descripción general de localización, ubicación, muestreo y obtención del polvo de

ladrillo, métodos utilizados en cada ensayo, laboratorio utilizados para realizar los ensayos, como también la caracterización de los materiales utilizados en la estabilización del suelo-polvo de ladrillo.

Para realizar los cálculos correspondientes de los valores de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio se utilizaron formulas, tablas, ábacos y graficas mediante el programa de Excel.

También se presenta el tratamiento estadístico de los ensayos del valor de soporte de california C.B.R. que nos muestra un resumen de todas las mezclas de suelo-polvo de ladrillo en diferentes porcentajes.

De igual forma se detalla el análisis y una comparación de resultados de clasificación, expansión y resistencia de los diferentes ensayos realizados en laboratorio con todas las mezclas de suelo-polvo de ladrillo.

Por último se elabora una propuesta de aplicación del suelo-polvo de ladrillo al porcentaje óptimo de la mezcla, a través de un resumen general de la aplicación práctica, costo y generalización de la propuesta realizada para la estabilización de suelos.

3.2 CRITERIO PARA EL MUESTREO DEL SUELO EN ESTUDIO

Para tener una definición de selección de muestras, en este caso diremos que es la actividad por la cual se toman muestras de una de varias poblaciones de elementos de los cuales vamos a tomar ciertos criterios de decisión para realizar el proyecto, el muestreo es muy importante porque a través de él podemos hacer un análisis de situaciones de una empresa o de algún campo de la sociedad, con beneficios y soluciones a corto o largo plazo.

Muestras alteradas e inalteradas

Las muestras pueden ser de dos tipos alteradas o inalteradas. Se dice que una muestra es alterada cuando no guarda las mismas condiciones que cuando se encontraban en el terreno de donde procede y se recolecta a medida que se va realizando el muestreo. En general las muestras alteradas se usan para la identificación del suelo, y las muestras inalteradas es aquella que preserva, en la medida de lo posible, la estructura y el contenido de humedad para que represente realmente las condiciones del campo.

Para este trabajo de investigación de evaluación del polvo de ladrillo como estabilizante de suelo en caminos no pavimentados, las muestras con las que se trabajó son del tipo alterado o perturbadas debido a que los ensayos que se realizan a los suelos son clasificación para su identificación, por otra parte es la de establecer el CBR del suelo mediante una metodología que utiliza alteradas.

DEFINICION DEL METODO PARA LA SELECCIÓN DE MUESTRAS

Para el proyecto se utilizara el muestreo probabilístico anteriormente descrito, puesto que al ir a traer material del banco de préstamo, este material se encontrara alojado en un área determinada, entonces , se delimitara un área menor que contenga el material que se adecue para el proyecto y se tomaran muestras cada cierta distancia de un punto de muestreo a otro, esto para toda el área delimitada, con la finalidad de que todas las muestras que se tomen tengan la misma probabilidad de ser elegidos para el proyecto, las distancias de un punto de muestreo a otro variaran dependiendo de la exactitud que se quiera obtener y de los tipos de suelo que tenga el banco de préstamo, puesto que tendremos que delimitar un área, la cual tenga el material que se necesita.

También se utilizará el muestreo aleatorio probabilístico con reposición o reemplazamiento, porque para el proyecto se repetirá el uso de un determinado suelo, ya que para las diferentes mezclas de suelos clasificados según el sistema AASHTO, poco a poco se va variando las características de estos suelos de un tipo a otro, y se puede encontrar coincidencias de que las características de un mismo tipo de suelo sean las casi las mismas para otro tipo de suelo, entonces se podrá reutilizar un tipo de suelo

para varios ensayos, esto dependiendo de la cantidad de material que se necesite para los diferentes ensayos.

3.2.1 UBICACIÓN

El sitio en donde se obtuvo la muestra de suelo para ser analizada e identificada se describe a continuación:



Barrió los Chapacos

Para la obtención de las muestras del suelo se realizó una exploración en cuatro bancos de préstamo, Barrio nueva esperanza, los chapacos, quebracho y 3 de mayo, donde se eligió el barrió los Chapacos, porque tiene un suelo cohesivo fino, apto para realizar la estabilización, este tipo de suelo se presenta en la mayoría de los caminos no pavimentados deficientes, el barrió los Chapacos está ubicado en la zona norte de la ciudad de Tarija- Bolivia, en el distrito 7 de la ciudad, esta zona cuenta con todos los servicios básicos necesarios y con la mayor parte de sus calles están asfaltadas aunque algunas calles empedradas, pero todavía existen algunos lotes de terreno sin construir,

la muestra del suelo para el respectivo estudio se extrajo de un terreno vacío, todavía sin construir.

Figura 11. Suelo del Barrio los Chapacos



Fuente: Elaboración propia

Este tipo de suelo se caracteriza por ser un suelo compacto duro, siendo la mayor parte es un suelo fino limoso cohesivo con poca cantidad de arcillas y arenas finas. La estructura de este material es dura al contacto de las herramientas de obtención, pero este tipo de suelo se descompone por completo al ser sometido a fuerzas, quedando un suelo fino.

Descripción

Primeramente se realizara la visita a un banco de préstamo para la extracción del material, posteriormente se ubicara o delimitara un área total, dicha área tendrá que tener por inspección visual el material con las características que se necesita para el proyecto, se elegirá el área por el tamaño de las partículas que posee dicha área delimitada, luego el área total se sub dividirá en áreas muchos más pequeñas para realizarla la selección, una que el área mayor este dividido, se recogerá las muestras de forma aleatoria, es decir, las muestras que serán usadas para el proyecto serán escogidas

de forma discontinua, esta selección será discontinua, de tal manera se tome una muestra y no se deje una sin ser elegida, a si progresivamente hasta abarcar con el total del área mayor antes delimitado.

Métodos de selección de muestras.

Toda muestra debe ser representativa si va a ser usada para estimar las características propias del lugar, son varios y extensos los métodos para poder seleccionar una muestra representativa que dependen de tres factores que son muy importantes a la hora de tomar este tipo de decisiones, los cuales son: el tiempo, dinero y habilidad disponible para tomar una muestra, la naturaleza de los elementos individuales de la población, requiriendo una gran muestra para poder incluir todos los tipos de métodos de muestreo.

Se utilizó el método Aleatorio probabilístico, consiste en obtener muestras de suelos del banco de préstamo del barrio los Chapacos, de tal manera cada una de las muestras tengan la misma probabilidad de ser elegida para el trabajo, esto marcando un área donde se encuentren dichas muestras y elegirlas aleatoriamente sin discriminación alguna.

En cada sitio de muestreo se recomienda remover las plantas, y materiales que no nos interesen y que estén en contacto con materia orgánica, la muestra debe enviarse a un laboratorio de suelos lo más antes posible, esto en términos prácticos significa 1-3 días como máximo, en este último punto se presentan con mucha frecuencia algunas fallas como por ejemplo dejar las muestras guardadas por varios días y a veces pueden ser meses.

Materiales

Para extraer la muestra de suelo natural se necesita herramientas y materiales necesarios para poder obtener la muestra y llevar la muestra de suelo a laboratorio de suelos, los materiales son los siguientes:

- Mapa de terreno
- Machete
- Pala
- Pico o azadón
- Barreno
- Bolsas plásticas limpias
- Marcadores
- Hojas para identificar las muestras

Es necesario identificar todas las muestras de suelos para que no haya confusiones y realizar mal los respectivos ensayos de laboratorio de suelos.

Cuidados al tomar muestras

Es importante mantener en mente lo que se quiere hacer, es obtener una muestra lo más representativa posible de suelo a emplear en laboratorio, durante el muestreo hay que evitar de fumar, comer o manipular otros productos para así evitar la contaminación de la muestra y obtener resultados falsos, no se debe tomar muestras cerca de los caminos, canales, linderos, estiércol, estanques o lugares donde hubo quemas recientes y puede haber materia orgánica.

Tener las manos limpias antes del muestreo es muy importante, como también no hay que utilizar bolsas o costales donde ya se empacaron otros materiales ya sea productos químicos, fertilizantes, cal, guano o plaguicidas, no se debe tomar muestras de un solo sitio de terreno.

Recomendaciones para el muestreo de suelos

1. Obtener toda la información disponible sobre suelo, en los organismos oficiales y privados de la región en donde esté ubicada la zona de muestreo.

2. Antes de empezar a tomar las muestras, obtenga o dibuje un croquis representativo del área a muestrear y divídalo en unidades homogéneas de muestreo de acuerdo al tipo de suelo, topografía, color del suelo, forma, drenaje, etc.
3. Utilizar el equipo de trabajo apropiado de acuerdo a las características del suelo a ser muestreado, lo más importante es que el equipo permita obtener aproximadamente el mismo volumen de suelo para cada sub-muestra tomada a la misma profundidad.
4. Se debe tener la precaución de no tomar muestra en los lugares donde se aplicó fertilizantes en áreas de antiguos canales, en orillas de cercas, en lugares donde se tenga un cambio de pendiente entre dos unidades de suelo, en inmediaciones de árboles o donde hayan sido colocados residuos de cosechas, estiércol u otros materiales contaminantes.

3.3 OBTENCIÓN DEL POLVO DE LADRILLO

Para realizar la estabilización del suelo-polvo de ladrillo, mediante ensayos de laboratorio se tuvo que conseguir el polvo de ladrillo de la siguiente manera, Primero se buscó los lugares en donde se puede obtener este tipo de material polvo de ladrillo, después de varias averiguaciones y consultas, se logra identificar tales lugares.

Así el sitio donde se obtuvo el material polvo de ladrillo para mezclarla con suelo y realizar el estudio del proyecto es el siguiente:

- **Complejo de tenis del gobierno municipal de la ciudad de Tarija y la provincia cercado**

El Complejo de tenis del gobierno municipal de la ciudad de Tarija y la provincia Cercado se encuentra ubicado en la ciudad de Tarija, en el barrio las panosas en el interior del complejo deportivo García Agreda, al lado del puente peatonal el peregrino, este es administrado por un encargado del complejo deportivo, con quien se pudo

hablar y se lo hizo llegar una solicitud para la obtención del material requerido para la realización del proyecto.

Figura 12. Máquina trituradora y el ladrillo macizo



Fuente. Elaboración propia

Se puede apreciar en la (figura 12), el ladrillo utilizado para el proyecto es el ladrillo macizo o ladrillo gambote, este tipo de ladrillo se consiguió de la cerámica Guadalquivir ubicada en el barrio German buch de la ciudad de Tarija, este material cerámico se lo muele en la máquina trituradora que utilizan para moler ladrillo para las canchas de tenis del complejo deportivo.

Figura 13. Lugar donde se obtuvo el ladrillo molido



Fuente. Elaboración propia

Después de analizar el proceso de molienda del ladrillo macizo o gambote, se evidencia que el producto final es un material molido fino el cual viene a ser el polvo de ladrillo (figura 13), este material polvo de ladrillo será utilizado en el proyecto de estudio suelo-polvo de ladrillo a realizar más adelante en los respectivos ensayos en el laboratorio de suelos.

En el proyecto a realizar se hará una Evaluación del polvo de ladrillo como estabilizante de suelo en caminos no pavimentados, por lo cual se realiza un estudio minucioso en laboratorio para determinar las propiedades físico-mecánico del suelo puro en estado natural y de las mezcla de suelo-polvo de ladrillo en diferentes porcentajes y así obtener una alternativa de estabilización de suelos, poder realizar una propuesta de aplicación en sub-rasantes de caminos no pavimentados de nuestro medio.

3.4 CARACTERIZACION DEL POLVO DE LADRILLO

Se realizó algunos ensayos en laboratorio para determinar algunas características, como por ejemplo la granulometría, el ensayo de hidrómetro para conocer la cantidad de arcillas contenida en el polvo de ladrillo y el peso específico del material

3.4.1 GRANULOMETRIA POLVO DE LADRILLO

Los ensayos de granulometría basados en la norma (ASTM D422 Y AASHTO T88) realizado al polvo de ladrillo se llevaron a cabo de la siguiente manera:

El peso de la muestra de agregado fino que pasa por el tamiz nro. 4, y como es un suelo fino se realizó el método del lavado.

RESULTADOS DE GRANULOMETRIA

Los resultados de la granulometría del polvo de ladrillo puro nos indican los siguientes resultados

Cuadro 9. Resultados de granulometría polvo de ladrillo

N°	Material	Pasa el 10	Pasa el 40	Pasa el 200
1	Polvo de ladrillo	100	91,80	47,63

Fuente: Elaboración propia

Esto nos indica que contiene material granular fino ya que se queda retenido más de 50% en el tamiz número 200.

El polvo de ladrillo que pasa el tamiz nro 10 es el 100%, y el porcentaje que pasa el tamiz nro 40 pasa el 91.80% y finalmente el porcentaje que pasa el tamiz nro 200 es el 47.63% del total de la muestra de polvo de ladrillo.

3.4.2 ENSAYO DEL HIDRÓMETRO POLVO DE LADRILLO

Para la realización de este ensayo del hidrómetro basado en la norma (ASTM D2216) para el polvo de ladrillo, una vez teniendo todos los materiales necesarios se realizaron los siguientes ensayos:

Figura 14. Ensayo del hidrómetro



Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS DE HIDRÓMETRO

Cuadro 10. Resultados del hidrómetro polvo de ladrillo

Nº	Material	Pasa el tamiz 200	% limo	% Arcilla
1	Polvo de ladrillo	100	95,92	4,08

Fuente: Elaboración propia

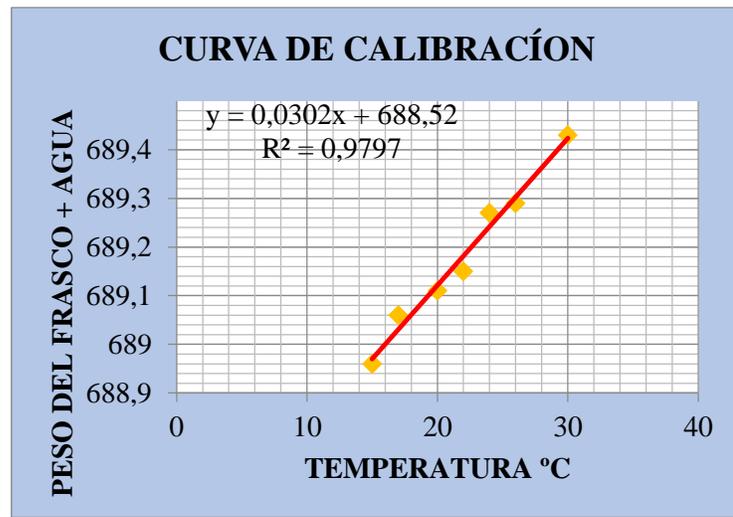
Como podemos ver en los resultados nuestro polvo de ladrillo es un material limoso donde más del 95% es limo.

El porcentaje de arcilla en el polvo de ladrillo es un 4.08%, y el contenido de limo es el 95.92% del polvo de ladrillo.

3.4.3 PESO ESPECÍFICO DEL POLVO DE LADRILLO

Para la realización de este ensayo del hidrómetro basado en la norma (ASTM D854) y (AASHTO T100) para el polvo de ladrillo, una vez teniendo todos los materiales necesarios se realizaron los siguientes ensayos:

Figura 15. Calibración del frasco



Fuente: Elaboración propia

Primeramente se realizó la calibración del frasco volumétrico, mediante una ecuación lineal, donde nos da una correlación del 0.9797

Esta grafica nos muestra la curva de calibración donde tenemos en las abscisas la temperatura y en las ordenadas el peso del frasco más el agua

Figura 16. Ensayo del peso específico del polvo de ladrillo



Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS DEL PESO ESPECÍFICO RELATIVO

Cuadro 11. Resultados del hidrómetro polvo de ladrillo

N°	Material	Peso específico relativo (gr/cm ³)
1	Polvo de ladrillo	2.42

Fuente: Elaboración propia

Como podemos ver en los resultados nuestro polvo de ladrillo es un material que tiene un peso específico menor a las arcillas y limos, que está entre 2.60 – 2.70 gr/cm, esto ocurre porque al pasar por el proceso de cocción pierde el peso específico

El peso específico del polvo de ladrillo es de 2.42 gr/cm³

- **Condiciones de trabajo del ladrillo molido**

Las condiciones de trabajo que presenta el ladrillo molido es muy cómodo y fácil manipulación, ya que este material suelo-ladrillo molido se puede realizar los ensayos de manera satisfactoria ya que es un material fino, en cuanto a su deformación para el ensayo de valor de relación soporte es poca, y se puede hacer una semejanza con agregados finos más resistentes como la arena.

3.5 CARACTERIZACIÓN DEL SUELO NATURAL Y SUELO-POLVO DE LADRILLO

3.5.1 CONTENIDO DE HUMEDAD

Los ensayos de contenido de humedad basado en la norma (ASTM D2216), realizados para cada una de las muestras se efectuaron de la siguiente manera:

- Primero se pesaron las capsulas registrando su peso en la planilla de contenido de humedad, identificando bien la capsula para que no haya confusiones y realizar mal el ensayo.
- Seguidamente se llenaron las capsulas con el suelo, registrando el peso del suelo húmedo más la capsula.
- Luego introducimos las capsulas con suelo identificadas al horno durante 24 horas, a una temperatura contante aproximadamente 105 grados centígrados.
- Pasadas las 24 horas extraemos las capsulas con suelo seco del horno, haciendo enfriar un momento y luego registramos su peso en la balanza.
- Con los datos realizamos los cálculos, que nos muestran en el siguiente cuadro.

Figura 17. Horno y capsulas que se utilizaron para el contenido de humedad



Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS CONTENIDO DE HUMEDAD

Cuadro 12. Resultados de contenido de humedad

N°	Material	Contenido de humedad (%)
1	100% Suelo-0% polvo de ladrillo	4,53
2	96% Suelo-4% polvo de ladrillo	4,34
3	93% Suelo-7% polvo de ladrillo	4,16
4	90% Suelo-10% polvo de ladrillo	3,95
5	86% Suelo-14% polvo de ladrillo	3,74
6	82% Suelo-18% polvo de ladrillo	3,49

Fuente: Elaboración propia

Como vemos en la tabla de resultados del ensayo de contenido de humedad, nos muestra lo siguiente, haciendo una comparación de resultados obtenidos, la muestra de suelo puro natural tiene mayor contenido de humedad que las otras mezclas con diferentes porcentajes de polvo de ladrillo, como vemos los resultados desde el suelo puro 4.53% de humedad, hasta 3.49% de humedad, al 18% de polvo de ladrillo y 82% de suelo, esto nos indica que mientras más se aumenta el contenido de polvo de ladrillo más baja la humedad, esto se debe a que el polvo de ladrillo es un material que pasa por un proceso de cocción y es polvo de ladrillo seco y presenta una absorción al agua contenida en el suelo.

3.5.2 ENSAYO DEL HIDRÓMETRO

Para la realización de este ensayo del hidrómetro basado en la norma (ASTM D2216) con las diferentes mezclas de suelo-polvo de ladrillo a diferentes porcentajes, una vez teniendo todos los materiales necesarios se realizaron los siguientes ensayos:

- Primeramente se procedió a pesar la muestra representativa, misma que pasa por el tamiz No. 200, el peso de la muestra era de 80 gr. luego se preparó la solución (agua con de floculante)
- Después la muestra se colocó en un recipiente y se mesclo con la solución (agua con de floculante) y se dejó sedimentar la muestra durante 24 horas.
- Pasadas las 24 horas de reposar se vacía el contenido del recipiente a una probeta graduada (que se llama probeta de sedimentación) y se aumentó agua hasta llegar a loa 1000 ml.
- Seguidamente se preparó otra probeta graduada patrón de control con agua limpia con 1000 ml.
- Con ayuda del termómetro tomamos la temperatura de las dos probetas con agua y verificamos que la temperatura eran iguales en las dos probetas
- Luego la probeta de sedimentación se tapó con la palma de la mano para evitar que se derrame y se agito por un minuto
- Introducimos el hidrómetro cuidadosamente para saber la lectura del hidrómetro en ese instante y empezamos a tomar el tiempo con ayuda del cronometro.
- Cuidadosamente sacamos el hidrómetro y lo colocamos en la probeta patrón de control de agua limpia para que poner nuevamente a la probeta de sedimentación en el siguiente minuto, sé observar que a medida que transcurre el tiempo el material se va sedimentando en la parte inferior de la probeta. Se realizó 5 mediciones de un minuto, luego otras 5 mediciones cada cinco minutos, después mediciones cada media hora hasta el otro dia.

Figura 18. Ensayo del hidrómetro



Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS DE HIDRÓMETRO

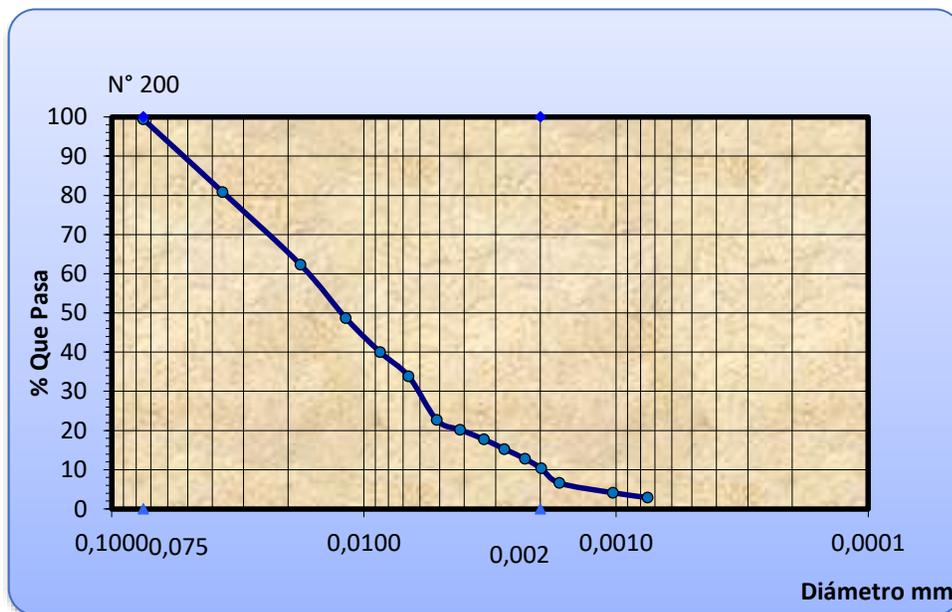
Cuadro 13. Resultados del ensayo del hidrómetro

Nº	Material	Pasa el tamiz 200	% limo parcial	% Arcilla parcial
1	100% Suelo-0% polvo de ladrillo	100	74,27	25,73
2	96% Suelo-4% polvo de ladrillo	100	78,08	21,92
3	93% Suelo-7% polvo de ladrillo	100	81,89	18,11
4	90% Suelo-10% polvo de ladrillo	100	85,71	14,29
5	86% Suelo-14% polvo de ladrillo	100	89,52	10,48
6	82% Suelo-18% polvo de ladrillo	100	93,34	6,6

Fuente: Elaboración propia

En el ensayo del hidrómetro, tenemos los resultados como se muestra en la tabla, la muestra de suelo puro natural tiene un porcentaje de limo 74.27% y arcilla 25.73%, mientras más se aumenta el polvo de ladrillo más baja la cantidad de arcillas y se incrementa la cantidad de limos, al 18% de polvo de ladrillo tiene un porcentaje de limo 93.34% y arcilla 6.60%, esto se debe a que el polvo de ladrillo contiene material fino limoso.

Figura 19. Distribución granulométrica del material fino



Fuente: Elaboración propia

Esta grafica nos representa la distribución granulométrica del material fino que pasa por el tamiz número 200, en una escala logarítmica de la siguiente manera:

Las abscisas corresponden al tamaño de las partículas y las ordenadas a los porcentajes que pasa el tamiz número 200.

3.5.3 GRANULOMETRIA

Los ensayos de granulometría basados en la norma (ASTM *D422* Y AASHTO T88) realizados a las diferentes muestras se llevaron a cabo de la siguiente manera:

El peso de la muestra de agregado fino que pasa por el tamiz nro. 4, y como es un suelo fino se realizó el método del lavado.

- Se empieza cuarteando el total del material para obtener muestras representativas y una buena distribución de partículas, como nuestro suelo es material fino y pasa el tamiz nro. 10, entonces realizamos el método del lavado, para este caso utilizamos una muestra representativa de 300 gr.
- Luego dejamos reposar la muestra en agua hasta que se saturó completamente, haciendo que el suelo tenga características de barro o lodo.
- Sin perder el material se lo introdujo la muestra saturada en el tamiz nro. 200 y con la ayuda del agua se realizó el lavado del material hasta que tomo aspectos claros sin sedimentación, luego el material que se retiene en la malla nro. 200 se pone en un recipiente para hacerlo secar por 24 horas en el horno.
- Después de secar el material se procedió a re-tamizar la muestra seca por los tamices nro. 40 y 200 y se pesó el material retenido en cada malla

Figura 20. Método del lavado



Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS DE GRANULOMETRIA

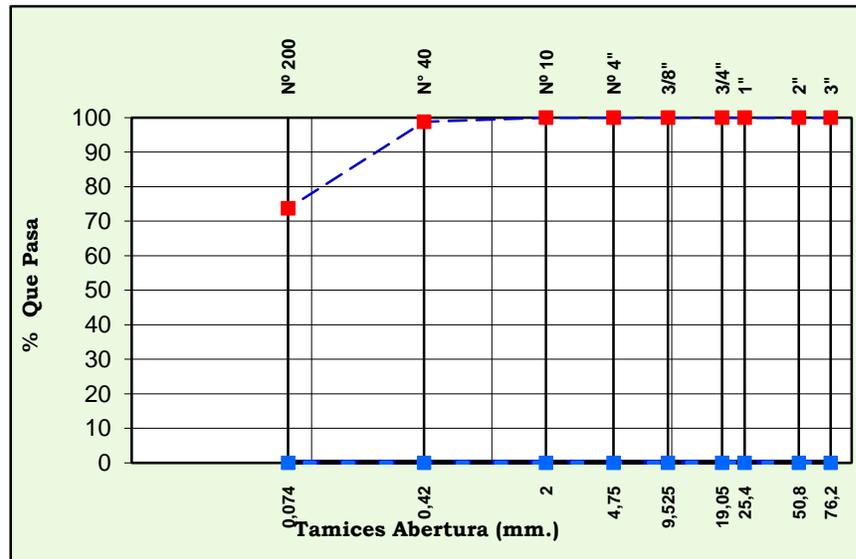
Cuadro 14. Resultados de granulometría

N°	Material	Pasa el 10	Pasa el 40	Pasa el 200
1	100% Suelo-0% polvo de ladrillo	100	98,80	73,70
2	96% Suelo-4% polvo de ladrillo	100	98,20	72,60
3	93% Suelo-7% polvo de ladrillo	100	97,60	71,60
4	90% Suelo-10% polvo de ladrillo	100	97,10	70,30
5	86% Suelo-14% polvo de ladrillo	100	96,30	68,30
6	82% Suelo-18% polvo de ladrillo	100	94,80	65,60

Fuente: Elaboración propia

En los resultados de granulometría, vemos que el suelo puro pasa más cantidad de suelo tanto en el tamiz nro. 40 pasa el 98.8% y nro. 200 pasa el 73.7%, y a medida que se va aumentando los porcentajes nos muestra que el porcentaje que pasa el tamiz nro. 40 y nro. 200 van disminuyendo en su cantidad, si vamos al caso de 18% de polvo de ladrillo en el tamiz nro. 40 pasa el 94.8% y nro. 200 pasa el 65.6%, esto se debe a que el polvo de ladrillo contiene material granular menos fino que el suelo.

Figura 21. Grafica de granulometría (método del lavado)



Fuente: Elaboración propia

Esta grafica nos representa la distribución granulométrica del material fino, en una escala logarítmica de la siguiente manera:

Las abscisas corresponden al tamaño de las partículas y las ordenadas a los porcentajes que pasan los tamices.

3.5.4 LÍMITES DE ATTERBERG

Los ensayos de límites de atterberg basados en las normas (ASTM D4318 y AASHTO T89 y T90) se realizaron con cada una de las muestras con suelo puro y con los diferentes porcentajes de suelo-polvo de ladrillo se efectuaron de la siguiente manera:

a) LÍMITE LÍQUIDO

- Primeramente verificamos la altura de la copa de Casagrande, la cual se utiliza para el límite líquido y esta altura sea a 1 cm, para esta separación se debe utilizar la cabeza en forma de dado que tiene el ranurador.
- Hacer la calibración con respecto a la marca de desgaste que es notoria en la parte inferior de la cazuela.
- Luego de la muestra que pasa el tamiz nro. 40 sacamos aproximadamente 250 gr dependiendo del tipo de suelo.
- Pesar las capsulas limpias y vacías, anotando los pesos de cada capsula con su respectiva identificación en planilla.
- Colocar 250 gr de la muestra de suelo en un recipiente, añadir agua lo necesario hasta formar una pasta uniforme.
- Cuando el suelo esté listo, colocarlo horizontalmente en la copa de Casagrande, después hacerlo una ranura con el ranurador y preceder a girar la palanca para que comience a golpear contando los golpes.
- En nuestro caso tuvo varios golpes y eso nos determina que es un suelo limo-arcilloso con arenas finas.
- Una vez que cerro la ranura finaliza la práctica ya que nuestro suelo tiene límite líquido, luego se procedió a pesar las muestras húmedas con las capsulas para secar en el horno.
- Después se pesa las capsulas con suelo seco para registrar las planillas para calcular el límite líquido
- Y por último con estos valores se pueden calcular los diferentes contenidos de humedad con sus respectivos golpes y registrar las planillas para calcular el límite líquido

Figura 22. Ensayo de límite líquido

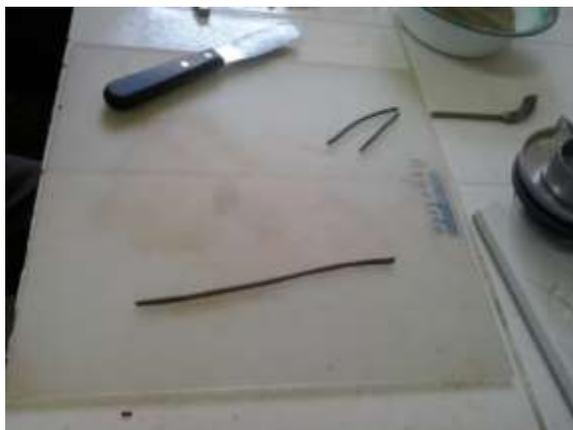


Fuente: Elaboración propia

b) LÍMITE PLÁSTICO

- De la misma muestra que se sacó para la determinación del límite líquido esta muestra se lo aumenta material seco y se empezó a enrollar con la mano extendida con presión suficiente para moldearlo en forma de cilindro sobre la base de vidrio.
- Luego se pesa las capsulas limpias y vacías e identificarlas y anotar en la planilla de límite plástico.
- Cuando el diámetro de la muestra llega a los 3 mm y se observó si presenta pequeñas rajaduras en ese diámetro significa que está en su estado plástico. En nuestro caso se observó que si es una muestra con limite plástico.
- Una vez que nuestro material se encontró en estado plástico termina la práctica y se pesa las capsulas con los rollitos de suelo húmedo para hacer secar en el horno.
- Y por último se extrae la muestra del horno con el suelo seco y se lo pesa para obtener el peso del suelo seco para su respectivo cálculo de límite plástico.

Figura 23. Ensayo de límite plástico



Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS DE LÍMITES

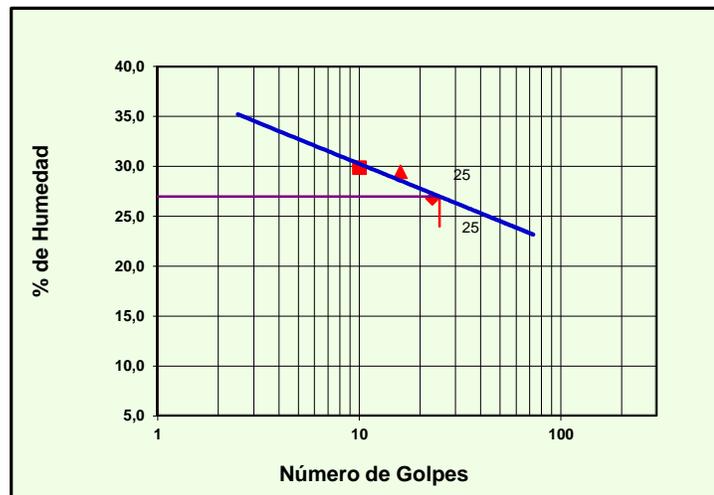
Cuadro 15. Resultados de límites de atterberg

N°	Material	LL	LP	IP
1	100% Suelo-0% polvo de ladrillo	27,00	20,70	6,30
2	96% Suelo-4% polvo de ladrillo	25,80	20,30	5,50
3	93% Suelo-7% polvo de ladrillo	22,90	18,40	4,50
4	90% Suelo-10% polvo de ladrillo	21,20	17,40	3,80
5	86% Suelo-14% polvo de ladrillo	19,20	16,00	3,20
6	82% Suelo-18% polvo de ladrillo	18,50	16,10	2,30

Fuente: Elaboración propia

Como vemos en la tabla de resultados de límites, nos muestra lo siguiente, haciendo una comparación de resultados, la muestra de suelo puro natural contiene mayor índice de plasticidad en comparación de las otras mezclas, los resultados van desde $IP=6.3$ hasta $IP=2.3$ y a medida que se va aumentando los porcentajes nos muestra que el índice de plasticidad disminuye, esto se debe a que el polvo de ladrillo es un material no plástico.

Figura 24. Grafica de limite líquido



Fuente: Elaboración propia

Esta grafica nos representa el valor del límite líquido del material fino, en una escala logarítmica de la siguiente manera:

Las abscisas corresponden al número de golpes y las ordenadas al porcentaje de humedad de la masa del suelo.

3.5.5 CLASIFICACIÓN DEL SUELO

Los sistemas de clasificaciones utilizadas fueron el AASHTO y la clasificación unificada SUCS.

- Para determinar la clase de suelo estudiado se a determinando mediante el sistema de clasificación AASHTO, donde los suelos se clasifican en siete grupos basándose en la composición granulométrica, limite liquido (LL), índice de plasticidad (IP) y el índice de grupo.
- También se utilizó el sistema de clasificación unificada SUCS, para determinar la clasificación de nuestro suelo en estudio, basándose en la carta de plasticidad, donde determinan el límite liquido (LL) y el índice de plasticidad (IP).

RESULTADOS

Cuadro 16. Resultados del ensayo del hidrómetro

Nº	Material	AASHTO	SUCS	OBSERVACIONES
1	100% Suelo-0% polvo de ladrillo	A-4(8)	CL-ML	Arcilla limosa con arena
2	96% Suelo-4% polvo de ladrillo	A-4(8)	CL-ML	Arcilla limosa con arena
3	93% Suelo-7% polvo de ladrillo	A-4(7)	ML	Limo baja plasticidad con arena
4	90% Suelo-10% polvo de ladrillo	A-4(7)	ML	Limo baja plasticidad con arena
5	86% Suelo-14% polvo de ladrillo	A-4(7)	ML	Limo baja plasticidad con arena
6	82% Suelo-18% polvo de ladrillo	A-4(7)	ML	Limo baja plasticidad con arena

Fuente: Elaboración propia

La tabla nos muestra su respectiva clasificación y observaciones de las diferentes mezclas de suelo a diferentes porcentajes de polvo de ladrillo, como vemos el suelo puro en el sistema AASHTO es un A-4(8) y en el sistema unificado SUCS es un CL-ML, y nos indica una arcilla limosa con arena. Al 18% de polvo de ladrillo en el sistema AASHTO es un A-4(7) y en el sistema unificado SUCS es un ML, y nos indica limo de baja plasticidad con arena.

3.5.6 COMPACTACIÓN PROCTOR MODIFICADO (T-180)

El ensayo de compactación basado en las normas (T-180) (AASHTO T272) se realizó tratando de mantener el tamaño del material suelo puro natural como en la mezcla de suelo-polvo de ladrillo para ver el comportamiento de las distintas muestras sometidas a compactación.

Los ensayos de compactación proctor modificado (T-180) realizados para cada una de las muestras se efectuaron de la siguiente manera:

- Primeramente se pesó el material de la muestra de suelo a compactar en una cantidad de 5500 gr para cada punto.
- Luego se pesó el molde vacío sin la base ni el collarín y se anota su peso en planilla de compactación.
- Seguidamente se añadió una cantidad de agua a la muestra para el primer ensayo y se lo mezcla homogéneamente el suelo.
- Después en el molde de 6 pulgadas con el collarín y la base ensamblados colocamos la muestra de suelo en 5 capas aproximadamente iguales cada una a 56 golpes a una altura de 18 pulgadas por encima de la superficie del suelo, los golpes fueron uniformemente distribuidos sobre la superficie de suelo que se estaba compactando, durante la compactación el molde estaba sobre una superficie plana, rígida y uniforme.
- Después de compactar la muestra removimos el collarín metálico y enrasamos con la regla metálica el borde superior del molde, luego pesamos el molde con la muestra y registramos el dato.

- Luego del molde sacamos una muestra representativa de suelo y pesamos en una capsula, luego hacemos secar en el horno con el fin de conocer el contenido de humedad de la muestra.
- Volvemos a realizar el ensayo aumentando el contenido de agua hasta completar los distintos puntos necesarios para graficar por una correlación parabólica y así obtener su densidad máxima y humedad óptima
- Con los datos realizamos los cálculos, que nos muestran en el siguiente capítulo.

Figura 25. Ensayo de proctor modificado (T-180)



Fuente: Elaboración propia

RESULTADOS DE COMPACTACION PROCTOR MODIFICADO (T-180)

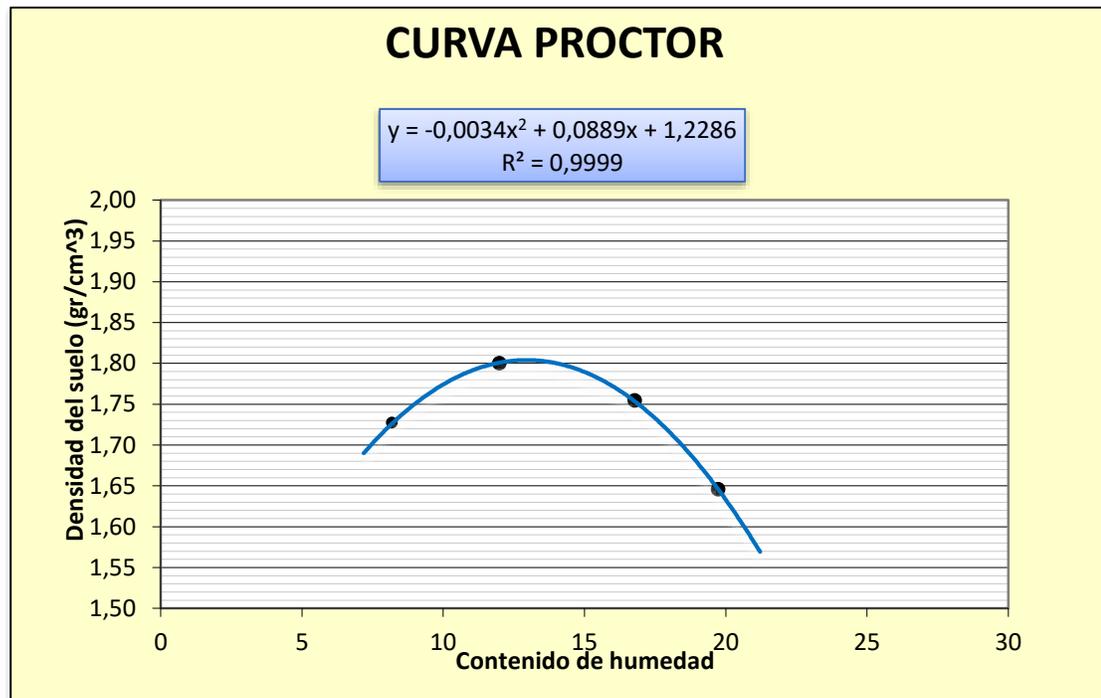
Cuadro 17. Resultados de compactación proctor modificado (T-180)

N°	Material	Densidad máxima	Humedad óptima
1	100% Suelo-0% polvo de ladrillo	1,80	13,00
2	96% Suelo-4% polvo de ladrillo	1,84	12,20
3	93% Suelo-7% polvo de ladrillo	1,86	11,40
4	90% Suelo-10% polvo de ladrillo	1,90	11,20
5	86% Suelo-14% polvo de ladrillo	1,87	11,50
6	82% Suelo-18% polvo de ladrillo	1,85	11,70

Fuente: Elaboración propia

El ensayo de compactación proctor modificado (T-180), nos determina lo siguiente, la muestra de suelo puro tiene menor densidad máxima que las otras muestras de suelo los resultados van desde 1.80 gr/cm³ hasta 1.90 gr/cm³ y la humedad óptima va desde 13.0% hasta 11.20%, estos resultados van desde suelo puro hasta llegar al porcentaje óptimo que el 90% de suelo puro y 10% de polvo de ladrillo, luego disminuye la densidad máxima y aumenta el contenido de humedad, como podemos ver el caso de 86% de suelo puro y 18% de polvo de ladrillo, es la densidad máxima 1.85 gr/cm³ y la humedad óptima 11.70%

Figura 26. Compactación proctor modificado (T-180)



Fuente: Elaboración propia

Esta grafica nos representa el valor de la densidad máxima y la humedad optima del material, en una escala polinómica de la siguiente manera:

Las abscisas corresponden al contenido de humedad y las ordenadas a la densidad del suelo, donde mediante una ecuación polinómica de cuatro puntos encontramos la densidad máxima y el contenido de humedad óptimo.

3.5.7 ENSAYO DE VALOR RELATIVO DE SOPORTE (CBR)

El ensayo de valor de soporte de california C.B.R. basado en las normas ASTM D1883 y AASHTO T193), se realizó de la siguiente manera:

- Se preparó 3 muestras de la misma forma que la compactación para cada suelo a la humedad optima, a objeto de ensayar a 56, 25 y 12 golpes cada uno a 5 capaz de una

altura aproximadamente igual, y se pesa los moldes más el suelo antes de ser embebidos en el agua y se registra el dato.

- Se tomó muestras de suelo en capsulas y llevadas al horno para pesar el suelo seco con el fin de obtener el contenido de humedad.
- Antes de sumergir los moldes se tomó lecturas en el extensómetro para luego calcular su expansión del suelo ensayado.

Figura 27. Moldes de CBR sumergidos en el agua



Fuente: Elaboración propia

- Después de las 96 horas de sumersión de las muestras se mide su expansión con el extensómetro, observando un poco expansión por lo tanto los suelos no experimentan demasiado cambio de volumen, luego se retiran los moldes del agua y se dejó drenar por un tiempo necesario, luego se los pesa los moldes embebidos y se anota el dato.
- Luego se lo somete a la penetración del pistón cilíndrico de 49.6 mm de diámetro de la prensa de C.B.R. calibrando para ello un extensómetro que nos indique la profundidad de incamiento, luego se anotan las lecturas del dial hasta llegar a una profundidad de 0.5 pulgadas.

- Con esas lecturas del dial se ingresa a la curva de calibración del dial (factor Aro 5000) para transformarlas en cargas, se grafican las curvas carga vs penetración y se corrige si es necesario, continuación se elabora el índice C.B.R. comparando la presión ejercida del pistón para penetraciones de 0.1 y 0.2 pulgadas respectivamente, con estos datos y luego calcular las densidades secas de los moldes y graficamos la densidad seca vs carga relativa o C.B.R. y de ahí proyectamos una línea al 95% de la densidad seca máxima, cortamos el otro eje y encontramos el C.B.R. de diseño.

Figura 28. El molde en la prensa de C.B.R.



Fuente: Elaboración propia.

3.5.7.1 TRATAMIENTO ESTADÍSTICO DE LOS VALORES DE C.B.R.

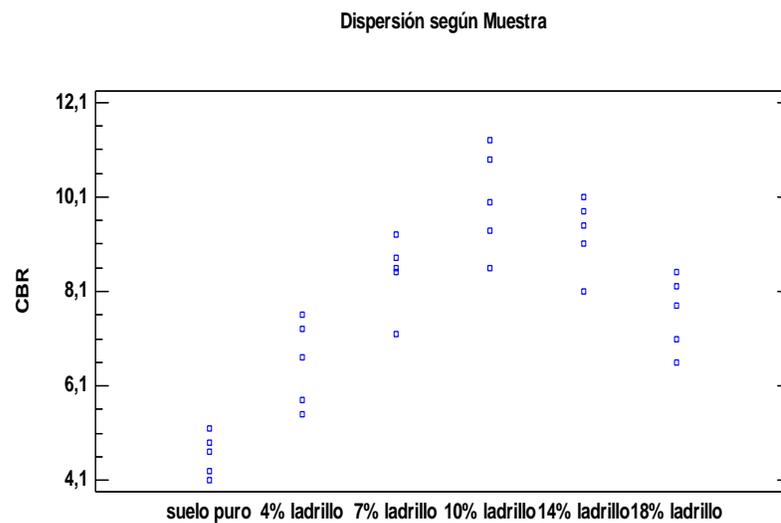
RESUMEN DE LAS 6 MEZCLAS DE SUELO-POLVO DE LADRILLO CON PORCENTAJES DE 0, 4, 7, 10, 14 Y 18 % DE POLVO DE LADRILLO

Análisis Multivariado

- 100% suelo y 0% ladrillo. 5 valores con rango desde 4,1 a 5,2

- 96% suelo y 4% ladrillo. 5 valores con rango desde 5,5 a 7,6
- 93% suelo y 7% ladrillo. 5 valores con rango desde 7,2 a 9,3
- 90% suelo y 10% ladrillo. 5 valores con rango desde 8,6 a 11,3
- 86% suelo y 14% ladrillo. 5 valores con rango desde 8,1 a 10,1
- 82% suelo y 18% ladrillo. 5 valores con rango desde 6,6 a 8,5

Figura 29. Dispersión de datos de las 6 mezclas de suelo-polvo de ladrillo



Fuente: programa estadístico STATGRAPHICS

Los valores de los datos se grafican a lo largo del eje horizontal, como se observa ahí están las diferentes muestras de suelo-polvo de ladrillo. A lo largo del eje vertical, se muestran las respuestas o valores obtenidos, los puntos se separan aleatoriamente hacia arriba o hacia abajo. Esto se hace para evitar que puntos con igual valor se traslapen.

Además se advierte que la nube de puntos es más densa cerca del rango medio de CBR al 95% y se hace menos densa en los valores superiores o inferiores. Los puntos de cada muestra están muy cerca, por lo que no hay mucha dispersión de datos, lo que nos da mejores valores.

Cuadro 18. Resumen Estadístico de las 6 mezclas de suelo-polvo de ladrillo

	suelo puro	4% ladrillo	7% ladrillo	10% ladrillo	14% ladrillo	18% ladrillo
Recuento	5	5	5	5	5	5
Promedio	4,64	6,58	8,48	10,04	9,32	7,64
Desviación Estándar	0,44497	0,914877	0,779102	1,09681	0,775887	0,782943
Coef. de Variación	9,5899%	13,9039%	9,18752%	10,9244%	8,32496%	10,2479%
Mínimo	4,1	5,5	7,2	8,6	8,1	6,6
Máximo	5,2	7,6	9,3	11,3	10,1	8,5
Rango	1,1	2,1	2,1	2,7	2,0	1,9
Sesgo Estandarizado	-0,01450	-0,148062	-1,21551	-0,176352	-1,00613	-0,369756
Curtosis Estandarizada	-0,72160	-1,14148	1,22192	-0,680874	0,507842	-0,765279

Fuente: programa estadístico STATGRAPHICS

Esta tabla muestra el resumen estadístico para cada una de las variables seleccionadas. Incluye medidas de tendencia central, de variabilidad, y de forma. De particular interés

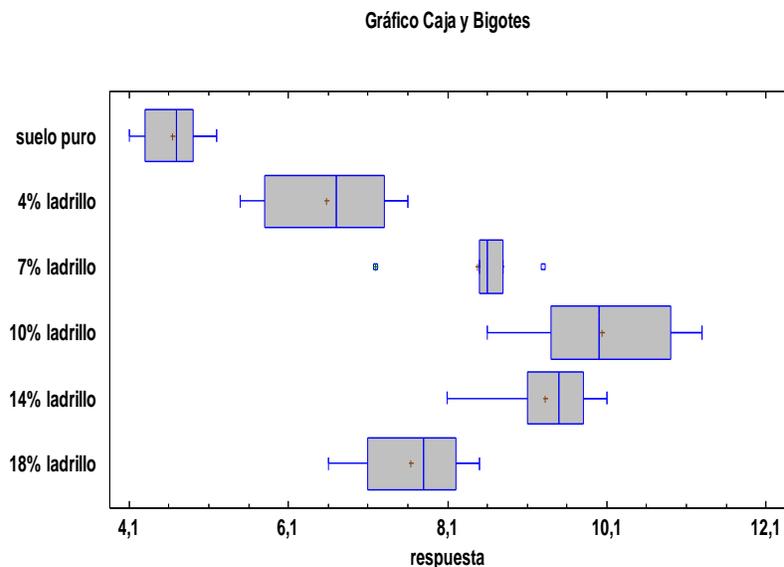
aquí es el sesgo estandarizado y la curtosis estandarizada, las cuales pueden usarse para determinar si la muestra proviene de una distribución normal. Valores de estos estadísticos fuera del rango de -2 a +2 indican desviaciones significativas de la normalidad, las cuales tenderían a invalidar muchos de los procedimientos estadísticos que se aplican habitualmente a estos datos. En este caso, las siguientes variables muestran valores de sesgo estandarizado y de curtosis estandarizada fuera del rango esperado:

Ninguna

Las siguientes variables muestran curtosis estandarizada fuera del rango esperado:

Ninguna

Figura 30. Grafica de cajas y bigotes de las 6 mezclas de suelo-polvo de ladrillo



Fuente: programa estadístico STATGRAPHICS centurión XVI

- Se dibuja una caja que se extienda desde el **cuartil inferior** de la muestra hasta el **Cuartil superior**. Este es el intervalo cubierto por el 50% central de los valores de los datos cuando se ordenan de menor a mayor.
- Se dibuja una línea vertical en la mediana (el valor de en medio).
- Si se solicita, un signo de más se coloca en el lugar de la media muestral.
- Los bigotes se dibujan desde los extremos de la caja hasta los valores mínimo y máximo de los datos, a menos que haya valores inusualmente muy alejados de la caja (a los cuales Tukey llama puntos extremos).

Los puntos extremos, que son puntos a más de 1.5 veces el rango intercuartílico (ancho de la caja) por arriba o por debajo de la caja, se indican por símbolos de señalamiento.

Cualesquiera puntos a más de 3 veces el rango intercuartílico por arriba o por debajo de la caja se les llama puntos extremos lejanos, y se indican por símbolos de señalamiento con signos de más superpuestos por arriba de ellos.

Si hay presentes puntos aberrantes (extremos o extremos lejanos), los bigotes se dibujan a los valores máximo y mínimo que no sean puntos aberrantes.

El signo de más para la media se encuentra muy cerca de la línea para la mediana, mientras que los bigotes son aproximadamente de igual longitud.

Cuadro 19. Frecuencias para las 6 mezclas de suelo-polvo de ladrillo

	suelo puro	4% ladrillo	7% ladrillo	10% ladrillo	14% ladrillo	18% ladrillo	Total por Fila
Fila_1	5	7	9	11	10	8	50
	2,12%	2,97%	3,81%	4,66%	4,24%	3,39%	21,19%
Fila_2	5	7	9	10	9	8	48
	2,12%	2,97%	3,81%	4,24%	3,81%	3,39%	20,34%
Fila_3	5	6	9	9	10	7	46
	2,12%	2,54%	3,81%	3,81%	4,24%	2,97%	19,49%
Fila_4	4	8	7	9	8	7	43
	1,69%	3,39%	2,97%	3,81%	3,39%	2,97%	18,22%
Fila_5	4	6	9	11	10	9	49
	1,69%	2,54%	3,81%	4,66%	4,24%	3,81%	20,76%
Total Columna	23	34	43	50	47	39	236
	9,75%	14,41%	18,22%	21,19%	19,92%	16,53%	100,00%

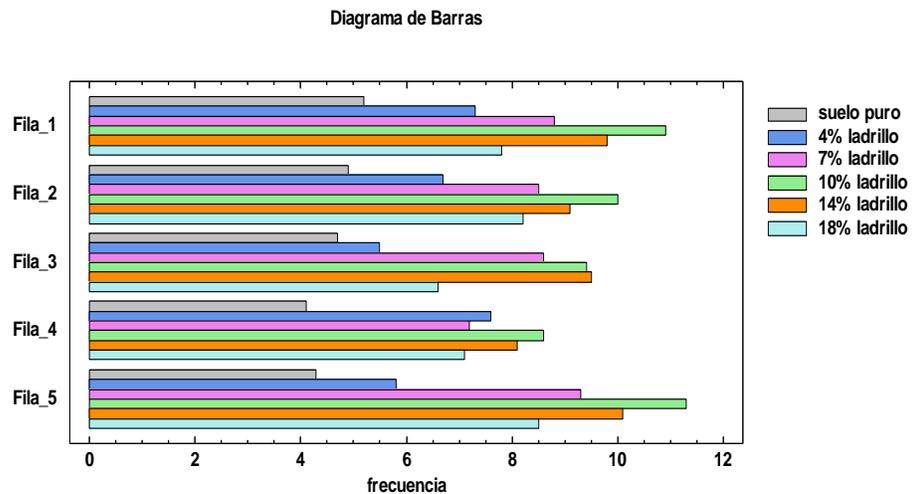
Fuente: programa estadístico STATGRAPHICS

El cuadro muestra los recuentos para una tabla de 5 por 6.

El primer número en cada celda de la tabla es el recuento o frecuencia.

El segundo número muestra el porcentaje de toda la tabla que representa esa celda. Por ejemplo, hubo 6 valores en la primera fila y 5 en la primera columna. Esto representa 2,12% de los 236 valores.

Figura 31. Diagrama de Barras Múltiple



Fuente: programa estadístico STATGRAPHICS centurión XVI

Este procedimiento despliega gráficos de barras múltiples para datos previamente tabulados, como podemos ver cada una de las muestras de suelo donde nos muestra en la gráfica.

Cuadro 20. Medias con intervalos de confianza del 95,0%

	Casos	Media	(Error Est.)	Límite Inferior	Límite Superior
suelo puro	5	4,64	0,367877	4,10312	5,17688
4% ladrillo	5	6,58	0,367877	6,04312	7,11688
7% ladrillo	5	8,48	0,367877	7,94312	9,01688
10% ladrillo	5	10,04	0,367877	9,50312	10,5769
14% ladrillo	5	9,32	0,367877	8,78312	9,85688
18% ladrillo	5	7,64	0,367877	7,10312	8,17688
Total	30	7,7833			

Fuente: programa estadístico STATGRAPHICS

Esta tabla muestra la media para cada columna de datos. También muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. El error estándar es el resultado de dividir la desviación estándar mancomunada entre el número de observaciones en cada nivel.

La tabla también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Están contruidos de tal manera que, si dos medias son iguales, sus intervalos se traslaparán un 95,0% de las veces. Puede ver gráficamente los intervalos seleccionando Gráfica de Medias de la lista de Opciones Gráficas.

En las Pruebas de Rangos Múltiples, estos intervalos se usan para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras.

3.5.7.2 RESULTADOS DE C.B.R.

Cuadro 21. Resultados de valor de soporte de california (C.B.R.)

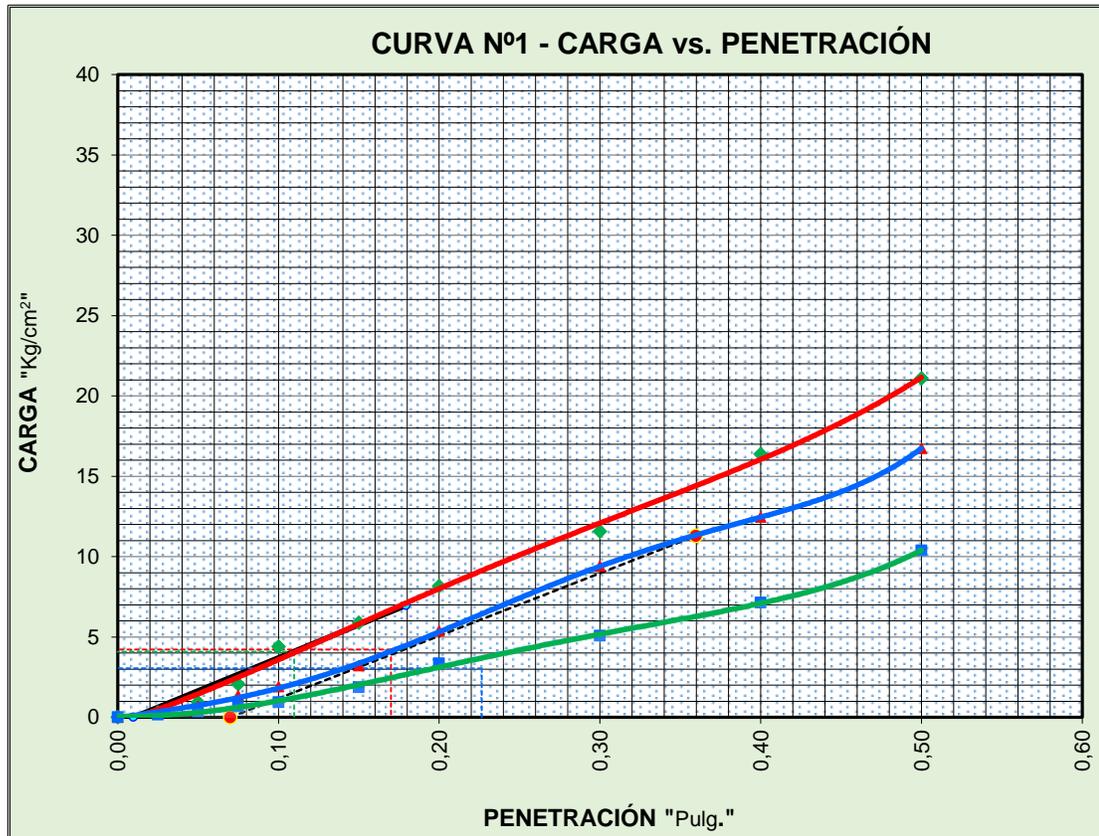
N°	Material	CBR		CBR		Exp.	Prom.
		100%	Pros.	95%	Prom.		
1	suelo puro	6,4		5,2		1,0	
		6,0		4,9		1,1	
		6,1	6,2	4,7	4,6	1,0	1,1
		5,2		4,1		1,2	
		7,1		4,3		0,9	
2	96 % suelo puro mas 4 % ladrillo	8,1		7,3		0,9	
		7,2		6,7		0,9	
		9,6	8,2	5,5	6,6	1,0	0,9
		8,8		7,6		0,8	
		7,4		5,8		0,9	
3	93 % suelo puro mas 7 % ladrillo	10,5		8,8		0,7	
		9,2		8,5		0,7	
		9,8	9,6	8,6	8,5	0,8	0,8
		7,4		7,2		0,8	
		11,3		9,3		0,8	
		14,0		10,9		0,5	

4	90 % suelo puro mas 10 % ladrillo	12,6		10,0		0,6	
		12,1	12,9	9,4	10,0	0,6	0,6
		11,2		8,6		0,5	
		14,6		11,3		0,6	
5	86 % suelo puro mas 14 % ladrillo	11,7		9,8		0,5	
		11,3		9,1		0,4	
		10,4	11,0	9,5	9,3	0,5	0,5
		9,6		8,1		0,5	
		12,2		10,1		0,5	
6	82 % suelo puro mas 18 % ladrillo	9,7		7,8		0,4	
		11,0		8,2		0,5	
		10,3	10,0	6,6	7,6	0,5	0,4
		9,0		7,1		0,4	
		10,0		8,5		0,3	

Fuente: Elaboración propia

En el ensayo de C.B.R. el comportamiento de los resultados es muy similar al de la compactación. Para la determinar el valor de soporte de california C.B.R. la muestra de suelo puro obtiene el C.B.R. más bajo al 95% cuyo valor es 4.6 % y la expansión es de 1.1% más alta que las otras mezclas. A medida que se aumentan los porcentajes de polvo de ladrillo, aumenta el C.B.R. hasta llegar al porcentaje óptimo del 95%, 10.0 CBR y la expansión 0.6%, esto se da al 90 % de suelo natural y 10 % de polvo de ladrillo, luego al disminuir el valor del C.B.R., también disminuye la expansión del suelo, como es el caso de 82 % de suelo con 18 % de polvo de ladrillo, y nos da lo siguiente: C.B.R. al 95 % es de 7.60 % y su expansión de 0.4 %.

Figura 32. Grafica Carga vs Penetración

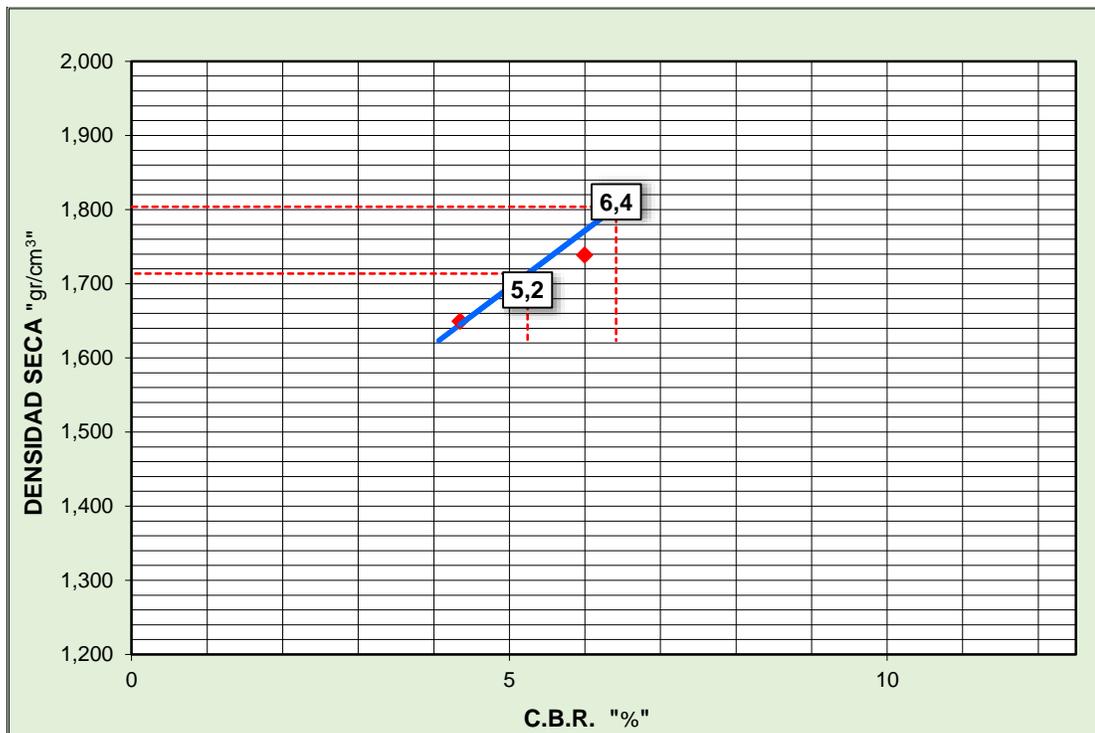


Fuente: Elaboración propia

Esta gráfica representa el valor de la carga ejercida sobre el suelo y la penetración en el material, de la siguiente manera:

Las abscisas corresponden a la penetración “pulgadas” y las ordenadas a la carga “Kg/cm²”, donde se encuentra la resistencia del suelo.

Figura 33. Gráfica Densidad seca vs C.B.R



Fuente: Elaboración propia

Esta gráfica representa el valor de la densidad seca del suelo y el valor de C.B.R. del material, de la siguiente manera:

Las abscisas corresponden al C.B.R. “%” y las ordenadas a la densidad seca “gr/cm³”, donde se encuentran los valores del C.B.R. del suelo al 100%, 95% y 90%, respectivamente.

3.6 CONTENIDO ÓPTIMO DE POLVO DE LADRILLO

Para poder realizar la estabilización con suelo-polvo de ladrillo en sub-rasantes de caminos no pavimentados en nuestro medio es necesario conocer mediante ensayos de laboratorio el contenido óptimo del estabilizante para su aplicación en obras viales, más concretamente en caminos no pavimentados.

Como se pudo evidenciar en los diferentes resultados ya presentados de plasticidad, de compactación proctor modificado (T-180) y el ensayo de valor de soporte de california C.B.R., determinan que el contenido óptimo de polvo de ladrillo para reducir la plasticidad es de 18% de polvo de ladrillo, $IP=2.3$, mientras más se aumenta el contenido de ladrillo menos índice de plasticidad se obtendra, lo mismo ocurre en la estabilidad volumétrica, mientras más se aumenta el contenido de polvo de ladrillo menor es la expansión del suelo y el contenido óptimo para esta propiedad también sería el 18% de polvo de ladrillo. Pero en los ensayos que determinan la resistencia del material, en compactación proctor modificado (T-180) y el ensayo de valor de soporte de california C.B.R., se establece que el contenido óptimo de polvo de ladrillo es el 10 %, ya que los otros porcentajes de polvo de ladrillo proporcionan valores más bajos y no son adecuados para la estabilización de suelos en sub-rasantes de caminos no pavimentados.

Por lo tanto se establece que el contenido óptimo de polvo de ladrillo es del 10%, basado en la resistencia del CBR, de polvo de ladrillo ya que si aumentamos el contenido reduce la resistencia y aumenta el costo de la estabilización de suelo-polvo de ladrillo.

Si aplicamos el contenido optimo el cual se considera adecuado porque es mayor o igual a 10 % el valor relativo de soporte de california C.B.R. y está dentro de lo permitido por la normativa vigente para la estructuración de la propuesta de aplicación de suelo-polvo de ladrillo que se realizara más adelante.

3.7 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Cuadro 22. Resultados de caracterización de suelos

Nº	Material	Contenido de humedad (%)	Ensayo del Hidrometro		Granulometría			Límites			Clasif.		Observaciones
			% limo	% arcilla	Nº10	Nº40	Nº200	L.I.	L.p.	I.P.	AASHTO	SUCS	
1	suelo puro	4,53	25,73	74,27	0,0	98,8	73,7	27,0	20,7	6,3	A-4(8)	CL-ML	Arcilla limosa con arena
2	96 % suelo puro mas 4 % ladrillo	4,34	21,92	78,08	0,0	98,2	72,6	25,8	20,3	5,5	A-4(8)	CL-ML	Arcilla limosa con arena
3	93 % suelo puro mas 7 % ladrillo	4,16	18,11	81,89	0,0	97,6	71,6	22,9	18,4	4,5	A-4(7)	ML	Limo baja plasticidad con arena
4	90 % suelo puro mas 10 % ladrillo	3,95	14,29	85,71	0,0	97,1	70,3	21,2	17,4	3,8	A-4(7)	ML	Limo baja plasticidad con arena
5	86 % suelo puro mas 14 % ladrillo	3,74	10,48	89,52	0,0	96,3	68,3	19,2	16,0	3,2	A-4(7)	ML	Limo baja plasticidad con arena
6	82 % suelo puro mas 18 % ladrillo	3,49	6,6	93,34	0,0	94,8	65,6	18,5	16,1	2,3	A-4(7)	ML	Limo baja plasticidad con arena

Fuente: Elaboración propia

Ver panillas ANEXOS I

Una vez realizado el análisis y comparación de resultados de cada ensayo realizado en laboratorio, ahora se elabora una síntesis general de toda la investigación:

Teniendo los resultados del suelo puro a estado natural, se observa que el contenido de humedad es mayor que de las otras mezclas, este va desde 4.53% hasta 3.49% de contenido de humedad, esto nos indica que si se aumenta mayor porcentaje de polvo de ladrillo, entonces menor será el contenido de humedad del suelo.

En el caso del hidrómetro nuestro suelo natural tiene más limo que arcilla, limo 74.27% y arcilla 25.73%; mientras más se aumenta el polvo de ladrillo más baja la cantidad de

arcillas y se incrementa la cantidad de limos. Al 18% de polvo de ladrillo, la muestra tiene un porcentaje de limo 93.34% y arcilla 6.60%, esto se debe a que el polvo de ladrillo contiene material fino limoso, lo cual indica que si se aumenta mayor porcentaje de polvo de ladrillo, entonces mayor será el contenido de limos y menor será el contenido de arcillas en el suelo.

En la granulometría se observa que el suelo puro pasa mayor cantidad de suelo fino tanto por el tamiz Nro. 40 pasa el 98.8% y Nro. 200 pasa el 73.7%. Así a medida que se va aumentando los porcentajes nos muestra que el porcentaje que pasa el tamiz nro. 40 y nro. 200 van disminuyendo en su cantidad, si vamos al caso de 18% de polvo de ladrillo en el tamiz Nro. 40 pasa el 94.8% y Nro. 200 pasa el 65.6%, esto se debe a que el polvo de ladrillo contiene material granular menos fino que el suelo, esto nos indica que si aumentamos mayor porcentaje de polvo de ladrillo, entonces mayor será la cantidad de material que se retiene en los tamices 40 y 200.

El índice de plasticidad, nos muestra lo siguiente, haciendo una comparación de resultados, la muestra de suelo puro natural contiene mayor índice de plasticidad en comparación de las otras mezclas, los resultados van desde $IP=6.3$ hasta $IP=2.3$ y a medida que se va aumentando los porcentajes nos muestra que el índice de plasticidad disminuye, esto se debe a que el polvo de ladrillo es un material no plástico, esto nos indica que si aumentamos mayor porcentaje de polvo de ladrillo, entonces menor será el índice de plasticidad hasta llegar a ser un material no plástico.

En cuanto a la clasificación del suelo, vemos el suelo puro en el sistema AASHTO es un A-4(8) y en el sistema unificado SUCS es un CL-ML, y nos indica una arcilla limosa con arena. Al 18% de polvo de ladrillo en el sistema AASHTO es un A-4(7) y en el sistema unificado SUCS es un ML, y nos indica limo de baja plasticidad con arena.

Cuadro 23. Resultados de ensayos de resistencia de los suelos

Nº	Material	Proctor		CBR		CBR		Exp.	Prom.
		D.max.	H.op.	100%	Prom.	95%	Prom.		
1	suelo puro	1,80	13,0	6,4		5,2		1,0	
				6,0		4,9		1,1	
				6,1	6,2	4,7	4,6	1,0	1,1
				5,2		4,1		1,2	
				7,1		4,3		0,9	
2	96 % suelo puro mas 4 % ladrillo	1,84	12,2	8,1		7,3		0,9	
				7,2		6,7		0,9	
				9,6	8,2	5,5	6,6	1,0	0,9
				8,8		7,6		0,8	
				7,4		5,8		0,9	
3	93 % suelo puro mas 7 % ladrillo	1,86	11,4	10,5		8,8		0,7	
				9,2		8,5		0,7	
				9,8	9,6	8,6	8,5	0,8	0,8
				7,4		7,2		0,8	
				11,3		9,3		0,8	
4	90 % suelo puro mas 10 % ladrillo	1,90	11,2	14,0		10,9		0,5	
				12,6		10,0		0,6	
				12,1	12,9	9,4	10,0	0,6	0,6
				11,2		8,6		0,5	
				14,6		11,3		0,6	
5	86 % suelo puro mas 14 % ladrillo	1,87	11,5	11,7		9,8		0,5	
				11,3		9,1		0,4	
				10,4	11,0	9,5	9,3	0,5	0,5
				9,6		8,1		0,5	
				12,2		10,1		0,5	
6	82 % suelo puro mas 18 % ladrillo	1,85	11,7	9,7		7,8		0,4	
				11,0		8,2		0,5	
				10,3	10,0	6,6	7,6	0,5	0,4
				9,0		7,1		0,4	
				10,0		8,5		0,3	

Fuente: Elaboración propia

Ver planillas ANEXO II

Este cuadro expone los resultados de los ensayos de compactación proctor modificado (T-180) y el valor relativo de soporte de california C.B.R., en la compactación nos

determina lo siguiente, la muestra de suelo puro tiene menor densidad máxima que las otras muestras de suelo los resultados van desde 1.80 gr/cm³ hasta 1.90 gr/cm³ y la humedad optima va desde 13.0% hasta 11.20%, estos resultados van desde suelo puro hasta llegar al porcentaje optimo que el 90% de suelo puro y 10% de polvo de ladrillo, luego disminuye la densidad máxima y aumenta el contenido de humedad, como podemos ver el caso de 86% de suelo puro y 18% de polvo de ladrillo, es la densidad máxima 1.85 gr/cm³ y la humedad optima 11.70%, esto nos indica que si aumentamos mayor porcentaje de polvo de ladrillo, entonces mayor será la densidad máxima hasta llegar al 10% de polvo de ladrillo, luego baja la densidad máxima.

En el caso del valor de soporte de california C.B.R, el comportamiento de los resultados e muy similar al de la compactación, para la determinación del C.B.R. la muestra de suelo puro tiene el C.B.R. más bajo al 95% va desde 4.6% hasta 10.04% que es el CBR al 10% de polvo de ladrillo, luego reduce el valor de CBR cuando se lo aumenta mayor al 10% de polvo de ladrillo, en cuanto a la expansión en suelo puro es mayo, va desde 1.1 % hasta 0.4% al 18% de polvo de ladrillo, esto nos indica que si aumentamos mayor porcentaje de polvo de ladrillo, entonces mayor será el valor del CBR hasta llegar al 10% de polvo de ladrillo, luego baja el valor del CBR, pero la expansión si se aumenta mayor porcentaje de polvo de ladrillo menor es la expansión del material.

Lo que indica que si se aplica el contenido óptimo de polvo de ladrillo al 10%, y 90% de suelo obtendremos mejores propiedades ya que reduce la plasticidad, del suelo, también reduce la compresibilidad a través de la compactación, la estabilidad volumétrica reduce con el polvo del ladrillo como hemos visto en la expansión del suelo, y la resistencia o capacidad cortante aumenta como hemos visto en el ensayo del CBR, ya que es mucho más resistente y está dentro de lo mínimo permitido para la construcción de sub-rasantes de caminos no pavimentados.

3.8 PROPUESTA DE APLICACIÓN EN OBRAS VIALES

3.8.1 RESUMEN GENERAL DE LA APLICACIÓN PRÁCTICA

Nombre del proyecto

“Evaluación del polvo de ladrillo como estabilizante de suelo en caminos no pavimentados“

Problema

¿Es posible determinar la utilización del polvo de ladrillo para la estabilización de la sub-rasante en caminos no pavimentados?

Objetivo del proyecto

Realizar la evaluación al suelo-polvo de ladrillo, mediante ensayos de laboratorio tomando en cuenta la resistencia y expansión de los mismos, para determinar si es un material adecuado para utilizar en la estabilización de la sub-rasante en caminos no pavimentados de nuestra región.

Objetivos específicos

- Establecer mediante pruebas de laboratorio la expansión de la mezcla suelo-polvo de ladrillo.
- Establecer mediante pruebas de laboratorio la resistencia de la mezcla suelo- polvo de ladrillo.
- Realizar un análisis según su resistencia y expansión si el material en estudio puede llegar a ser o no una alternativa de solución para la estabilización de la sub-rasante en caminos no pavimentados en nuestro medio.

Justificación del proyecto

Los diferentes productos y residuos industriales, en este tiempo de desarrollo están al servicio de los que quieren utilizarlos en la construcción u otros medios, siempre y cuando sepa manejarlos adecuadamente, es importante el estudio de este tema ya que en la actualidad se realizan diferentes obras de ingeniería utilizando metodologías diferentes, aplicando una adecuada tecnología, favoreciendo así al mejoramiento y desarrollo de cualquier obra civil de ingeniería.

El ingenio del hombre ha llevado a muchos adelantos tecnológicos y científicos como también a alternativas de soluciones que pueden llegar a ser motivo de discusión, es por eso que para plantear una alternativa de solución hay que seguir distintos pasos, como la justificación, realizar pruebas de laboratorio si es necesario, del cual se pueda obtener una respuesta que llegue a satisfacer las necesidades actuales para la realización del trabajo.

Con este fin se plantea los siguientes pasos a seguir:

- El alcance que pueda tener un estudio del tema para mejorar la seguridad de las obras civiles mediante nuevas tecnologías.
- Con el estudio del tema suelo-polvo de ladrillo, se podrá conseguir datos de los cuales se podrá aplicar en el desarrollo de cualquier obra civil de esta manera mejorar aspectos importantes, ya sean económicos, constructivos, de seguridad, de comodidad, etc.
- Nos permitirá realizar metodologías para implementar en nuestro medio en proyectos regionales para la construcción y mejoramiento de caminos no pavimentados.
- El estudio que se realiza es con la finalidad de adquirir conocimientos con el fin de mejorar los problemas que se presentan en la construcción y mejoramiento de caminos vecinales y así mismo ofrecer como fuente bibliográfica para que pueda servir como material de consulta en nuestro medio.

Alcance del proyecto

El presente trabajo tiene por finalidad realizar una evaluación del polvo de ladrillo como estabilizante de suelo limoso, para la estabilización de sub-rasantes de diferentes

caminos no pavimentados, mediante distintos ensayos de laboratorio, se podrá obtener resultados que pueden llegar a ser una alternativa de solución para la estabilización de caminos vecinales.

En toda circunstancia de proyectos realizados, se toma en cuenta la clasificación del material de obras viales a realizar, en este caso para poder ejecutar una evaluación le suelo-polvo de ladrillo hay que basarse en técnicas que nos facilitan las posibles soluciones a llegar, es el caso de ladrillo molido, en el ámbito de la ingeniería, ahora pues, con tal motivo se comprobara en laboratorio su comportamiento con la mezcla de suelo-polvo de ladrillo.

La aplicación de este proyecto se lo hará para las sub-rasantes en caminos no pavimentados con el fin de optimizar el suelo que servirá de base del paquete estructural de caminos vecinales, siendo de mucha importancia porque será el sostén de diferentes tipos de solicitaciones en nuestro medio

3.9 GENERALIZACIÓN DE LA PROPUESTA

En la generalización de la propuesta se planteara el tipo de material a utilizar, basándose en resultados obtenidos anteriormente y cumplan con las especificaciones y normativas vigentes.

Los resultados obtenidos en diferentes ensayos de laboratorio de suelos como se detalla en el capítulo anterior, permiten dar alternativas de solución a la estabilización de suelos, debido a que en los diferentes ensayos realizados en laboratorio, los resultados obtenidos que están dentro del margen de las especificaciones, tal el caso de C.B.R.

El tipo de material utilizado ladrillo molido tiene características diferentes al suelo utilizado por lo que su utilización en sub-rasante se la puede aplicar, en síntesis el ladrillo molido brinda más durabilidad y resistencia y menos expansión que el suelo puro, lo cual determina que puede ser aplicable a estabilización de sub-rasantes, en caminos vecinales no pavimentados.

Su aplicabilidad en general se la hará en la sub-rasante y terraplén en caminos vecinales no pavimentados, los cuales posee una baja intensidad de tráfico y por lo cual su desgaste no llegara a ser importante como las vías principales y secundarias, siendo la mezcla de porcentaje óptimo del suelo-polvo de ladrillo una base del paquete estructural de la carretera.

Para realizar la estabilización de este material suelo-polvo de ladrillo se tendrá que utilizar el porcentaje optimo encontrado en los ensayos de laboratorio, debido a que cumplen con las especificaciones de resistencia y expansión en la sub-rasante y principalmente en proyectos de construcción y mejoramiento de caminos vecinales, pero tomando en cuenta las recomendaciones que se las hará más adelante en el siguiente capítulo.

El material a usarse en la conformación de la capa, consistirá en una mezclas de suelo-polvo de ladrillo a un porcentaje óptimo de ladrillo molido determinado en ensayos de laboratorio, y es una mezcla de suelo fino donde se puede mantener una nivelación constante del suelo y se pueda realizar una buena compactación en el proceso de la estabilización del suelo-polvo de ladrillo.

La estabilización mecánica que se realizara incluirá principalmente la adición del polvo de ladrillo fino un poco granular para adherir las partículas del material de la capa de terraplén lo suficiente para darle una buena resistencia de apoyo para resistir las fuerzas externas y el intemperismo del suelo, y que la capa no se deforme bajo el tráfico del equipo de construcción.

Ubicación del material apto para utilizar

Para la ubicación del material apto para usar se tiene que conseguir cualquier tipo de ladrillo de una fábrica cerámica industrial para después llevar a un lugar donde será el banco de préstamo o molienda del material, donde se triturara el material a través de la máquina trituradora, y de esta manera el polvo de ladrillo cumpla con las condiciones

de trabajabilidad y comodidad, así como también la justificación de la cantidad existente que pueda usarse para realizar la estabilización del suelo-polvo de ladrillo.

Ubicación de banco de préstamo de material para la molienda del ladrillo

La ubicación del material apto para el banco de préstamos estará ubicado cerca a no más de 100 metros de la obra o de la planta procesadora de molienda del ladrillo cocido, para su posterior carguío, transporte y depósito en la planta procesadora de molienda del ladrillo cocido.

Carguío desde el banco de préstamo hasta la planta procesadora de molienda de ladrillo.

Una vez definido el banco de préstamo a utilizar se procede a llevar el ladrillo macizo o gambote cocido a las cintas transportadoras, posteriormente se transporta el material a la máquina trituradora, durante el proceso de molienda y tamizado de las mismas respectivamente se clasifica el material molido de acuerdo a medidas de especificaciones en cintas transportadoras para su respectivo uso, dando fin al proceso de molienda del ladrillo

Preparación de la sub-rasante

Antes de colocar el ladrillo molido, Se despeja la zona del camino de piedras grandes, plantas y materia orgánica, se excava hasta encontrar terreno firme que servirá de apoyo a la base.

La sub-rasante natural del camino será preparada y acondicionada con maquinaria necesaria con un raspado y limpiado, el polvo de ladrillo disponible podrá utilizarse en terraplenes o sub-rasantes de caminos vecinales, siempre y cuando presenten condiciones satisfactorias.

Si además de suelo nativo se utiliza suelo de aportación, éste deberá esparcirse sobre la superficie en cantidad suficiente para lograr la proporción adecuada de la mezcla, posteriormente se procede a escarificar y mezclar los materiales, procurando una mezcla homogénea.

Si solo se usa suelo nativo se procede a cortar el material a la profundidad de la capa a estabilizar, para esto se pasa varias veces el escarificador o discos de arado rotatorio.

Si el suelo es arcilloso o limoso, presentará resistencia a pulverizarse, por lo que será necesario romper los terrones antes de pulverizarlo; si está muy húmeda formará una masa pastosa difícil de mezclar lo que encarecerá el proceso.

Una vez pulverizado el suelo se reconstruye el perfil para que quede con las dimensiones dadas antes de la operación.

Método de colocación

El material ladrillo molido será depositado y esparcido homogéneamente sobre la superficie de la sub-rasante natural del suelo, de modo que se evite la segregación y en cantidad necesaria tal que permita obtener el espesor programado después del proceso de compactación.

El colocado del material se lo hará de una sola capa, el material ladrillo molido será extendido con la motoniveladora, será de manera uniforme, evitándose la formación de montones de material fino.

Distribución del polvo de ladrillo

La distribución del polvo de ladrillo se puede hacer mecánicamente, pero la forma más adecuada para lograr una distribución uniforme es haciéndolo manualmente y utilizando el polvo de ladrillo en fundas no a granel.

Si se hacen por sacos, éstos se colocarán en hileras y filas regulares con la separación necesaria para la dosificación. Luego se abren los sacos o fundas y se deposita el polvo de ladrillo en el lugar en que se hallan formando pequeños montones.

Como el polvo de ladrillo se agrega de acuerdo a un porcentaje por volumen entonces, podemos determinar el volumen de suelo a estabilizar en cada tramo:

$$V = L * A * E$$

Dónde:

V = el volumen del suelo a estabilizar (m³)

L = la longitud del tramo (m)

A = el ancho de la franja (m)

E = el espesor de la capa (m)

Conocido el volumen de suelo lo multiplicamos por el porcentaje de polvo de ladrillo y obtenemos el volumen total de polvo de ladrillo. Conocida la cantidad de fundas de polvo de ladrillo a usar el área sobre la que se va a distribuir entonces podemos hacer la distribución, colocando las fundas equidistantes una de otra. Luego se esparce el polvo de ladrillo de forma uniforme y se procede a mezclar.

Mezclado Uniforme de la mezcla suelo-polvo de ladrillo

La mezcla deberá ser homogénea y para lograrlo se debe pasar varias veces el escarificador hasta la profundidad deseada, también se usarán discos rotatorios de arado hasta que se determine un mezclado total.

Hay dos tipos de mezcla: Mezcla en Seco y Mezcla Húmeda. La Mezcla Seca consiste en una vez distribuido el polvo de ladrillo se procede a mezclarlo con el suelo hasta lograr la homogeneidad requerida. La Mezcla Húmeda es la más usada y es en la que a la mezcla se le adiciona agua.

Adición del Agua a la mezcla suelo-polvo de ladrillo

El agua es un elemento esencial en la compactación, de modo que para lograr mantener la humedad óptima de compactación a la mezcla se agregará un 3% de agua adicional al porcentaje óptimo obtenido en laboratorio para éste tipo de suelo.

La distribución del agua debe ser uniforme en toda la extensión de la zona cuidándose de que no quede depositada en huecos. Después de esto, se hará una pasada de las herramientas o máquinas de que se disponga para que la mezcla quede removida hasta lograr que sea homogénea comprobándose el contenido de agua para que por defecto o por exceso no difiera de la humedad óptima en más del 10%. Tras esta operación, como después de cada una de las operaciones parciales se restituye el perfil a las dimensiones previstas.

Terminado y compactado del material

Por ultimo después de ser depositado, extendido y distribuido uniformemente el material estabilizante ladrillo molido, se procederá a su inmediata compactación, ya sea mediante el pasado de volquetas cargadas o mediante el rodillo compactador, el compactado será ejecutado gradualmente desde los extremos hasta el centro o desde un extremo hacia la capa del material previamente colocada.

En general la compactación de la mezcla del suelo-polvo de ladrillo debe hacerse mediante rodillos lisos vibratorios y aplanadores de tres rodillos o de tanden, cada pasada de la maquinaria pesada será ocupando todo el material a estabilizar hasta que el área completa de la capa haya sido compactada por el rodillo liso vibratorio.

La capa de la mezcla de suelo-polvo de ladrillo de material suelto que se vaya a compactar no debe tener un espesor mayor a 20 cm, en la sub-rasante se compactara hasta alcanzar el 100% de la densidad máxima.

El material no será rodillado cuando se detecten áreas blandas en la capa inmediata inferior o cuando el rodillado cause ondulaciones pronunciadas en la capa de suelo, cuando al pasar el rodillo cause irregularidades o imperfecciones notorias la superficie irregular deberá ser nuevamente escarificada y rellenada con la misma clase de material para luego compactarla con el rodillo compactador hasta conseguir que la superficie sea uniforme.

Para el riego que se hace durante el compactado del suelo será realizado cuidadosamente, evitando que el agua origine deformación en la superficie.

3.10 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PROPUESTA DE APLICACIÓN

Con el fin de realizar la evaluación económica de los costos de la propuesta de aplicación, primeramente se debe conocer los insumos necesarios para la ejecución de la estabilización. Así se debe contar con la información de la mano de obra del personal y la maquinaria que se utilizara para realizar la estabilización del suelo-polvo de ladrillo en su respectivo contenido optimo calculado en ensayos de laboratorio.

Por lo tanto, se calculó de los precios unitarios respectivos que se necesitaran para la estabilización de suelo-polvo de ladrillo en caminos no pavimentados, y estos son los siguientes:

- Ítem nro. 1. Excavación suelo semi-duro con maquinaria, tenemos un costo total de 21,74 bs. El metro cubico (m3)
- Ítem nro. 2. Relleno y compactado suelo natural, tenemos un costo total de 32,77 bs. El metro cubico (m3)
- Ítem nro. 3. Mesclado y compactado suelo-polvo de ladrillo, tenemos un costo total de 213,82 bs. El metro cubico (m3), Esto se debe a que los insumos necesarios tienen un costo considerado, el suelo seleccionado a 50 bs. El m3 y el polvo de ladrillo tiene un

costo de 50 Bs. La bolsa de 50 Kg. Y un metro cubico tiene 1450 Kg, haciendo un costo de 1000 Bs el metro cubico de polvo de ladrillo

VER ANEXOS VI

Para dar valides a nuestra propuesta de aplicación, realizaremos el cálculo del costo para estabilizar un kilómetro de camino con polvo de ladrillo

Datos

Según la norma boliviana de carreteras nos indica que el ancho de una vía no pavimentada es de 6 metro y normalmente se adopta un espesor entre 0.30 a 0.40 metros

Longitud = 1000 metros

Ancho = 6 metros

Espesor = 0.30 metros

Tenemos un volumen de:

$$V = L * A * E$$

$$V = 1000 * 6 * 0.30$$

$$V = 1800 m^3$$

Ahora calculamos el costo en un Kilómetro de sub-rasante de camino no pavimentado

Datos:

Volumen en metros cúbicos = $1800 m^3$

Costo de la estabilización en un metro cubico = 268,33 bs

Entonces el costo de estabilización con suelo-polvo de ladrillo al contenido óptimo de polvo de ladrillo que es al 10%, en un kilómetro de longitud nos da el siguiente valor:

$$\text{Costo} = 1800 * 268,33 = 482994 \text{ bs}$$

Esto nos indica que si construimos un camino de 20 kilómetros el costo será de 9659880 bs.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Con las técnicas de ensayo de C.B.R., nos demostró que el polvo de ladrillo es un material relativamente resistente, aumentando en cada porcentaje hasta el 10 % de polvo de ladrillo, el cual nos da el valor máximo de CBR de 10.04%, y esto nos indica que es el contenido óptimo del suelo-polvo de ladrillo y luego se reduce la resistencia, y que puede aplicarse como una alternativa de solución en la estabilización de subrasantes para caminos no pavimentados.
- La estabilidad volumétrica se modifica aumentando los porcentajes de polvo de ladrillo, de modo que disminuya la capacidad de expansión del material, como vemos en el cuadro anterior existe más expansión en el suelo puro 1.1 % y a medida que se aumentan los porcentajes de polvo de ladrillo, la expansión va disminuyendo relativamente, a 18 % de polvo de ladrillo la expansión es de 0.40 %, mientras más se aumenta polvo de ladrillo menos expansión.
- En cuanto a la densidad máxima, una vez realizado la compactación proctor modificado (T-180), de las diferentes mezclas de suelo-polvo de ladrillo aumenta la densidad en cada porcentaje hasta el 10 % de polvo de ladrillo, el cual nos indica la densidad máxima 1.90 gr/cm³ de nuestro proyecto de investigación luego se reduce la densidad máxima si aplicamos más porcentaje de polvo de ladrillo.
- La plasticidad del suelo está relacionada con la técnica de ensayo de límites de Atterberg, después de realizar los ensayos nos muestra que el polvo de ladrillo es un material no plástico, ya que en el suelo puro nos dio un índice de plasticidad de 6.3, y a medida que se aumentaron los porcentajes de polvo de ladrillo, el índice de plasticidad de las mezclas fue reduciendo considerablemente, en el caso de 18 % de polvo de ladrillo nos dio un índice de plasticidad de 2.3.

- Se realizó la caracterización de las diferentes mezclas de suelo-polvo de ladrillo, donde nos dio la siguiente clasificación de suelos, el suelo puro y 4% de polvo de ladrillo nos dio en el sistema AASHTO un suelo A-4 (8) y el SUCS (CL-ML), lo que nos determina arcilla limosa con arena, y los porcentajes de 7, 10, 14 y 18% de polvo de ladrillo nos dio en el sistema AASHTO un suelo A-4 (7) y el SUCS (ML), lo que nos determina limo de baja plasticidad con arena.
- Se determinó el porcentaje de material fino que pasa el tamiz número 200, mediante el ensayo del hidrómetro, lo cual nos dio lo siguiente, En suelo puro 25,73% de arcilla y 74,27% de limo, y a medida que aumentamos el porcentaje de polvo de ladrillo, también aumenta el valor del limo y reduce el valor de las arcillas, como vemos al 10% de polvo de ladrillo 88.8% limo y 11.2% arcillas
- En cuanto a la hipótesis planteada en nuestro proyecto de investigación, después de realizar el estudio nos determina que es verdadera, por lo tanto, si se aplica al suelo una cantidad de polvo de ladrillo para modificar las propiedades del suelo de dicha mezcla, entonces se podrá evaluar el Comportamiento físico-mecánico del suelo con polvo de ladrillo, para validar la estabilización de esta técnica de estabilización de sub-rasantes en caminos no pavimentados en nuestro medio.
- Para dar validez a nuestro proyecto de investigación, el cual es Evaluación del polvo de ladrillo como estabilizante de suelo en caminos no pavimentados, realizamos una propuesta de aplicación de estabilización del suelo-polvo de ladrillo a su contenido óptimo que es el 10% de polvo de ladrillo y 90% de suelo, que se indica a continuación:

Cuadro 24. Resultados del contenido óptimo de polvo de ladrillo

Ensayos	Valores
Dens. Max.	1,9
CBR 100 %	12,9
CBR 95 %	10,04
Exp. %	0,6
Suelo-ladrillo	90-10

Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar en los resultados de la mezcla suelo-polvo de ladrillo a su contenido óptimo se obtuvo un buen resultado desde el punto de vista de la ingeniería, donde tenemos un C.B.R = 10.0 % y una expansión de 0.6 %, este es un valor que cumple con las condiciones para la sub-rasante por ser mayor al rango mínimo de C.B.R. (3 - 9) %, requerido para la aplicación de los caminos no pavimentados y una expansión menor al 2 %.

- Para este tipo de estabilización de suelo con polvo de ladrillo se tuvo que elegir un suelo fino como se indica en nuestra hipótesis planteada en el capítulo I, ya que si estabilizamos el polvo de ladrillo en un suelo granular que no sea fino, entonces el polvo de ladrillo no tendrá ningún efecto, también se tuvo en cuenta los caminos no pavimentados en el área rural donde la mayor parte son caminos deficientes con malas propiedades, es decir contienen suelo fino, y en estos se podrá realizar la estabilización del suelo con polvo de ladrillo, ya que si es granular no se realizara la estabilización con polvo de ladrillo ya que tendrá mejores propiedades.

- Para realizar la estabilización del suelo con polvo de ladrillo, se utilizara cualquier tipo de ladrillo, ya que para ser estabilizado deberá pasar por un proceso de molienda el cual se vuelve polvo de ladrillo apto para ejecutar dicha estabilización del suelo.

4.2 RECOMENDACIONES

Se realizara las recomendaciones pertinentes del proyecto de investigación, estas se detallan a continuación:

- Se recomienda utilizar el 10% de polvo de ladrillo en la estabilización de suelo-polvo de ladrillo en la estabilización de sub-rasante de caminos no pavimentados, ya que este es el contenido óptimo de polvo de ladrillo y no se debe pasar del 10% ya que se incrementara el costo del material estabilizante en la construcción de caminos.
- El polvo de ladrillo debe ser lo más homogéneo posible, que tenga una buena molienda y que pueda quedar un material fino, para una mejor manipulación del material, se recomienda utilizar ladrillo macizo o gambote, porque tiene mejores propiedades que el ladrillo con huecos.
- En cuanto a la cantidad de agua a utilizar en la estabilización del suelo-polvo de ladrillo, se recomienda utilizar lo necesario o la humedad optima encontrada en laboratorio, ya que si aumentamos o reducimos mucho este se hace más difícil manipular el material en la estabilización del suelo-polvo de ladrillo
- Se recomienda utilizar ladrillo reciclado o ladrillos que no tengan mucho valor económico, para evitar mayores costos en la estabilización del suelo con polvo de ladrillo, ya que el aspecto económico es muy importante en las obras viales.
- Para este tipo de estabilización física, se deben hacer pruebas de campo para determinar las características del suelo existente en el lugar y de todos los materiales que se va

adicionar en la estabilización del suelo, luego de deben tomar muestras para hacer pruebas de laboratorio para analizar las propiedades mecánicas de los suelos estabilizados.

- Se debe realizar una buena compactación con el equipo necesario para que llegue al 90 % de la densidad máxima realizada en laboratorio, ya que un suelo suelto tiene mayor volumen de vacíos y es menos estable, produciéndose en su entorno menos resistencia y mayor permeabilidad.