

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

En Bolivia siempre está a la búsqueda de opciones que permitan de la mejor manera de estabilizar los suelos mejorando sus propiedades físicas – mecánicas. Como existen suelos expansivos diversos no uniformes pueden ocasionar asentamientos y daños de estructuras.

La estabilización de un suelo con aserrín metálico y suelo cemento portland 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.

Como en algunos suelos se presentan arcillosos que tiene una capacidad baja de soporte y deficiente calidad debido a su naturaleza y no cumplen con sus exigencias en normativas pero con esta investigación se pretende la mejora de suelos mediante diversas técnicas de estabilización con el uso del aserrín metálico y el cemento portland que pueden ser útiles para estabilizar el suelo arcilloso con ensayos de laboratorios.

Con este trabajo se pretende, siguiendo las normas, especificaciones y procedimiento adecuados para su validación, analizar el comportamiento mecánico de suelos arcillosos estabilizados con aserrín metálico y cemento portland, en base a diferentes ensayos de compactación Proctor modificado y el valor relativo de soporte california C.B.R, obteniendo diversos valores de humedad óptima, densidad seca máxima, resistencia atreves del C.B.R y la expansión de las diferentes mezclas de suelo-aserrín metálico - cemento portland 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 trabajo de investigación brindara un aporte practico, teórico y además de

relevancia social, este trabajo usa la teoría de estabilizaciones de suelos, subrasantes, caminos no pavimentados y las diferentes normas AASHTO, ASTM y manuales técnicos de la ABC.

El aporte práctico consiste en la ejecución de varios ensayos de contenido de humedad, granulometría, límites de atterberg, clasificación, compactación Proctor modificado y el valor relativo de soporte de california C.B.R. al suelo – aserrín metálico y suelo – cemento portland.

Este análisis comparativo se refiere a una evaluación de propiedades como la humedad, plasticidad, compactación, resistencia C.B.R, en forma estadística mezclando aserrín metálico y cemento portland en suelos arcillosos. Analizando detalladamente las ventajas y desventajas de la utilización de estos dos materiales para así mejorar sus propiedades físicas-mecánicas.

1.2. Justificación

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

Con esta situación que genera estos residuos y los malos caminos que existen en nuestro medio que trae consecuencia y problemas a la sociedad misma. Por eso es que se busca realizar un análisis del comportamiento de estos dos materiales como es el caso del aserrín metálico y el cemento portland como estabilizante de suelo en caminos no pavimentados, nos podrá valorar el comportamiento de las propiedades físicas y mecánicas de los suelos en subrasantes de los caminos no pavimentados.

Una vez conocido el comportamiento de la mezcla suelo-aserrín metálico y suelo-cemento portland, se podrá elaborar una alternativa en suelo subrasantes de caminos no pavimentados, conocer el porcentaje óptimo de aserrín metálico y de cemento portland que se encuentre en el laboratorio en diferentes porcentajes (0, 4, 8, 12, 16 y 20 %) estos porcentajes se justifican mediante normas, libros y bibliografías realizadas y trabajadas por otros autores, tesis mediante tablas que nos ayudan a guiarnos con los valores

obtenidos mediante ensayos de clasificación de suelos, densidad máxima y expansión de dichos materiales que garantiza que esta investigación sea buena además para poder realizar una propuesta de aplicación con el porcentaje óptimo, finalmente este trabajo de investigación tiene mucha relevancia social, puesto que se pretende utilizar estos valores para realizar estabilizaciones de suelo aserrín metálico y suelo cemento portland, sobre todo en obras viales

También esta investigación se fundamenta en la importancia de conocer y evaluar las ventajas técnicas de la estabilización de suelos con cemento portland, que viene a ser una alternativa de mejoramiento más usadas en los suelos de baja calidad, tales como los suelos arcillosos que puedan conformar una subrasante y que generan problemas en la estructura de un pavimento que se construya sobre ellos.

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.

Dicha alternativa corresponde el empleo de dos materiales como anteriormente mencionados como es el caso del aserrín metálico proveniente de las torneras, talleres o trabajos que manejan metales y cemento portland que se encuentran en dichas fábricas o comercios que buscan determinar el grado de impacto que tendrá en la sociedad aplicando estos dos materiales en el empleo de la estabilización a suelos arcillosos, dando a si un aporte técnico a la ingeniería como los aspectos económicos y ambiental.

1.3. Planteamiento del problema

1.3.1. Situación problemática

Actualmente en nuestro medio no se cuenta con un manejo adecuado de los residuos industriales tales como los desechos metálicos (aserrín, viruta y polvo metálico), el mal manejo de estos residuos genera riesgos directos e indirectos sobre la salud humana y el medio ambiente, por lo cual este se convierte en un inconveniente para la sociedad como la contaminación al agua y del aire que han sido relacionados con el almacenamiento, recogida y evacuación de estos residuos.

A pesar de que los desechos sólidos de metales siempre se han generado en el mundo, el problema tiende a empeorar debido al desmedido aumento de la producción y consumo de metales.

Por tanto, deberá plantarse un mejor manejo de estos residuos industriales mediante su reducción, reciclaje, reusó, reprocesamiento, transformación y utilidad, lo cual se debe convertirse en una prioridad para nuestra sociedad.

En cuanto al cemento es un tipo de estabilización común mediante el empleo del cemento portland como aditivo estabilizador. La estabilización con cemento se ha aplicado en distintas partes del mundo y desde hace un buen tiempo atrás. En la actualidad se cuenta con equipo estabilizadores, recicladores adecuados de grandes potencias y rendimiento que facilitan el trabajo en campo y garantiza la calidad del mezclado y colocación.

Finalmente sería importante evaluar las ventajas técnicas de estabilización de suelos arcillosos con aserrín metálico y cemento portland para poder aplicarlo en nuestro medio y así se logre mejorar las propiedades físicas y mecánicas de los suelos de baja calidad.

Pues no está demás experimentar las posibles mezclas de suelo-cemento portland y aserrín metálico para realizar la investigación del proyecto de “ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS COMBINADOS CON ASERRÍN METÁLICO Y CEMENTO PORTLAND” para buscar mejores propiedades físicas y mecánicas de suelos arcillosos en nuestro medio.

1.3.2. Problema

¿Cuál es la influencia del aserrín metálico y cemento portland en la estabilización a suelo arcilloso de la subrasante del barrio Jesús de Nazareth, departamento de Tarija provincia cercado?

1.4. Objetivos

Los objetivos planteados para la siguiente investigación se dividen en dos partes.

1.4.1. Objetivo General

Analizar la estabilización a suelos arcilloso mediante la adición de dos aditivos con aserrín metálico y cemento portland para establecer las mejoras en las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso.

1.4.2. Objetivos específicos

- Identificar los lugares donde tenga suelo arcilloso, apto para la realización de los ensayos de laboratorio.
- Identificar el lugar donde se pueda obtener el aserrín metálico y cemento portland para utilizar en la estabilización del suelo en estudio.
- Caracterizar el suelo natural, suelo+aserrín metálico y suelo+cemento portland.
- Determinar la capacidad de soporte (CBR) de cada suelo arcilloso con adición de 4%, 8%, 12% ,16% y 20% de aserrín metálico.
- Determinar la capacidad de soporte (CBR) de cada suelo arcilloso con adición de 4%, 8%, 12% ,16% y 20% de cemento portland.
- Obtener el porcentaje óptimo adecuado de aserrín metálico y cemento portland que necesita el suelo para mejorar la capacidad de soporte.
- Analizar cómo el aserrín metálico influye en las propiedades del suelo.
- Analizar cómo el cemento portland influye en las propiedades del suelo.
- Comparar los resultados de la estabilización entre el suelo+aserrín metálico y suelo+cemento portland aplicando a suelos arcillosos.

1.5. Hipótesis

La estabilización de suelos arcillosos mediante la utilización de aserrín metálico y cemento portland permitirán mejorar las propiedades físicas – mecánicas.

1.6. Variable de la hipótesis

1.6.1. Variable independiente

Estabilización del suelo con aserrín metálico y cemento portland.

1.6.2. Variable dependiente

Propiedades físicas – mecánicas de suelos arcillosos.

1.7. Operacionalización de variables

La Operacionalización de las variables se conforma por independientes y dependientes, que se presentaran a continuación.

Las tablas de variables independiente y dependiente.

1.7.1. Variable independiente

Tabla N° 1. Operacionalización de la variable independiente

Variable Independiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor o acción
Estabilización de suelos	Procuran brindar una mejora al suelo fundamentalmente el aumento de su capacidad de soporte y una disminución en su sensibilidad frente al agua y otras condiciones medio ambientales desfavorables	Aserrín Metálico	propiedades del aserrín metálico	como influyen en las propiedades el aserrín metálico aplicando a los suelos arcillosos
			cantidad del aserrín metálico	Cuál será la dosis correcta para mejorar un suelo arcilloso con aserrín metálico
		Cemento portland	Cantidad de cemento portland	Qué porcentaje de cemento será adecuado para brindar una adecuada estabilización

Fuente: Elaboración propia

1.7.2. Variable dependiente

Tabla N° 2. Operacionalización de la variable dependiente

Variable Dependiente	Conceptualización	Dimensión	Indicador	Valor o acción
Características físicas	Las propiedades que presentan los suelos se debe a los agentes que lo modifican diferenciando los unos de otro	Propiedades físicas de un suelo arcilloso	Color	Qué clase de arcilla es más propensa a ser estabilizada
			Textura	Cambiará la textura de la arcilla al ser estabilizados
Características mecánicas	Las propiedades mecánicas que presenta un suelo suelen referirse al comportamiento de este ante diversos agentes tales como la resistencia, permeabilidad entre otros	Propiedades mecánicas de un suelo arcillo	Capacidad portante C.B.R	Como influye una estabilización en la capacidad portante de una arcilla
			Límites de plasticidad	Qué tipo de estabilización afectara la plasticidad de una arcilla

Fuente: Elaboración propia

1.8. Diseño metodológico

1.8.1. Unidad de estudio

Se realizara estudios de los suelos como material para ser usado como una subrasante para una vía, examinando las características propias y alternativas para el mejoramiento de la misma mediante ensayos que se ejecutarán en el laboratorio, como ensayos de granulometría, consistencia, compactación, con el propósito de determinar un incremento de la capacidad portante de los suelos ya que despliega el análisis real de una subrasante in-situ, y las características de una ya mejorada con adición de aserrín metálico y cemento portland intentando mejorar las propiedades físico y mecánico. Este estudio se realizará en la ciudad de Tarija Barrio Jesús de Nazaret provincia Cercado.

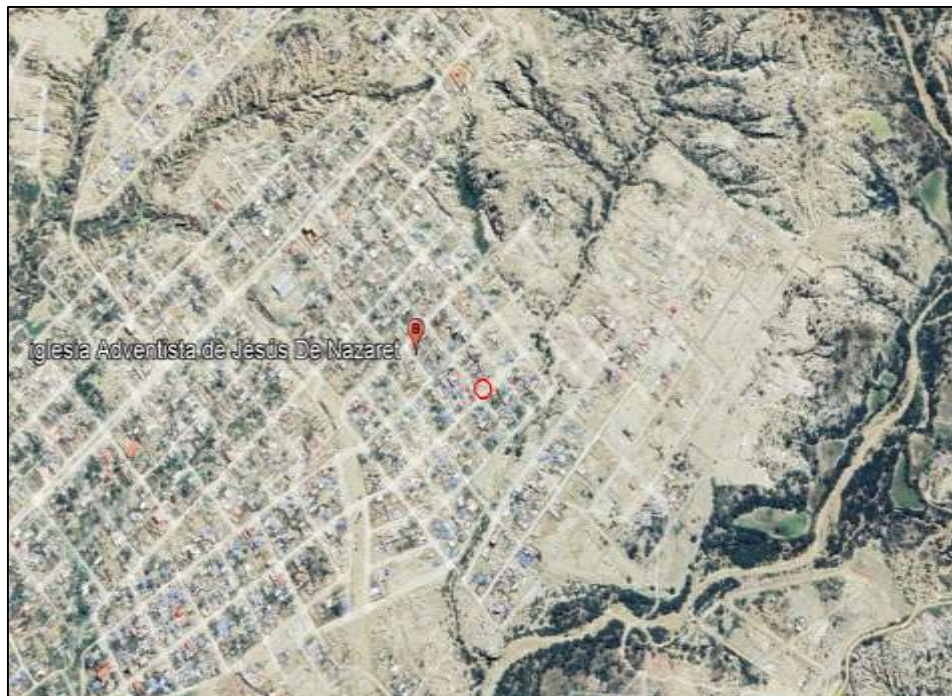
Con coordenadas:

Tabla N° 3. Coordenadas de la unidad de estudio

21° 31` 30,81 ``	Sur
64° 41` 37,46``	Oeste

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 1. Localización de la unidad de estudio



Fuente: Elaboración propia

1.8.2. Población

El proyecto de investigación, consta de dos suelos arcillosos uno es de baja plasticidad y otro de alta plasticidad para nuestro estudio experimental, obtenido del Barrio Jesús de Nazaret en el Departamento de Tarija provincia Cercado.

Con coordenadas:

Tabla N° 4. Coordenadas de la población

21° 31' 32,81''	Sur
64° 41' 37,46''	Oeste

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 2. Localización de la población de la muestra de arcilla



Fuente: Elaboración propia

1.8.3. Muestra

Para el desarrollo del proyecto de la investigación, se hizo dos calicatas de diferentes suelos arcillosos una es de baja y la otra de alta plasticidad, para determinar los ensayos y como muestra la imagen se ubica en el departamento de Tarija provincia Cercado Barrio Jesús de Nazaret con las coordenadas mencionadas.

Gráfico N° 3. Sacado de muestra de arcilla de baja plasticidad



Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 5. Cantidad de muestra a utilizar para cada ensayo

Suelo arcilloso de baja plasticidad			
Muestra (Gr)	Descripción	Numero de ensayos	Total, en Kg
2000	Granulometría	1	2
200	Plasticidad	20	4
10000	Compactación	15	150
15000	C.B.R.	15	225
Total, de la muestra			381

Fuente: Elaboración propia

En sí no solo abasteció una calicata para todos los ensayos realizados para el suelo arcilloso de baja plasticidad, así que se hizo por lo menos 2 a 3 calicatas estas están ubicadas en el mismo lugar solo a una distancia menor a 30 cm. Para así evitar que salgan resultados diferentes a la calicata principal.

Gráfico N° 4. Sacado de muestra de arcilla de alta plasticidad



Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 6. Cantidad de muestra a utilizar para cada ensayo

Suelo arcilloso de alta plasticidad			
Muestra (Gr)	Descripción	Numero de ensayos	Total, en Kg
2000	Granulometría	1	2
200	Plasticidad	3	1
10000	Compactación	3	30
15000	C.B.R.	3	45
Total, de la muestra			78

Fuente: Elaboración propia

Para el suelo arcilloso de alta plasticidad, se hizo una calicata por que se trabajara con el porcentaje óptimo de los ensayos realizados de la arcilla de baja plasticidad.

1.8.4. Muestreo

La técnica es por conveniencia, por lo tanto, es un muestreo no probalístico y no aleatorio.

Es decir, lugares que no fueron pavimentadas todavía por que no tiene paquete estructural.

Gráfico N° 5. Detalle del punto de muestreo



Fuente: Elaboración Propia

Para evitar que las personas se molestan por remover la tierra de una calle transitada debido a esos problemas se extrajo de un terreno baldío con el debido permiso del dueño.

1.8.5. Métodos y técnicas empleadas para la recolección de información

Tabla N° 7. Técnicas y Métodos para la recolección de la información

Técnicas y métodos para la recolección	
¿Para qué?	Para determinar si la estabilización de suelos arcillosos mejora sus propiedades físicos-mecánicos adicionando cemento portland y aserrín metálico.
¿A quiénes?	A varios ensayos realizados en la muestra de suelos tomados (arcillosos)
¿Sobre qué aspectos?	• Densidad máxima y Humedades optimas del suelo arcilloso, mezcla de suelo-cemento y aserrín metálico. • Límites de Plasticidad del suelo arcilloso, mezcla de suelo-cemento y aserrín metálico. • C.B.R. de suelo arcilloso y las mezclas suelo-cemento y aserrín metálico.
¿Quién?	Maykol Roger Laura Caro
¿Dónde?	Laboratorios de mecánicas de suelo de la facultad de ingeniería civil de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho
¿Cómo?	Mediante pruebas y ensayos de laboratorio

¿Técnicas de Recolección?	• Mediante especificaciones y normas apropiadas para nuestro país como la AASHTO, ASTM • Resultados por medios de ensayos de laboratorio • Técnica de observación directa permite la recolección de datos
Instrumentos	Fichas definidas de recolección de datos
Validez	Dar validez a todos los ensayos realizados para la investigación que estén bien calibrados los equipos
Confiabilidad	Se trabajo con una confiabilidad del 95% en resultados coherentes y consistentes
Procedimiento	-Obtención y análisis de datos (ensayos diversos y tratamientos de datos) • Recolección de datos por medio de calicatas. • Posteriormente se efectuó los ensayos de laboratorio • Resultados (Conclusiones)

Fuente :Elaboración propia

1.8.6. Procesamiento para el análisis y la interpretación de la información

El procesamiento de los datos de estudio con respecto a la influencia que genera el cemento portland y el aserrín metálico se realizó mediante hojas de cálculo lo cual se utilizó la herramienta Office: Microsoft Excel, cuyos formatos contienen la información adecuada para cada uno de los ensayos realizados en la presente investigación. El análisis obtenido de los resultados de laboratorio se presentó a través de gráficos de barra o histogramas, gráficos de líneas y gráficos de dispersión, también con la ayuda de Office se pudo obtener los indicadores de la presente investigación.

1.8.7. Plan de procesamiento de información

- Información de la obtención del material a utilizar.
- Determinar la cantidad suficiente de muestras para realizar los ensayos.

- Mediante tablas y cuadros recoger la información de ensayos y procesar los cálculos para la determinación de resultados.

1.8.8. Plan de análisis e interpretación de resultados

- De acuerdo con los objetivos específicos y la hipótesis analizar e interpretar los resultados obtenidos.
- Evaluación de la hipótesis con respecto a los resultados obtenidos durante la investigación.

1.9. Alcance de la investigación

El presente trabajo tiene por finalidad realizar un análisis comparativo del aserrín metálico y cemento portland como estabilizantes de suelos arcillosos, 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 identificar y evaluar el comportamiento del suelo - aserrín metálico y suelo – cemento portland hay que basarse en técnicas que nos facilitan las posibles soluciones a llegar, en el ámbito de la ingeniería, ahora pues, con tal motivo se comprobara en laboratorio su comportamiento con las diferentes mezclas.

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 solicitudes en nuestro medio.

El alcance de la presente investigación va de acuerdo a la disponibilidad de los equipos o instrumentos del laboratorio en especial el C.B.R. de la “Universidad Autónoma Juan Misael Saracho”.

Se procede a realizar el estudio de los suelos arcillosos que se pretende identificar suelos de alta y baja plasticidad del Barrio Jesús de Nazaret para así obtener los valores de

diferentes ensayos y con la mezcla de aditivos como ser (aserrín metálico y cemento portland) en laboratorio que permita determinar la estabilización que existe entre ambos aditivos.

Posteriormente se realiza el desarrollo de la investigación realizando los siguientes pasos.

- Recolección de la muestra arcillosa encontrada en el Barrio Jesús de Nazaret que sea de baja y alta plasticidad extraer bastante para los diferentes ensayos porque solo se estudiara solo dos puntos.
- La recolección del aserrín metálico en talleres que trabajen con metal.
- El cemento en fábricas o comercios para poder adquirir ese material

Posteriormente se lleva a cabo las dosificaciones de la arcilla para realizar los ensayos y preparación de los diferentes especímenes en seguida se realiza los ensayos de laboratorio.

Posteriormente los ensayos de laboratorio

- Contenido de humedad
- Peso específico
- Granulometría
- Límites de Atterberg
- Compactación
- C.B.R.

Se obtiene los resultados necesarios para conseguir los objetivos planteados, tanto del análisis del suelo tanto estabilizado con aserrín metálico y con cemento portland.

Además, se hace una evaluación de los resultados obtenidos y se plantea la propuesta definitiva a ellos.

Con los resultados obtenido de los ensayos ya mencionados se hace un análisis comparativo de cada ensayo para ver si hay una mejora en las propiedades del suelo.

Finalmente se describen las conclusiones y recomendaciones, obtenidas del análisis del presente trabajo

CAPÍTULO II
CONSIDERACIONES
GENERALES DE
LA ESTABILIZACIÓN

CAPÍTULO II

CONSIDERACIONES GENERALES DE LA ESTABILIZACIÓN

2.1. Antecedentes

David Flores Chávez (2023), desarrolló un estudio sobre estabilización de suelos arcillosos con hidróxido de calcio y cemento de la comunidad de cañón oculto Yacuiba. La investigación se aplicó sobre suelos arcillosos de alta y baja plasticidad donde se utilizó una dosificación de 3, 5 y 7% de hidróxido de calcio y una dosificación de 10, 13 y 16% de cemento como estabilizantes, se definió que el hidróxido de calcio disminuye el índice de plasticidad, mientras que el cemento aumenta sustancialmente el CBR del suelo.

En Bolivia actualmente no se construyó ninguna carretera con el aditivo aserrín metálico y también no se encontraron investigaciones sobre estabilización de suelos arcillosos con aserrín metálico. Sin embargo en este proyecto se comparó el uso del cemento portland y en combinación con el aditivo aserrín metálico para mejorar las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Los resultados indicaron que el aditivo proporciona un incremento leve de C.B.R. en comparación con el cemento.

César Segura (2015). Desarrolló un estudio sobre estabilización de suelos arcillosos con cemento portland de la comunidad de Lambayeque. La investigación se aplicó sobre suelos arcillosos de alta plasticidad donde se utilizó cemento como agente estabilizador, con adiciones de diferentes proporciones del 7%, 10%, 13%, 16%, 19% y 22%, para así establecer diferentes resistencias y poder comparar con el suelo natural.

Cynthia Elizabeth Tirado Gutiérrez (2019). Desarrolló análisis comparativo del uso de la escoria de siderurgia metálica para la estabilización del suelo en Ambato-Peru. Este estudio se realizó con la combinación suelo más tres porcentajes 10, 15 y 35%, dando como alternativa idónea para mejorar las propiedades del suelo.

2.2. Suelo

Un suelo estabilizado con aserrín y cemento no debe considerarse como un material inerte, pues al momento de adicionarle aserrín metálico, cemento portland 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.

Definiciones de suelos.

Crespo (2004), define el termino suelo como una capa delgada de material sobre la corteza terrestre que proviene de la desintegración y alteración física, química o ambos, de las rocas y de los residuos producto de las actividades de los seres vivos que sobre ella se asientan.

Peck et al. (1983) diferencian los términos de roca y suelo. Indican que roca es un agregado natural de granos minerales unidos por grandes y permanentes fuerzas de cohesión.

Asimismo, destacan que en la práctica, no existe diferencia tan simple entre roca y suelo a unas las rocas más rígidas y fuertes pueden debilitarse al sufrir el proceso de meteorización, y algunos suelos muy endurecidos pueden presentar resistencias comparables a la de una roca meteorizada.

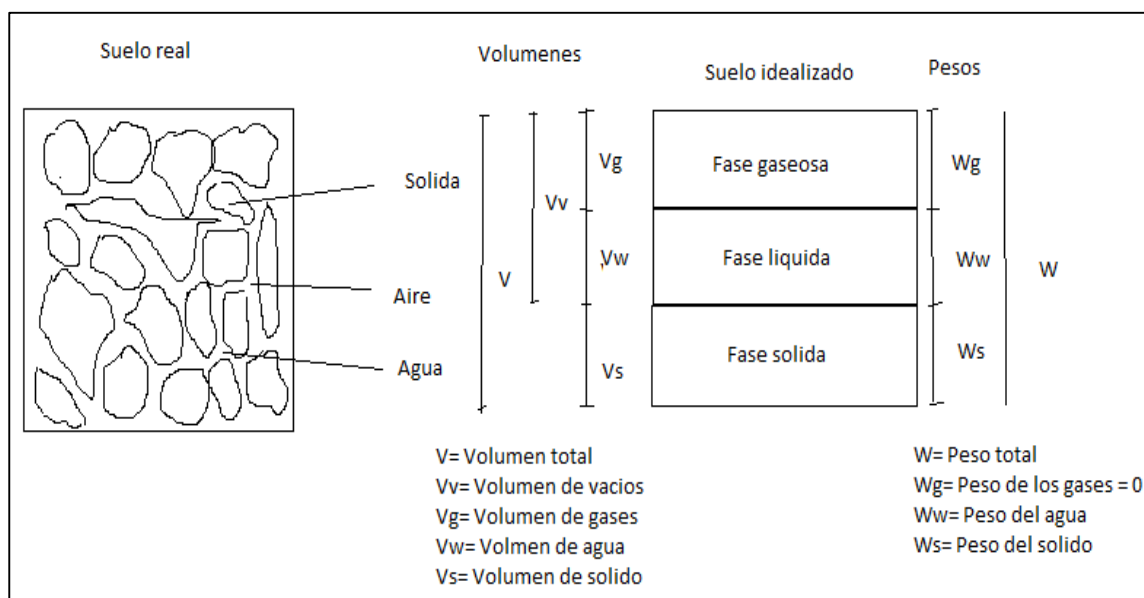
El suelo está formado por partículas sólidas contenida de espacios vacíos que generalmente ocupan el agua y el aire.

El sistema del suelo está compuesto por tres fases que son:

- Fase sólida. Esta Fase está compuesta por agregados orgánicos y minerales. Minerales como la arena, el limo y la arcilla, y orgánicos como residuos vegetales.
- Fase líquida. Esta fase compone el agua y sales disueltas, es decir es la solución del suelo.
- Fase gaseosa. Está formada por compuestos que están en forma gaseosa, CO₂, O₂ y vapor de agua, es decir ocupa los espacios que se encuentran vacíos.

En la siguiente figura podemos observar un sistema idealizado de las fases del suelo:

Gráfico N° 6. Idealización de las fases del suelo y definición de variables



Fuente: Volumétricas y granulométricas en suelos

2.3. Suelo arcilloso

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.

Su peso específico varía entre los límites de 2,60 a 2,75 gramos por centímetro cúbico. Mientras más denso es el suelo es más sólido, por lo tanto, presenta alta resistencia a la erosión.

Su porosidad y humedad tienden a modificarse al incremento de la saturación, un suelo

arcilloso puede pasar del estado sólido al líquido, debido al incremento de agua en su interior y provoca una disminución bruscamente de las fuerzas de cohesión apareciendo una fluidez de sus partículas. Los suelos arcillosos tienen una cohesión alta que va desde 0,25 kilogramos sobre centímetro cuadrado a 1,5 kilogramos sobre centímetro cuadrado, en ocasiones pasan el rango mencionado.

2.4. Propiedades de la arcilla

Los suelos arcillosos suelen comportarse como rocas cuando están en su estado seco, pero cuando están en estado húmedo estos suelen ser plásticos. Estos suelos son elásticos y compresibles. Las arcillas sufren contracciones dependiendo el clima, es decir su volumen varía dependiendo su grado de humedad.

2.4.1. Plasticidad

Las arcillas son plásticas por naturaleza, esta propiedad se da debido a que las partículas de las arcillas son laminares y al momento de que el agua envuelve estas partículas produce un efecto liso que hace que el deslizamiento entre partículas sea sencillo.

2.4.2. Tixotropía

Esta propiedad consiste en que cuando una arcilla es amasada o se ejerce presión en ella, esta se convierte en un líquido, pero luego con el tiempo esta recupera su cohesión y solidez.

2.4.3. Hinchamiento

Se da especialmente en las esmectitas, esto ocurre cuando las láminas de arcilla se separan y es ahí cuando ocurre el hinchamiento, esto es consecuencia de la absorción de agua en el espacio interior de las láminas de la arcilla.

2.4.4. Capacidad de absorción

Las arcillas son absorbentes y son capaces de absorber agua en su espacio entre sus láminas en especial las esmectitas. Se define como la cantidad de absorción de agua con relación a la masa.

2.4.5. 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.

2.4.6. 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: la arcilla en varias horas e incluso días, quedando turbia el agua.

2.4.7. 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 lentamente en arcillas.

2.4.8. 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 2 a 1,5 kilogramo sobre centímetro cuadrado, o más.

2.4.9. 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.

2.4.10. 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 rodar 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 elastoplástica a la fatiga (resistencia a las cargas pulsatorias).

2.5. Teoría de los ensayos que determina las propiedades de los suelos

2.5.1. 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:

$$W(\%) = \frac{Pa}{Pss} \times 100$$

Dónde:

W (%)= Contenido de humedad

Pa = Peso del agua

Pss = Peso del suelo seco

2.5.2. 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.

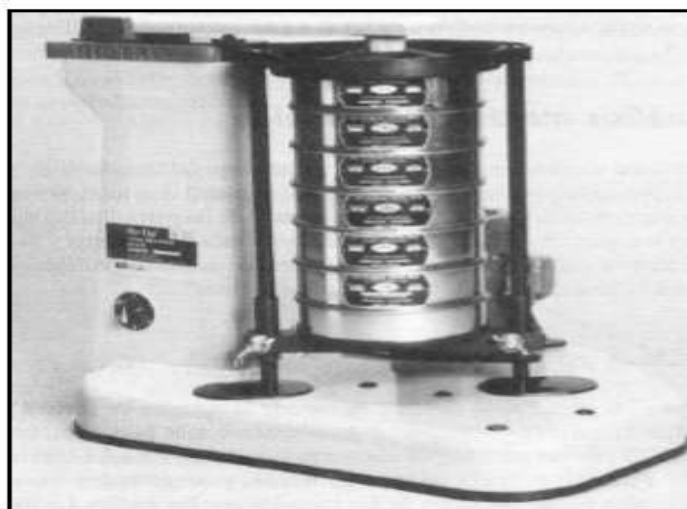
Solamente en suelos gruesos, cuya granulometría puede determinarse por mallas, la distribución por tamaños puede revelar algo de lo referente a las propiedades físicas del

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.

Según el MTC (2014), la finalidad del análisis granulométrico de un suelo es determinar la proporción de sus diferentes elementos constituyentes, clasificados en función del tamaño de sus partículas, a partir de los cuales se definen los términos grava, arena y material fino (limo y arcilla).

Gráfico N° 7. Conjunto de mallas para el análisis mecánico de suelo



Fuente: Braja M. Das

Es la propiedad más característica de un suelo relacionado a los tamaños y proporción de sus partículas en una porción de suelo, por lo cual es necesario realizar el ensayo granulométrico con el fin de conocer y evaluar las características como la: porosidad tomando en consideración una proporción de aire por unidad de volumen y esto influye en la densidad del suelo, la permeabilidad que depende de los tamaños de los huecos ya

que estos determinan la velocidad del agua al moverse por el medio poroso, la resistencia a esfuerzos cortantes que depende del Angulo de rozamiento interno ya que este se refiere a la capacidad de los granos de interaccionar unos con otros, para así resistir esfuerzos cortantes.

Tabla N° 8. Clasificación de un suelo según el tamaño de sus partículas

Tipo de material		Tamaño de las partículas
Grava		75-4,75(mm)
Arena	Arena gruesa	4,75-2(mm)
	Arena media	2-0,425(mm)
	Arena fina	0,425-0,075(mm)
Material fino	Limo	0,075-0,005(mm)
	Arcilla	Menor a 0,005 (mm)

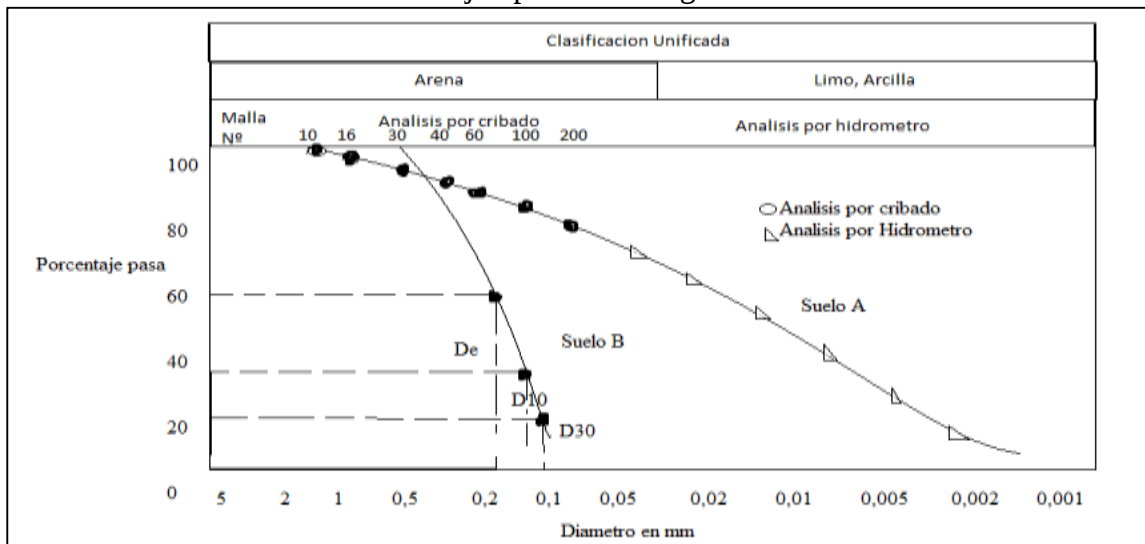
Fuente: MTC 2014:31 Norma ASTM D422 (2016)

La AASHTO en su designación M 145 – 91 define los términos “grava”, “arena” y “limo – arcilla” de la siguiente manera.

- Grava: material que pasa el tamiz con 75 mm (3”) de abertura y es retenido en el tamiz 2 mm (N° 10).
- Arena gruesa: material que pasa el tamiz 2 mm (N° 10) y es retenido en el tamiz 0,425 mm (N° 40).
- Arena fina: material que pasa el tamiz 0,425 mm (N° 40) y es retenido en el tamiz 75 um (N° 200).
- Limo – arcilla (combinado limo y arcilla): material que pasa el tamiz 75 um (N° 200).
- Los cantos rodados y bloques (retenido en el tamiz 75 mm (3’’)), serán excluidos de la porción de la muestra para la cual la clasificación es aplicada, pero el porcentaje de tal material, si lo hay, deberá registrarse.
- Además, se indica que el término “limoso” es aplicado para material fino que tiene un índice de plasticidad de 10 o menos, el termino arcilloso es aplicado para material fino que tiene un índice de plasticidad de 11 o más.

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

Gráfico N° 8. Ejemplo de curva granulométrica.

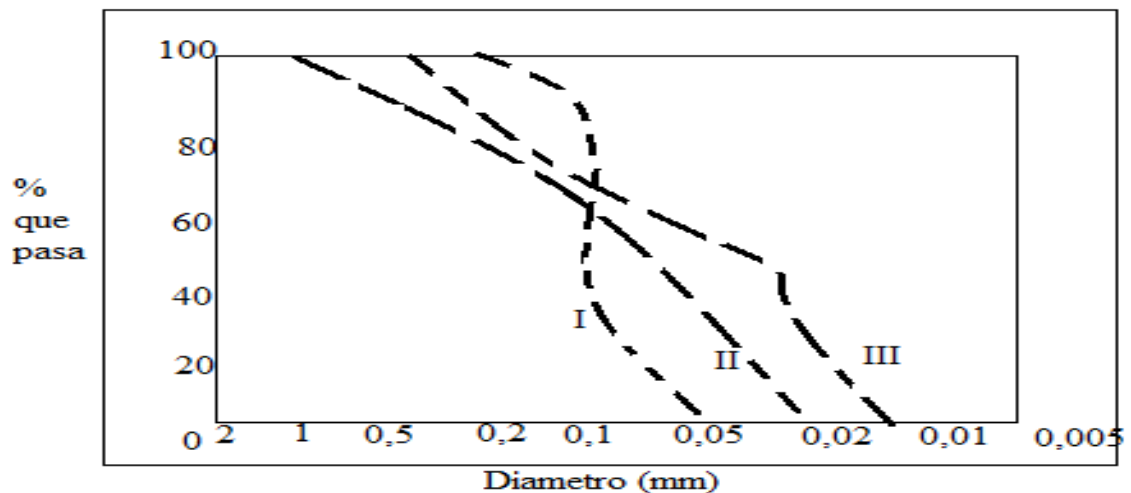


Fuente: Braja M. Das

Los diámetros de las partículas se grafican en escala logarítmica y el porcentaje correspondiente de finos en escala aritmética. También se utilizarán 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.

Gráfico N° 9. Tipos diferentes de curvas granulométricas



Fuente: Braja M. Das

La curva de distribución granulométrica muestra sólo el rango de los tamaños de partículas presentes en un suelo, sino también la distribución de varios tamaños de varios tamaños de partículas.

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.

2.5.3. Límites de Atterberg

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.

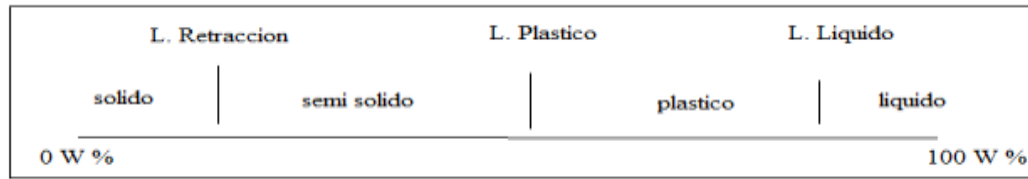
Los límites de Atterberg o también llamados límites de consistencia se basan en el concepto de que los suelos finos, presentes en la naturaleza, pueden encontrarse en diferentes estados, dependiendo de su propia naturaleza y la cantidad de agua que contengan.

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.

Gráfico N° 10. Variación de la plasticidad según el contenido de humedad



Fuente: Braja M. Das

2.5.4. 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 mencionará.

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.

2.5.5. Límite Líquido

El límite líquido se refiere al contenido de humedad que está representada en porcentaje, en el cual un suelo puede estar entre estado líquido y plástico, se lo determina con un ensayo denominado Casagrande.

2.5.6. Límite Plástico

El límite plástico se refiere al contenido de humedad que está representada en porcentaje del suelo seco, en el cual un suelo puede cambiar del estado plástico a un estado semisólido

y de un estado semisólido a sólido. Este límite se considera como el más bajo contenido de humedad.

2.5.7. 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

Tabla N° 9 . Clasificación de un suelo según su índice de plasticidad

Índice de plasticidad	Plasticidad	Características
IP>20	Alta	Suelo muy arcilloso
7<IP<20	Media	Suelo arcillo
IP<7	Baja	Suelo poco arcilloso
IP=0	No plástica	Suelos exentos de arcilla

Fuente: MTC 2014:32 ASTM D4318 (2016)

La PCA (1995) sostiene que los suelos con un alto índice de plasticidad tienen cambios de volúmenes perjudiciales durante procesos de humedecimiento y secado, que pueden conducir posteriormente al deterioro del pavimento. La experiencia ha determinado que los suelos con índice de plasticidad menores que 15 usualmente no causan problemas.

La plasticidad de acuerdo con Crespo (2004), es la propiedad que presenta los suelos de poder deformarse, hasta cierto limite, sin romperse.

Por medio de ella se mide el comportamiento de los suelos en todas las épocas. Las arcillas presentan esta propiedad en grado variable.

Según Sowers, GB y Sowers, GF (1972) la plasticidad se cuantifica por el índice de plasticidad o puede estimarse por la resistencia de una muestra de suelo secado al aire.

Tabla N° 10. Caracterización de la plasticidad de un suelo

Termino usado	IP	Resistencia en estado seco	Ensayos de campo
No plástico	0-3	Muy baja	Cae en pedazos fácilmente
Ligeramente plástico	4-15	Ligera	Se tritura fácilmente en los dedos
Medianamente plástico	15-30	Mediana	Difícil de triturar
Muy plástico	31o mayor	Alta	Imposible de triturar con los dedos

Fuente: Tomado de Sowers, GB y Sowers, GF 1972:11

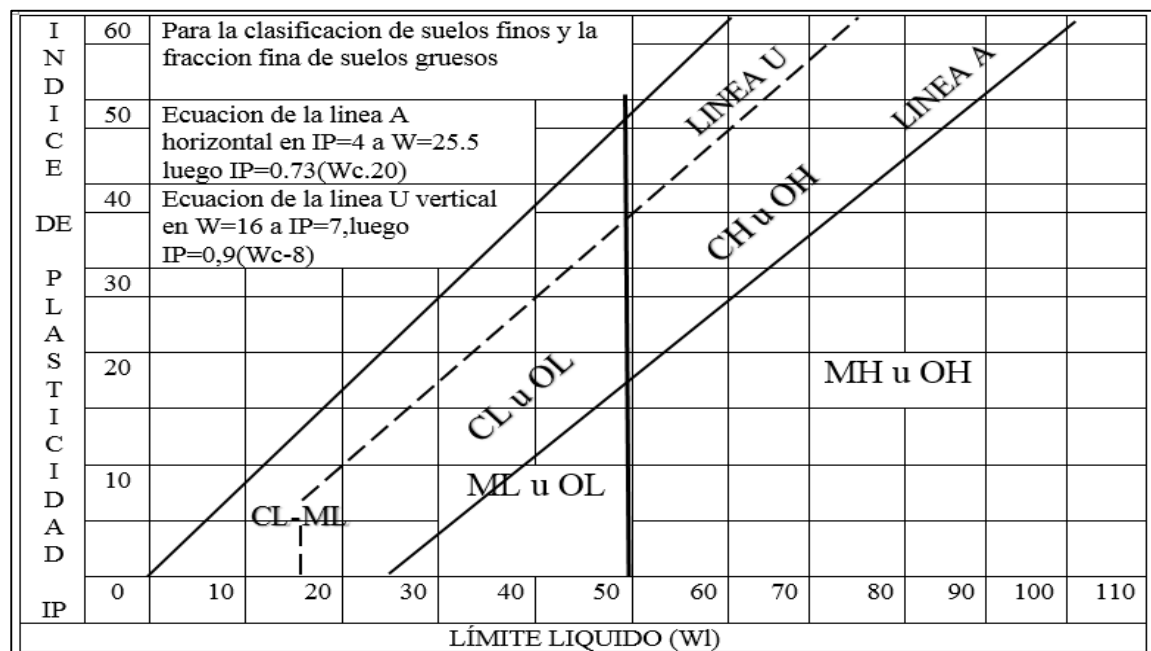
2.5.8. Clasificación del suelo

2.5.9. Clasificación del suelo mediante Sistema Unificados de Clasificación de Suelos (SUCS)

En el SUCS el método para clasificar es muy sencillo. Se comienza a partir del Tamiz N°200, tamiz que los subdivide en dos grandes grupos: suelos gruesos y finos.

Luego en cada grupo se sigue, en el caso de gruesos por el Tamiz N°4 y, en el de los finos, a partir del Límite Líquido.

Gráfico N° 11. Límite de Atterberg (Carta de plasticidad)



Fuente: ASTM D-2487-93

Tabla N° 11. Clasificación de suelos

Divisiones principales					Nombre clásico			
1		2			4			
Suelos de grano grueso Más de la mitad del material es mayor que el t.nº200	El tamaño del tamiz Nº 200 es aproximadamente a la menor partícula visible a simple vista	GRAVA S Más de la mitad de los gruesos es>5mm	Para clasificación visual el tamiz nº4 equivale a 5 mm	Gravas limpias (poco o ningún fino)	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena, poco o ningún fino.			
					Gravas pobremente graduadas, mezclas de grava arena, poco o ningún fino.			
				Gravas con fino (apreciable cantidad)	Gravas limosas, mezclas de grava, arena y limo.			
		ARENA S Más de la mitad de los gruesos es<5 mm		Arenas limpias (poco o ningún fino)	Arenas bien graduadas, arenas con grava, poco o ningún fino			
					Arenas pobremente graduadas arenas con grava, poco o ningún fino.			
				Arenas con finos (apreciable cantidad)	Arenas limosas, mezclas de arena y limo.			
				Arena arcillosas, mezcla de arena y arcilla.				
		Los de grano fino. Más de la mitad del material es menor que el tnº200			Limos y arcilla. Límite líquido menor que 50			Limos orgánicos de baja compresibilidad
								Arcilla inorgánica de baja a media compresibilidad arcilla con grava, arcilla arenosa, arcilla limosa
Limos orgánicos y arcilla limosa orgánicas de baja compresibilidad								
Limos y arcillas. Límite líquido mayor que 50			Limos inorgánico de alta compresibilidad					
			Arcillas inorgánicas de alta compresibilidad					
			Arcilla y limo de media a alta compresibilidad					
Suelos altamente orgánicos					Turba y otros suelos altamente orgánicos			

Fuente: Conanma (2016). Geotecnia

Tabla N° 12. Requerimiento inicial para la estabilización suelo-cemento

Clasificación del suelo	Requerimiento inicial estimado de cemento en porcentaje del peso seco
GW-SW	5
GP, SW-SM, SW-SC-SW-GW	6
GP, SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC-GP-GM, GP, GC, SM-SC.GM, GC	7
SP, CL, ML-CL	10
MH, CH	10
CH	11

Fuente: USACE 1984:3-3

2.5.10. Sistema de clasificación AASHTO

La AASHTO en su designación M 145 – 91 (especificación estándar para clasificación de suelos y mezclas de agregados para propósitos de construcción de carreteras), describe un procedimiento para la clasificación del suelo dentro de siete grupos, basados en la distribución del tamaño de partículas, límite líquido e índice de plasticidad. La evaluación del suelo dentro de cada grupo es hecha por medio del “índice de grupo” el cual es un valor calculado de una fórmula empírica. El grupo de clasificación, incluyendo el índice de grupo deben ser utilizados para evaluar la calidad relativa del material que constituye el suelo para uso en estructuras de trabajos con tierra, terraplenes, subrasantes, subbases y bases.

- Índice de grupo (IG). - El MTC (2014), establece categorías del suelo para subrasante en función del valor de su índice de grupo de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla N° 13. Condición del suelo de subrasante según su índice de grupo

Índice de grupo	Suelo de subrasante
IG mayor que 9	inadecuado
IG esta entre 4 a 9	insuficiente
IG esta entre 2 a 4	regular
IG esta entre 1 a 2	bueno
IG esta entre 0 a 1	Muy bueno

Fuente: MTC 2014

- Descripción de los grupos de clasificación AASHTO.

La AASHTO en su designación M 145 – 91, describe los grupos de clasificación de suelos considerados por la misma:

Materiales de limo y arcilla – contienen más del 35 por ciento de material que pasa el tamiz 75 μm (No. 200).

Grupo A – 7, el material típico de este grupo es similar al que se describe en el grupo A – 6, excepto que este tiene un elevado límite líquido característico del grupo A – 5 y pueden ser elásticos, así como estar sujetos a altos cambios volumétricos.

Subgrupo A – 7 – 5, incluye aquellos materiales con índice de plasticidad moderado en relación al límite líquido, los cuales pueden ser altamente elásticos, así como sujetos a considerables cambios volumétricos.

Subgrupo A – 7 – 6, incluye aquellos materiales con alto índice de plasticidad en relación al límite líquido, los cuales están sujetos a cambios volumétricos extremadamente altos.

Tabla N° 14. Sistema de clasificación AASHTO

Materiales granulares (35% o menos que pasa el tamiz N° 200)							Materiales de limo y arcilla (más del 35% que pasa el tamiz N°200)			
A-1		A-3 Arena fina	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
A-1-a - A-1-b Fragmento de roca, grava y arena			A-2-4---A-2-5---A-2-6---A-2-7 Grava y arena limosas o arcillosas				Suelo limoso			A-7-5 A-7-6
									Suelo arcilloso	
50 máx.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
30 máx.	50 máx.	51 min	-	-	-	-	-	-	-	-
15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min	36 min	36 min	36 mín.
-		-	40 máx.	41 min	40 máx.	41 min	40 máx.	41 min	40 máx.	41 min
6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 min	11 min	10 máx.	10 máx.	11 min	11 min
Excelente a buena							Regular a malo			

Fuente: Norma AASHTO M 145-91:2

Tabla N° 15. Rango de cemento requerido

Calsificación de suelo AASHTO	Rango usual de cemento requerido
A-1-a	3-5
A-1-b	5-8
A-2	5-9
A-3	7-11
A-4	7-12
A-5	8-13
A-6	9-15
A-7	10-16

Fuente: MTC 2014:10

Tabla N° 16. Correlación entre los sistemas de SUCS y AASHTO

Sistema de clasificación AASHTO	Sistema de clasificación SUCS
A-1-a	GW,GP,GM,SW,SP,SM
A-1-b	GM,GP,SM,SP
A-2	GM,GC,SM,SC
A-3	SP
A-4	CL,CH
A-5	ML,MH,CH
A-6	CL,CH
A-7	OH,MH,CH

Fuente: MTC 2014:33

2.5.11. Compactación

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.

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.

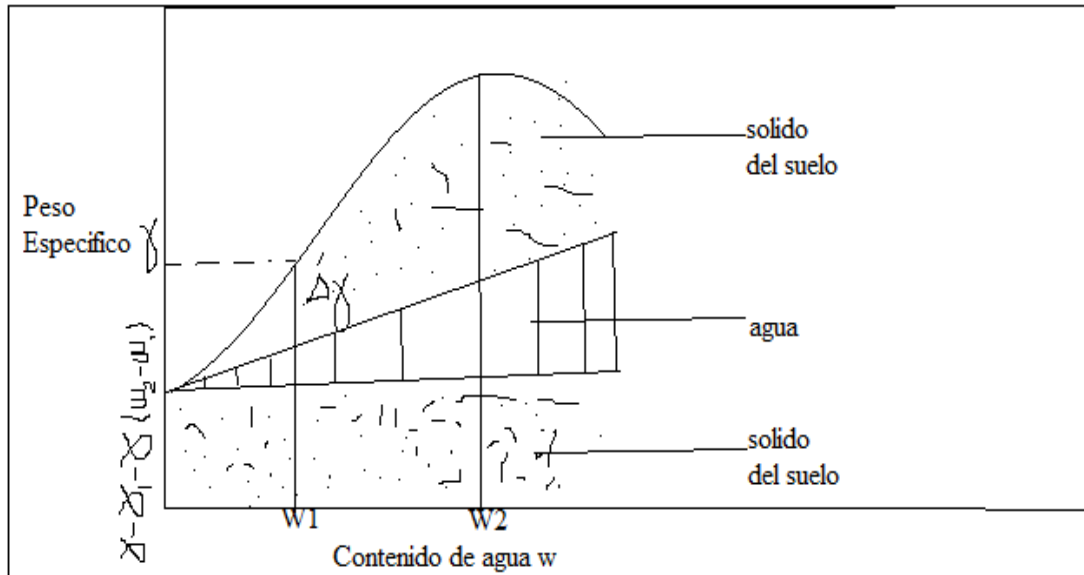
El peso específico seco después de la compactación se incrementa primero conforme aumenta el contenido de agua.

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.

Gráfico N° 12. Principio de la compactación



Fuente: Braja M. Das

Como muestra la gráfica 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 encontrará el punto máximo.

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 reacomodamiento 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.

2.5.12. Finalidad de la compactación

Es aplicar energía al suelo suelto para eliminar espacios vacíos, aumentando así la su densidad, su capacidad de soporte y su estabilidad entre otras.

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 expenderse excesivamente.

2.5.13. 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 encontrará el punto máximo.

2.5.14. 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.

2.5.15. 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 va 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:

2.5.16. 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.

2.5.17. 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.

2.5.18. Capacidad de Soporte de los Suelos

La capacidad de soporte se refiere a la resistencia que presenta a las deformaciones bajo la aplicación de cargas de tránsito. Presentan factores que intervienen en la capacidad de soporte de los suelos como la resistencia al esfuerzo cortante, este depende de la densidad alcanzada y su humedad, los suelos saturados poseen baja capacidad soporte en comparación a suelos no saturados, debido a la relación que a mayor humedad menor capacidad de soporte del suelo.

2.5.19. El Valor Relativo de Soporte (Ensayo C.B.R.)

El CBR de un suelo es la carga unitaria correspondiente a 0.1" o 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

$$P_{uh} = \frac{P_{ms}}{Vol. molde}$$

Dónde:

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

P_{ms} = Peso muestra seca (gr)

- El peso unitario de la muestra seca

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

Dónde:

P_{umh} = 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:

$$\% Exp = \frac{(L_f - L_i)}{h} \times 100$$

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

pulgadas en sus correspondientes cargas calculadas:

Para 0.1" tenemos
$$CBR = \frac{CARGA\left(\frac{Kg}{cm^2}\right)}{70,3\left(\frac{Kg}{cm^2}\right)} \times 100$$

Para 0.2" tenemos
$$CBR = \frac{CARGA\left(\frac{Kg}{cm^2}\right)}{105.5\left(\frac{Kg}{cm^2}\right)} \times 100$$

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 la tabla según el valor de C.B.R

Tabla N° 17. 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. Diseño de pavimento AASHTO-93

2.6. Propiedades físicas del suelo

las partículas minerales que forman el suelo determinan sus propiedades físicas.

2.6.1. Color

El color es una característica del suelo más notoria, esta propiedad es muy útil ya que nos ayuda a poder diferenciar el tipo de suelo de una manera mucho más rápida y en el mayor de los casos muy eficiente.

Es importante conocer que en ocasiones el suelo puede tener otro tipo de tonalidades debido a agentes externos, es decir esta propiedad debe ser utilizada con circunspección.

Cada distinto color de suelo tiene relación con sus propiedades como las siguientes:

Oscuro o negro: Se debe a la existencia de materia orgánica, es propio de los horizontes.

Claro o blanco: Se debe a los carbonatos de calcio y magnesio, al yeso u otras sales solubles, el color claro como consecuencia del lavado de arenas está dentro de los horizontes eluviales.

Pardo amarillento: Debido a la presencia de óxidos de hierro, $\text{FeO}(\text{OH})$ unidos a las arcilla y materia orgánica.

Color rojo: Este color se debe a la alteración de arcilla, están dentro de los horizontes Bw o Bt. Se debe a la presencia de óxidos férricos (Fe_2O_3). Este color revela que existe un buen drenaje del suelo.

Grises y veteados: Este color se presencia en los suelos que se quedan en charcos durante un periodo de tiempo.

Gris verdoso azulado: Este color es propio de suelos que tienden a sufrir hidro morfía, falta de oxígeno.

2.6.2. Textura

Se determina textura a la composición de una proporción de suelo, es decir el porcentaje de los elementos que constituyen la proporción de suelo, arena gruesa, arena fina, limos y arcillas.

En sí la textura es el tamaño de partículas que contiene una muestra de suelo.

2.6.3. Estructura

Se entiende como estructura a la manera o forma en cómo se adicionan las partículas del suelo. La estructura puede variar en función del clima, el manejo del suelo, etc.

Un suelo de una estructura espléndida es mucho más fácil para cultivar ya que no corre el riesgo de que el viento o la lluvia lo arrastren, mientras que un suelo con pésima estructura es difícil que el aire penetre y cuando estos están húmedos tienden a formar una masa.

Para el presente trabajo experimental se utilizará 1 tipo de suelos que están dentro de la clasificación de suelos según la AASHTO que es un sistema de clasificación muy amplio utilizado principalmente en ingeniería de vías y también para suelos que pretenden ser utilizados como material de sub rasante en un pavimento. Los suelos objeto de estudio serán suelos que contengan limos y arcillas que están dentro de la calificación regular a malo.

2.7. Aserrín Metálico

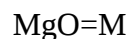
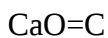
Son consideradas como desechos formados durante diferentes trabajos de la materia prima como son la chatarra y metales utilizados. Las escorias también son estimadas como un subproducto, es decir estas pueden ser reutilizadas o recicladas como fortalecer muros, para pavimentación, estabilización de suelos entre otras. Éstas tienen distinta composición química dependiendo del tipo de chatarra o metal utilizado.

2.7.1. Composición del aserrín metálico

El aserrín tiene diferentes componentes ácidos, sílice y alúmina



Se combinan componentes como la cal y magnesio



Éstos se relacionan de distintas maneras:

S/A y C/M también $(\text{C}+\text{M}) / (\text{S}+\text{A})$, esto depende de los materiales que son utilizados.

A continuación sus características físicas y química del metal.

Tabla N° 18. Características físicas y químicas del metal

Características físicas y químicas	
Estado	Sólido
Apariencia	Gris oscuro
Olor	Metal oxidado
Densidad	1,6 gr/cm ³
Humedad	1,12 %
Granulometría % pasa tamiz N° 200	5,40 %
Densidad máxima	1,938 gr/cm ³
Punto de fusión	1600 °C
Punto de ebullición	2750 °C
Maleabilidad, ductibilidad y resistencia a la corrosión o la dureza	
Conductividad térmica y eléctrica	
Resistencia a la corrosión	Electronegatividad
Capacidad para formar compuestos	Reactividad
Oxidación	-

Fuente: Elaboración propia

2.7.2. Ventajas del uso del aserrín metálico

Las posibilidades de reducción de la generación del aserrín son pocas, entonces se ha buscado una alternativa para poder reutilizar estos residuos para la fabricación de nuevos productos. Uno de los beneficios de reciclar estos residuos es:

- Aprovechamiento de materias primas
- Disminución de los costos de transporte para la eliminación de estos residuos
- Producción de subproductos que pueden ser utilizados en otros sectores como en la construcción de carreteras, estabilización y para la elaboración de materiales de construcción.

2.8. Cemento Portland

El cemento Portland, de acuerdo a Neville y Brooks (2010), es el nombre que se le da a un cemento obtenido al mezclar íntimamente materiales calcáreos y arcillosos, u otros materiales que contienen sílice, alúmina y óxido de hierro, quemándolos a una temperatura de clinkerización y moliendo el clínker resultante.

De manera general, Pasquel (1998), define al cemento portland como un aglomerante hidrófilo, resultante de la calcinación de rocas calizas, areniscas y arcillas, de tal manera que se obtenga un polvo muy fino que en presencia de agua endurece, adquiriendo propiedades resistentes y adherentes.

Complementariamente, el MTC (2013) señala que el cemento hidráulico es un producto obtenido por la pulverización del clinker portland con adición eventual de yeso natural. El clinker Portland se forma tras la calcinación de la caliza y arcilla a temperaturas que fluctúan entre 1350 y 1450 °C.

2.8.1. Composición química del cemento

Cuatro componentes son considerados como los principales constituyentes del cemento tal como se muestra en la Tabla N° 19.

Generalmente se utiliza la notación abreviada para describir cada óxido:

$\text{CaO} = \text{C (cal)}$

$\text{SiO}_2 = \text{S (sílice)}$

$\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A (alúmina)}$

$\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F (óxido férrico)}$. Igualmente, H_2O en el cemento hidratado es denotado por H (agua).

Tabla N° 19. Principales componentes del cemento portland

Nombre del compuesto	Composición del óxido	Abreviación	Nombre común (en su estado impuro)
Silicato tricálcico	3CaSO_2	C3S	Alta
Silicato di cálcico	2CaSO_2	C2s	Belita
Aluminato tricálcico	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	C3A	Celiza
Aluminoférrico tetracálcico	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$	C4AF	Feliza

Fuente: Adaptado de Neville y Brooks 2010: 10

De acuerdo con Neville y Brooks (2010), los silicatos, C3S y C2S son los componentes más importantes, los cuales son responsables para la resistencia de la pasta de cemento hidratada. En realidad, los silicatos en el cemento no son compuestos puros, pero contienen menos óxidos en solución sólida.

2.8.2. Hidratación del cemento

Pasquel (1998) denomina a la hidratación como el conjunto de reacciones químicas entre el agua y los componentes del cemento, que llevan consigo el cambio del estado plástico al endurecido, con las propiedades inherentes a los nuevos productos formados.

VC. Los dos silicatos de calcio (C3S y C2S) son los principales componentes cementantes en el cemento, el primero se hidrata mucho más rápidamente que el segundo.

2.8.3. Cemento Portland Tipo I

El cemento Portland Tipo I es un cemento de uso general en la construcción, que se emplea en obras que no requieren propiedades especiales. Se fabrica mediante la molienda conjunta de Clinker Tipo I y yeso.

Este tipo de cemento es un excelente cemento general y es el cemento más usado, ampliamente, en la industria de la construcción.

Características.

El cemento Portland Tipo I, generalmente, presenta las siguientes características:

- Logra alcanzar mayores resistencias iniciales.
- Posee menores tiempos de fraguado.

Usos y aplicaciones.

El cemento Portland Tipo I se puede utilizar en:

- Obras de concreto simple y concreto armado en general. Edificaciones, estructuras industriales, pavimentos, puentes, entre otras.
- Estructuras que requieran un rápido desencofrado, debido a que logra alcanzar resistencias iniciales rápidas.–Concretos para clima frío.
- La elaboración de productos prefabricados.

Requisitos mínimos que debe cumplir.

El cemento Portland Tipo I debe cumplir la Norma ASTM C 150. Los requisitos mínimos de este tipo de cemento se muestran en la siguiente tabla:

Tabla N° 20. Características del cemento Portland Tipo I

Cemento portland tipo 1		
Características química		Requisitos de NTP334-009 ASTM/ C150
MgO	%	6
SO3	%	3
Perdida por ignicio	%	3,5
Perdidad insoluble	%	1,5
Características físicas		Requisitos de NTP334-009 ASTM/ C150
Color	-	Gris
Olor	-	inodoro
Forma	-	polvo
Contenid de aire	%	1 - 2
Expansión auclave	%	0,8
Superficie especifica	Cm2/gr	2600
Densidad	Gr/cm3	3,09
Resistencia a la compresion		
Resistencia a 3 dias	Mpa	12 - 26,5
	Kgf/cm2	122 - 271
Resistencia a 7 dias	Mpa	19 – 34
	Kgf/cm2	194 - 350
Resistencia a 28 dias	Mpa	28 - 39
	Kgf/cm2	280 - 400
Tiempo de fraguado		
Fraguado inicial	min	45 -60
Fraguado final	hr	10 - 12

Fuente: Información enviada por empresas de cemento tipo 1 ASTM C 150

Tabla N°21. Especificaciones químicas para los cementos TIPO 1.

Características químicas (NB061)	Tipos de cemento			
	I	IP	IF	P
Perdida por calcinación (%máx.)	5	7	7	8
Residuo insoluble (%máx.)	3	-	5	-
Trióxido de azufre(SO ₃) (%máx.)	3,5	4	4	4
Oxido de magnesio (MGO) (%máx.)	6	6	6	6
Puzonalinidad 8 a 15 días	-	-	-	>0

Fuente: Norma Boliviana NB 061

2.9. Subrasante

Una subrasante es la superficie obtenida con las explanaciones, sobre la que apoyará la superestructura del pavimento. Constituye el soporte directo de dicho pavimento, por lo que debe tener una resistencia y una regularidad geométrica adecuadas (Kraemer et al. 2004).

También es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, que soportará la estructura del pavimento. Está conformada por suelos seleccionados de características aceptables y compactados por capas para constituir un cuerpo estable en óptimo estado, de tal manera que no se vea afectada por la carga de diseño que proviene del tránsito (MTC 2014).

Aspectos importantes de una subrasante:

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 %.

Montejo (2002) señala que de la calidad de la subrasante depende, en gran parte, el espesor que debe tener un pavimento, sea este flexible o rígido. Como parámetro de evaluación de

esta capa se emplea la capacidad de soporte (CBR) o resistencia a la deformación por esfuerzo cortante bajo las cargas del tránsito.

Rico y del Castillo (2005) destacan que una subrasante resistente será capaz de tolerar niveles de esfuerzo relativamente altos, con lo que podrán usarse sobre ella espesores reducidos de las capas del pavimento sin comprometer la estabilidad general, lo que generará una importante reducción de costos.

De acuerdo con Kraemer et al. (2004), con la formación de una subrasante se debe conseguir una superficie:

- Sin excesivas irregularidades, de manera que el espesor de la capa inferior del pavimento pueda ser sensiblemente uniforme.
- Poco sensible a los cambios de humedad.
- Con pendientes que permitan drenar las precipitaciones ocurridas durante la ejecución de las obras.
- Con una resistencia suficiente para soportar el tráfico de obra sin presentar erosión o deformaciones.

2.9.1. El índice CBR en la evaluación de la calidad de una subrasante

Sowers, GB y Sowers, GF (1972) definen al valor relativo de soporte (California Bearing Ratio, CBR), como un índice semiempírico de las características de resistencia y deformación de un suelo. Este índice se ha correlacionado con el comportamiento del pavimento para establecer parámetros con los que se pueden determinar el espesor del mismo. Indican, además, que este método ha sido criticado por considerársele demasiado conservador, ya que requiere la saturación previa del suelo. Aunque se debe admitir que constituye un requisito muy severo que se justifica en el hecho de que se puede desconocer las verdaderas condiciones de humedad máxima de la subrasante.

Según el MTC (2014), una vez definido el valor del índice CBR de diseño para cada sector con características homogéneas, se determinará a que categoría de subrasante pertenece el referido sector o subtramo. 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 subrasante:

Tabla N° 22. Valores del CBR

Subrasante muy pobre	CBR<3(%)
Subrasante pobre	3-5
Subrasante regular	6-10
Subrasante buena	11-19
Subrasante muy buena	CBR>20%

Fuente: Manual de carreteras no pavimentadas marzo 2018

Para poder asignar la categoría de la subrasante indicada en la tabla anterior, los suelos de la explanación, debajo del nivel superior de la subrasante, deberán tener un espesor mínimo de 0.60 m del material correspondiente a la categoría asignada, caso contrario se asignará a la categoría inmediata de calidad inferior. Referido al nivel superior de la subrasante, el MTC (2014) también recomienda que debe quedar encima del nivel freático como mínimo a 0.60 m cuando se trate de una subrasante excelente – muy buena ($\text{CBR} \geq 20\%$); a 0.80 m cuando se trate de una subrasante buena – regular ($6\% \leq \text{CBR} < 20\%$); a 1.00 m cuando se trate de una subrasante pobre ($3\% \leq \text{CBR} < 6\%$); a 1.20 m cuando se trate de una subrasante inadecuada ($\text{CBR} < 3\%$). En caso necesario, se colocarán subdrenes o capas anticontaminantes o drenantes o se elevará la rasante hasta el nivel necesario.

2.9.2. Características que deben cumplir los suelos para conformar una subrasante

El MTC (2014) indica que los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante, en una profundidad no menor de 0.60 m, deberán ser suelos adecuados estables, con $\text{CBR} \geq 6\%$. En caso de que el suelo debajo del nivel superior de la subrasante tenga un $\text{CBR} < 6\%$, corresponde estabilizar los suelos, tal como se detalla más adelante.

Según Kraemer et al. (2004) los mejores suelos para una subrasante serán los que resulten fáciles de compactar, una vez compactados sean resistentes a la deformación, poco sensibles a las variaciones de humedad (especialmente en lo referido a los cambios de volumen) o a la helada en zonas sometidas a muy bajas temperaturas y sin alterabilidad potencial.

Adicional a lo anterior, Kraemer et al. (2004) recomiendan que los suelos naturales de mala calidad podría ser desechados y sustituidos por otros de mayor calidad. Además, estos pueden ser considerados inaceptables como cimiento de un pavimento cuando:

- Presentan una elevada plasticidad, que, en todo caso, se puede reducir mediante su estabilización.
- Contienen una importante cantidad de materia orgánica.
- Son suelos evolutivos, cuyas propiedades se degradan con el tiempo, a veces incluso durante el propio proceso de puesta en obra.
- Son suelos expansivos, cuyos cambios de volumen afectarían al pavimento.—Son suelos exageradamente heterogéneos, como son típicamente algunos rellenos constituidos de residuos producto de la actividad humana.
- Son muy erosionables, en los que, debido a corrientes de agua, se pueden formar oquedades de gran tamaño.

2.9.3. Interrelación subrasante–pavimento

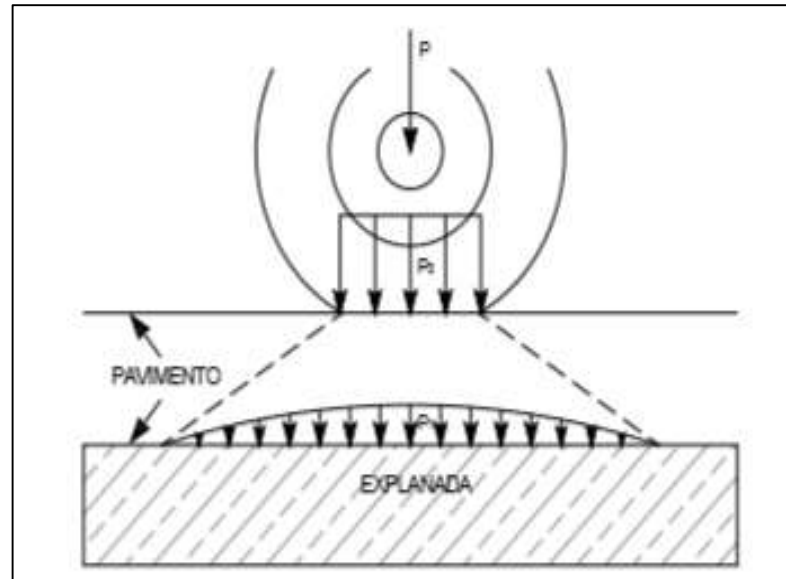
La USACE (1984) considera que el diseño de un pavimento está basado en la premisa de que se debe lograr niveles de calidad específicos para cada capa que conforma su estructura. Cada capa debe resistir esfuerzos cortantes dentro de sí misma, evitar deflexiones elásticas excesivas, que producirían agrietamiento por fatiga en su interior o en las capas superpuestas, y evitar una deformación permanente excesiva debido a la densificación (proceso lento y gradual de reducción del índice de vacíos de un suelo) del material que constituye la misma.

Además de la calidad que se pueda lograr en cada una de las capas que conforman el pavimento, su diseño también está relacionado de manera directa con la calidad y características que presente la capa de subrasante sobre la cual este se construya. Así, una subrasante de buena calidad supondrá construir un pavimento con mayor durabilidad y de menores dimensiones, lo cual significaría una ventaja técnica y económica.

Kraemer et al. (2004) indican que el pavimento debe resistir las solicitaciones previstas del tráfico pesado, repartiendo las presiones verticales ejercidas por las cargas, de forma

que a la subrasante solo llegue una pequeña fracción de aquellas, compatible en todo caso, con su capacidad de soporte.

Gráfico N° 13. Transmisión de carga de una rueda hacia la subrasante



Fuente: Kraemeret al. 2004:234

En resumen, el diseño de un pavimento debe ser integral, de manera que se considere todos los elementos que, de manera directa o indirecta, favorezcan su buen rendimiento y comportamiento a lo largo de todo el periodo para el cual se proyecta.

2.10. Estabilización de Suelos

La estabilización de suelos tiene como objetivo brindarle al suelo natural la suficiente al esfuerzo cortante para poder resistir ciertas cargas independientemente en el estado climático que se encuentre.

Los objetivos que se busca mediante la estabilización de suelos son:

- Controlar cambios volumétricos
- Aumentar la resistencia
- durabilidad
- Reducir la permeabilidad
- Reducir la compresibilidad

- Disminuir la plasticidad

2.10.1. Controlar cambios volumétricos

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.

2.10.2. Aumentar la resistencia

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.

2.10.3. 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 sollicitaciones 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

2.10.4. Reducir la 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. También 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.

2.10.5. Reducir la 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.

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.

2.10.6. Disminuir la plasticidad

La manera más eficiente de disminuir la plasticidad es mediante la estabilización química.

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.

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.

Existen varios métodos para poder estabilizar un suelo, pero los más utilizados son los siguientes:

2.11. Estabilización mecánica

La compactación es un método de estabilización mecánica, el objetivo es densificar el suelo mediante la compactación por medios mecánicos, se lo hace generalmente en la sub base y base.

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.

Gráfico N° 14. Compactación mediante maquinaria



Fuente: La tecnología integrada de compactación de suelos de Caterpillar

2.12. Estabilización física

Uno de los métodos para mejorar el suelo, mediante la estabilización física es la mezcla de dos o más suelos de diferentes clasificaciones y diferentes tipos de granulometría para así poder tener un material que cumpla con las características requeridas. La mezcla se puede hacer in situ y para después poder extender el suelo y compactarlo.

Otros métodos dentro de la estabilización física son: el empleo de geotextiles, vibro flotación y consolidación.

Gráfico N° 15. Estabilización de suelo mediante mezcla de suelos



Fuente: Mezcla de suelos para la mejora del suelo

2.13. Estabilización química

Los aditivos químicos se utilizan frecuentemente para estabilizar suelos no útiles, este método se lo utiliza cuando los métodos mecánicos y físicos no son suficientes o inadecuados. Existe un porcentaje muy elevado de proyectos que utilizan este método para mejorar los suelos mediante los siguientes aditivos que son los más comunes: cal, cemento, material bituminoso y cenizas.

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.

Gráfico N° 16. Compactación mediante aditivos químicos



Fuente: Estabilización química

2.14. Ventajas de la estabilización

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.

2.15. 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.

Aserrín metálico

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 aserrín metálico y cemento portland como estabilizante de suelo en caminos no pavimentados.

2.16. Evaluación de Método 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.

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

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRACTICA

CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRACTICA

3.1. Introducción

En este capítulo explica toda la aplicación práctica del proyecto, la ubicación, obtención de los materiales y los ensayos que se realizaron en laboratorio.

De igual forma así se detalla los resultados mediante tablas.

3.2. Ubicación de la muestra para la investigación

el estudio experimental se ubica en la, Ciudad de Tarija Provincia Cercado, Barrio Jesús de Nazaret como muestra la imagen a continuación con coordenadas.

Tabla N° 23. Coordenadas de la ubicación de la muestra arcillosa de baja plasticidad

21° 31` 01,54``	Sur
64° 41` 38,46``	Oeste

Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N° 17. Ubicación de la muestra arcillosa de baja plasticidad



Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 24. Coordenadas de la ubicación de la muestra arcillosa de alta plasticidad

21° 31` 00,61``	Sur
64° 41` 41,51``	Oeste

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 18. Ubicación de la muestra arcillosa de alta plasticidad



Fuente: Elaboración propia

3.3. Toma de muestra del suelo arcilloso

La muestra del suelo arcilloso se debió a varios factores:

El lugar de la muestra sea lo más cercano posible donde uno vive o el mismo barrio para así no causar mucha molestia para los vecinos por el cavado y sacado de la muestra para trabajar.

Para evitar problemas con los vecinos del lugar la muestra de la arcilla de baja plasticidad se extrajo de un terreno vacío cerca de la avenida principal con el permiso del dueño, mientras la muestra de alta plasticidad se extrajo más al fondo del barrio cerca de un talud por el motivo que la arcilla era de diferente apariencia con color al cemento.

Adsorbía mucha agua la arcilla a cómo se comporta una de alta plasticidad.

Este tipo de suelo se caracteriza por ser un suelo semiduro, siendo la mayor parte arcilla y un poco de arena fina.

Las muestras se extrajeron por medio de calicatas de 50 cm de profundidad con un 1 m de ancho y largo para ambas arcillas.

Primero se hizo una calicata, pero como son varios porcentajes y ensayos no abasteció el suelo arcilloso de baja plasticidad así que se hizo más calicatas a una distancia de 30 cm de la primera calicata para evitar diferencias en los ensayos, mientras la arcilla de alta plasticidad se extrajo poco por que se trabajara con el porcentaje óptimo de cada adictivo.

Gráfico N° 19. Muestra de arcilla mediante calicata



Fuente: Elaboración propia

3.4. Obtención del material adictivo (Aserrín metálico)

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

Así se consiguió del material aserrín metálico para la estabilización para el estudio del

proyecto es el siguiente.

Tornería López.

Se procedió a ir a las tornerías o algunos talleres que trabajen con metal en especial se encontró más en la tornería López que con su gran amabilidad nos regaló demasiado y esto nos facilitó a no molestar a otros torneros.

Esta clase de aserrín metálico no era del todo fino así que para poder utilizarlo para los diferentes ensayos se procedió a tamizarlo para cada ensayo como ser para límites se tamizo con el N° 40 mientras que para la compactación y CBR se tamizo con el N° 4 y así se hizo el proceso para cada ensayo.

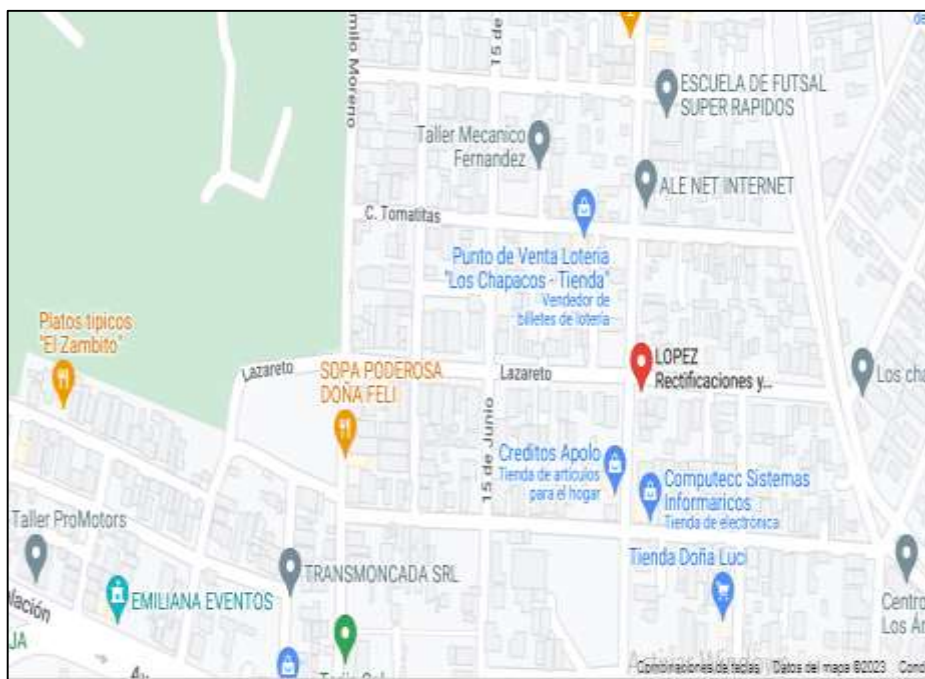
A continuación mostraremos la ubicación con imagen y coordenadas de la Tornería López.

Tabla N° 25. Coordenadas de la Tornería López

21° 12' 02,6``	Sur
64° 33' 41,1``	Oeste

Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 20. Obtención del aserrín metálico en Tornería López



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 21. Aserrín metálico



Fuente: Elaboración propia

3.5. Obtención del material adictivo (Cemento Portland)

Es muy comerciable el cemento portland y su costo vario, no es muy difícil de encontrar por lo importante que es en la construcción en la sociedad misma, se procedió a tamizarlo para los diferentes ensayos a realizar.

A continuación se presenta imagen donde se encontró el material con sus coordenadas.

Tabla N° 26. Coordenadas de los comercios del cemento portland

21° 11` 20,6``	Sur
64° 28` 31,1``	Oeste

Fuente: Elaboración propia

Gráfica N° 22. Obtención del cemento portland (comercios)



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N° 23. Cemento Portland



Fuente: Elaboración propio

3.6. Recolección de datos

Para la determinación de las propiedades físicas y mecánicas de las muestras de suelo, es necesario realizar ensayos correspondientes de identificación de suelo, contenidos óptimos de humedad, capacidad soporte de carga, entre otros; que permitirán un conocimiento del comportamiento de las muestras de suelo antes y después de haber sido combinadas con aserrín metálico y cemento portland respectivamente. Es así que se han desarrollado los siguientes ensayos.

3.6.1. Análisis Mecánico de los suelos

Es necesario un análisis mecánico del suelo en estudio, para identificar el tipo de suelo, es así que se lo determina mediante resultados que brinde el ensayo del peso específico, granulometría y el ensayo límite de Atterberg al ser identificado en la tabla SUCS y AASHTO.

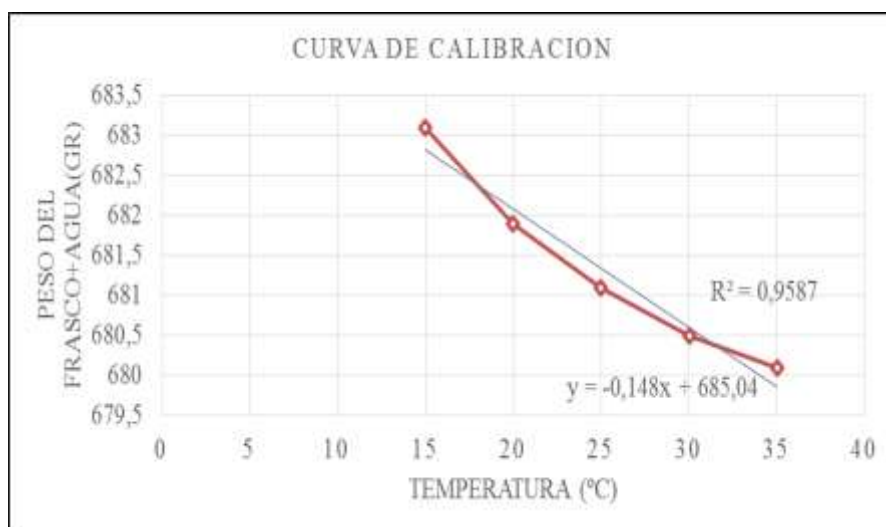
3.6.2. Peso específico

Primeramente, se realizó la calibración del frasco volumétrico, mediante una ecuación lineal, donde nos da una correlación de 0,9587.

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

A continuación el gráfico de la curva de calibración.

Gráfico N° 24. Calibración del frasco



Fuente: Elaboración propia

Materiales:

Tabla N° 27. Materiales para el peso específico

Matraz de Erlenmeyer	Termómetro	Balanza (0,1 gr)	Pipeta	Hielo	Fuente	Gasolina
----------------------	------------	------------------	--------	-------	--------	----------

Fuente: Elaboración propia

Procedimiento.

Se limpia muy bien el frasco y se registra el peso del frasco para luego llenarlo de agua para el baño maría caliente hasta unos 60 °C, en el caso del cemento y aserrín el peso específico se determinó con gasolina un procedimiento diferente.

Dando como resultados.

Tabla N° 28. Resultados del peso específico de cada material

N°	Material	Peso específico (gr/cm3)
1	Suelo natural de baja plasticidad	1,54
2	Suelo natural de alta plasticidad	1,43
3	Aserrín metálico	1,63
4	Cemento portland	3,09

Fuente: Elaboración propia

3.6.3. Análisis granulométrico

Tabla N° 29. Tamices para fracción fina

Tamiz N°	Abertura (mm)
N°10	2.000
N° 40	0,425
N° 200	0,075

Fuente: Elaboración propia

Tamices que se utilizaron para el ensayo de la granulometría

proceso de ensayo:

Método lavado:

Gráfico N° 25. Lavado de muestra



Fuente: Elaboración propia

Materiales:

Tabla N° 30. Materiales para granulometría

Tamice N° 10, 40, 200	Fuente	Horno	Balanza
-----------------------	--------	-------	---------

Fuente: Elaboración propia

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

Se pesa 2000 gr de suelo fino arcilloso que pase por el tamiz N° 10 y este dejar reposar en agua por lo menos 24 hr que se sature.

Pasado las 24 hr se empieza a colocar en el tamiz N° 200 para empezar por el método lavado hasta que este material esté libre de barro, lodo e impurezas en otras palabras este limpio el material terminado el proceso.

Se lo coloca en el horno 24 hr ojo no colocar con mucha agua si esto tardara en el secado tratar de no perder muestra.

Terminado el secado se lo saca del horno dejar que se enfríe y después empezar con el tamizado respectivo tamiz N° 40 y 200 durante 15 minutos.

Ya tamizado se lo pesa su material retenido de cada tamiz para así calcular la granulometría que es necesaria.

Para el proceso del ensayo con el adictivo es el mismo solo cambia el porcentaje, como al 100 % del suelo natural a hora será 96 % suelo natural + 4 % de cemento portland y así sucesivamente con los demás porcentajes de los adictivos.

Dando como resultados:

Tabla N° 31. Resultados de la granulometría del suelo arcilloso de baja plasticidad

N°	Material	Tamiz N° 40	Tamiz N° 200
1	100 % suelo natural+0 % de adictivo	96,80	95,14
2	96 % suelo natural+4 % aserrín metálico	94,21	92,17
3	92 % suelo natural+8 % aserrín metálico	92,59	89,32
4	88 % suelo natural+12 % aserrín metálico	91,93	88,16
5	84 % suelo natural+16 % aserrín metálico	91,24	87,47
6	80 % suelo natural+20 % aserrín metálico	90,01	85,98
7	96 % suelo natural+4 % cemento portland	96,65	95
8	92 % suelo natural+8 % cemento portland	96,15	94,76
9	88 % suelo natural+12 % cemento portland	96	94,5
10	84 % suelo natural+16 % cemento portland	95,93	94,21
11	80 % suelo natural+20 % cemento portland	95,70	94,025

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 32 . Resultados de la granulometría del suelo arcilloso de alta plasticidad

N°	Material	Tamiz N° 40	Tamiz N° 200
1	100 % suelo natural+0 % de adictivo	94,74	62,90
2	80 % suelo natural+20 % aserrín metálico	87,71	58,28
3	96 % suelo natural+4 % cemento portland	93,94	61,10

Fuente: Elaboración propia

A simple vista en los resultados ensayados y calculados que pasa más del 50 % del tamiz N° 200, esto nos quiere decir que son suelos arcillosos y con los limites afirmaremos que suelos son.

3.6.4. Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg que corresponde al contenido de humedad con que una muestra de suelo cambia de una consistencia a otra (sólida, semisólida, plástica y líquida).

A continuación aplicaremos los procedimientos y cálculos mediante ensayos.

Gráfico N °26. Casa grande limite liquido



Fuente: Elaboración propia

Materiales:

Tabla N° 33. Material para Limites de Atterberg

Combo	Tamiz N°40	Casa Grande	Ranurador	Horno	Espátula
Fuentes	Base de vidrio	Vidrio reloj	Taras	Plato	Balanza

Fuente: Elaboración propia

Para la determinación del límite líquido se empleó el ensayo de casa grande, que básicamente consiste el contenido de humedad y el número de golpes que se necesita 4 ensayos de diferentes golpes para graficar. Los rangos son de 15-20, 20-25, 25-30 y de 30-35 golpes se entiende que menos golpes el suelo esta un estado blando y más golpes cambia a un estado seco.

Mediante un gráfico correspondiente de acuerdo al punto de intersección a los 25 golpes.

Para la determinación del límite plástico se realizaron pequeños rollos aproximadamente de 3 mm hasta ver rajaduras o grietas.

El índice de plasticidad de un suelo arcilloso es la diferencia entre:

$$IP=LL-LP$$

Los limites Atterberg de las muestras ensayadas se muestran a continuación.

Tabla N° 34. Resultados límites de Atterberg de la muestra arcillosa de baja plasticidad

N°	Material	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Índice de grupo
1	100 % suelo natural+0 % aserrín metálico	47	26	22	14
2	96 % suelo natural+4 % aserrín metálico	43	31	12	9
3	92 % suelo natural+8 % aserrín metálico	44	32	12	10
4	88 % suelo natural+12 % aserrín metálico	40	28	12	9
5	84 % suelo natural+16 % aserrín metálico	42	31	11	9
6	80 % suelo natural+20 % aserrín metálico	32	23	9	8
7	96 % suelo natural+4 % cemento portland	65	44	21	16
8	92 % suelo natural+8 % cemento portland	59	39	20	16
9	88 % suelo natural+12 % cemento portland	51	35	16	13
10	84 % suelo natural+16 % cemento portland	58	52	6	12
11	80 % suelo natural+20 % cemento portland	60	54	6	12

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 35. Resultados límites de Atterberg de la muestra arcillosa de alta plasticidad

N°	Material	Límite líquido	Límite plástico	Índice de plasticidad	Índice de grupo
1	100 % suelo natural+0 % aserrín metálico	61	26	35	16
2	80 % suelo natural+20 % aserrín metálico	58	33	25	13
3	96 % suelo natural+4 % cemento portland	65	35	30	16

Fuente: Elaboración propia

Para la utilización de aserrín metálico y cemento portland se designó porcentajes del 4%, 8%, 12%, 16% y 20% debido a que en el aserrín metálico presenta bajos contenidos de humedad y en el cemento portland altos contenidos de humedad y también por el rango requerido del cemento en tablas.

Además en los resultados se aprecia que el índice de plasticidad reduce esto nos afirma que con los adictivos aumentara la capacidad portante.

Proceso de ensayo:

Límite líquido:

Se tamiza una muestra de suelo natural de 200 gr lo que pasa por el tamiz N° 40 se procede a ensayar la muestra.

Luego de tamizarlo y pesarlo se lo coloca en un recipiente, seguidamente se lo coloca agua y se lo mezcla homogéneamente. Se procede a colocarlo en la copa casa grande y con el ranurador partimos a la mitad la muestra luego se procede a los golpes correspondientes según indique la normativa hasta que se una la muestra partida en el medio contamos los golpes y así terminar los 4 puntos para la respectiva gráfica.

Colocarlo a un recipiente para luego pesarlo la muestra, después colocarlo al horno para su respectivo secado de 24 hr.

Límite plástico:

Con la misma muestra que sobra del límite líquido se procede a amasarlo con las manos con más muestra seca hasta que no se pegue en las palmas luego se procede a hacer bolitas que pierda humedad se empieza a colocar en la base del vidrio colocando un papel que

adsorba la humedad para sus respectivos rodillos de 3 mm hasta que se agrite o tenga rajaduras para luego cortarlo donde se presentan estas grietas.

Se procede a colocarlo en un recipiente pesado para su respectivo secado.

3.6.5. Clasificación de los suelos ensayados

Mediante la granulometría y los límites de Atterberg se clasificó cada suelo natural más sus combinaciones respectivas mediante los sistemas de AASHTO Y SUCS.

A continuación la clasificación para cada combinación.

Tabla N° 36. Clasificación mediante AASHTO Y SUCS de la arcilla de baja plasticidad

N°	Material	Ubicación	AASHTO	SUCS
1	100 % suelo natural+0 % aserrín metálico	B/ Jesús de Nazaret	A-7-6(14)	CL
2	96 % suelo natural+4 % aserrín metálico	B/ Jesús de Nazaret	A-7-5(9)	OL
3	92 % suelo natural+8 % aserrín metálico	B/ Jesús de Nazaret	A-7-5(10)	OL
4	88 % suelo natural+12 % aserrín metálico	B/ Jesús de Nazaret	A-6(9)	OL
5	84 % suelo natural+16 % aserrín metálico	B/ Jesús de Nazaret	A-7-5(9)	OL
6	80 % suelo natural+20 % aserrín metálico	B/ Jesús de Nazaret	A-4(8)	ML
7	96 % suelo natural+4 % cemento portland	B/ Jesús de Nazaret	A-7-5(16)	OH
8	92 % suelo natural+8 % cemento portland	B/ Jesús de Nazaret	A-7-5(16)	OH
9	88 % suelo natural+12 % cemento portland	B/ Jesús de Nazaret	A-7-5(13)	OH
10	84 % suelo natural+16 % cemento portland	B/ Jesús de Nazaret	A-5(12)	MH
11	80 % suelo natural+20 % cemento portland	B/ Jesús de Nazaret	A-5(12)	MH

Fuente: Elaboración propia

En la clasificación del suelo arcilloso de baja plasticidad con el aumento de los porcentajes se aprecia el cambio en su clasificación llegando hasta una arcilla de alta plasticidad como también de un limo de alta y baja plasticidad.

Tabla N° 37. Clasificación mediante AASHTO Y SUCS de la arcilla de alta plasticidad

N°	Material	Ubicación	AASHTO	SUCS
1	100 % suelo natural+0 % aserrín metálico	B/ Jesús de Nazaret	A-7-6(16)	CH
2	80 % suelo natural+20 % aserrín metálico	B/ Jesús de Nazaret	A-7-5(13)	OH
3	96 % suelo natural+4 % cemento portland	B/ Jesús de Nazaret	A-7-5(16)	OH

Fuente: Elaboración propia

También apreciamos que a medida aumentamos aserrín metálico y cemento portland a los porcentajes trabajados cambian de inorgánica a orgánica.

3.6.6. Compactación (densidad máxima y humedad optima de suelo)

Gráfico N° 27. Molde de compactación



Fuente: Elaboración propia

Materiales:

Tabla N° 38. Materiales para compactación

Tamiz N°4	Pistón	Bandejas	Probeta	Taras	Balanza	Brocha	Horno
Molde T-180	Combo	Espátula	Vernier	Collarín	Termobalanza	Guantes	cuchara

Fuente: Elaboración propia

La determinación de la densidad máxima y humedad optima del suelo se desarrolló mediante la ejecución del ensayo de Proctor modificado método C.

Se usa si más el 20 % del material es retenido en la malla 9,5 mm y menos de 30 % por peso es retenido en la malla 19 mm.

La humedad obtenida en este ensayo será base fundamental para el desarrollo del ensayo para determinar la capacidad de soporte del suelo (CBR).

Tabla N° 39. Resultados del ensayo de compactación (arcilla de baja plasticidad)

N°	Material	Densidad máxima(gr/cm3)	Humedad optima(%)
1	100 % suelo natural+0 % aserrín metálico	1,71	16,17
2	96 % suelo natural+4 % aserrín metálico	1,89	11,63
3	92 % suelo natural+8 % aserrín metálico	1,93	12,73
4	88 % suelo natural+12 % aserrín metálico	2,05	11,85
5	84 % suelo natural+16 % aserrín metálico	1,98	14,01
6	80 % suelo natural+20 % aserrín metálico	2,01	11,75
7	96 % suelo natural+4 % cemento portland	1,72	15,17
8	92 % suelo natural+8 % cemento portland	1,78	14,42
9	88 % suelo natural+12 % cemento portland	1,77	14,04
10	84 % suelo natural+16 % cemento portland	1,74	15,51
11	80 % suelo natural+20 % cemento portland	1,71	13,27

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 40. Resultados del ensayo de compactación (arcilla de alta plasticidad)

N°	Material	Densidad máxima(gr/cm3)	Humedad optima(%)
1	100 % suelo natural+0 % aserrín metálico	1,298	26,09
2	80 % suelo natural+20 % aserrín metálico	1,32	27,05
3	96 % suelo natural+4 % cemento portland	1,34	30,27

Fuente: Elaboración propia

Proceso de ensayo:

Tamizar el suelo por el tamiz N° 4, todo el suelo que pasa por el tamiz se utiliza para la compactación se pesa 5000 gr de muestra para cada cilindro (4 puntos) o sea se pesara 25000gr de suelo a utilizar.

Seguidamente se medirá las dimensiones de los cilindros diámetro y altura para su respectivo volumen y su respectivo peso sin el collarín.

Luego se saca el porcentaje de humedad con la termobalanza para así saber que tan húmedo esta la muestra o también se lo coloca un día antes la muestra al horno para secado así para que no tenga humedad el suelo.

En una fuente con la muestra pesada se procede a mezclar con su respectivo porcentaje de agua ayudado con una probeta de 500 ml y si esta total seca o sea 0 % de humedad se coloca los porcentajes dados en nuestro caso es de (6, 12, 18, 24 %) pero si la muestra no está seca y tiene un determinado porcentaje de humedad se lo resta con los porcentajes dados si es menor y si es mayor se coloca ese como inicial.

Luego del mezclado y amasado de la muestra con el agua se lo procede al colocado en cilindro con 5 capas cada capa se compactará con 56 golpes ayudado con el martillo de compactación.

En la última capa sacar el collarín y enrasar con la regla metálica el suelo que sobre sale del cilindro seguidamente se pesa el cilindro con la muestra para su respectivo cálculo.

Después de pesarlo el cilindro se empieza a sacar la muestra que está dentro del cilindro con el combo, cincel y con la espátula se saca una determinada muestra húmeda para colocarla en un recipiente con su respectivo pesado para así colocándole al horno dentro de 24 hr para luego sacarlo y pesarlo y así determinar su peso seco para los cálculos obteniendo como la densidad seca y la humedad optima mediante una gráfica.

3.6.7. Capacidad de Soporte (C.B.R)

A continuación aplicaremos los procedimientos y determinación del C.B.R. al 100 y 95% con el respectivo ensayo.

Con estos resultados obtenidos con el ensayo del C.B.R. afirmaremos que estos adictivos

sí son aplicables para suelos arcillosos de baja como también de alta plasticidad.

Gráfico N° 28. C.B.R. Tester



Fuente: Elaboración propia

Materiales:

Tabla N° 41. Materiales para C.B.R.

Tamiz N°4	Balanza	Disco espaciador	3 moldes	Piscina de agua	Vernier	Taras
Termo balanza	Pesas	3 Vástagos	6 pesas	extensómetro	Probeta 500ml	Fuentes
Equipo tester	Combo	Papel filtro	Pistón			

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 42. Resultados de capacidad de soporte (C.B.R. arcilla de baja plasticidad)

N°	Material	95% C.B.R.	100% C.B.R.
1	100 % suelo natural+0 % aserrín metálico	1,44	1,71
2	96 % suelo natural+4 % aserrín metálico	2,84	3,14
3	92 % suelo natural+8 % aserrín metálico	3,52	4,04
4	88 % suelo natural+12 % aserrín metálico	4,94	5,68
5	84 % suelo natural+16 % aserrín metálico	7,44	8,28
6	80 % suelo natural+20 % aserrín metálico	9,83	10,66
7	96 % suelo natural+4 % cemento portland	32,81	40,68
8	92 % suelo natural+8 % cemento portland	82,65	103,32
9	88 % suelo natural+12 % cemento portland	100	100
10	84 % suelo natural+16 % cemento portland	100	100
11	80 % suelo natural+20 % cemento portland	100	100

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 43. Resultados de capacidad de soporte (C.B.R. arcilla de alta plasticidad)

N°	Material	95% C.B.R.	100% C.B.R.
1	100 % suelo natural+0 % aserrín metálico	2,67	3,25
2	80 % suelo natural+20 % aserrín metálico	10,25	13,79
3	96 % suelo natural+4 % cemento portland	24,42	31,85

Fuente: Elaboración propia

Proceso de ensayo:

Tamizar la muestra en el tamiz N° 4 todo material que pasa por el tamiz se trabaja se pesa la muestra de 5000 gr en 3 bandejas en total de muestra que se necesitará será 15000 gr.

Seguido se saca el contenido de humedad de la muestra con la termobalanza para saber que humedad tiene la muestra o también se debe colocar al horno 24 hr.

Con la ayuda del vernier se mide las dimensiones de los tres moldes como ser altura y diámetro como también la altura del disco espaciador para luego pesarlo los tres moldes para luego empezar con el ensayo.

Con el porcentaje optimo sacado con el ensayo de compactación se calcula que porcentaje de agua se pondrá a la muestra del C.B.R. si la muestra compactada tiene 14 % de optimo y la muestra ensayada para CBR tiene una humedad de 4 % se saca la diferencia se multiplica por los 5000 gr y se divide entre 100 esto nos dará la cantidad de agua en ml con la ayuda de una probeta colocamos a la muestra agua para un mezclado toda la muestra acabado el proceso.

En los moldes se coloca primero el disco espaciador luego un papel filtro se empieza a colocar la muestra en el molde con 5 capas con golpes de 12, 25 y 56 en cada molde pesarlo con la muestra húmeda.

Con la ayuda del extensómetro se mide esponjamiento de cada molde después se procede a colocarlo en la fuente de agua los tres moldes dentro de 96 hr que se sature ese tiempo, pero cada día y la misma hora se medirá el esponjamiento.

Terminada la saturación se extrae los moldes de la fuente para que se escurra bien el agua para luego pesarlo la muestra.

Se prepara la máquina del CBR para colocarlo el molde para así lectura la penetración a los tres moldes.

Después se extrae tres muestras de cada molde (arriba, medio y abajo) en recipientes pesarlos con la muestra húmeda y después se los coloca en horno 24 hr para su respectivo secado terminando eso se lo pesa para tener el peso de la muestra seca.

Se procede a calcular mediante Excel el CBR al 100 % y 95%.

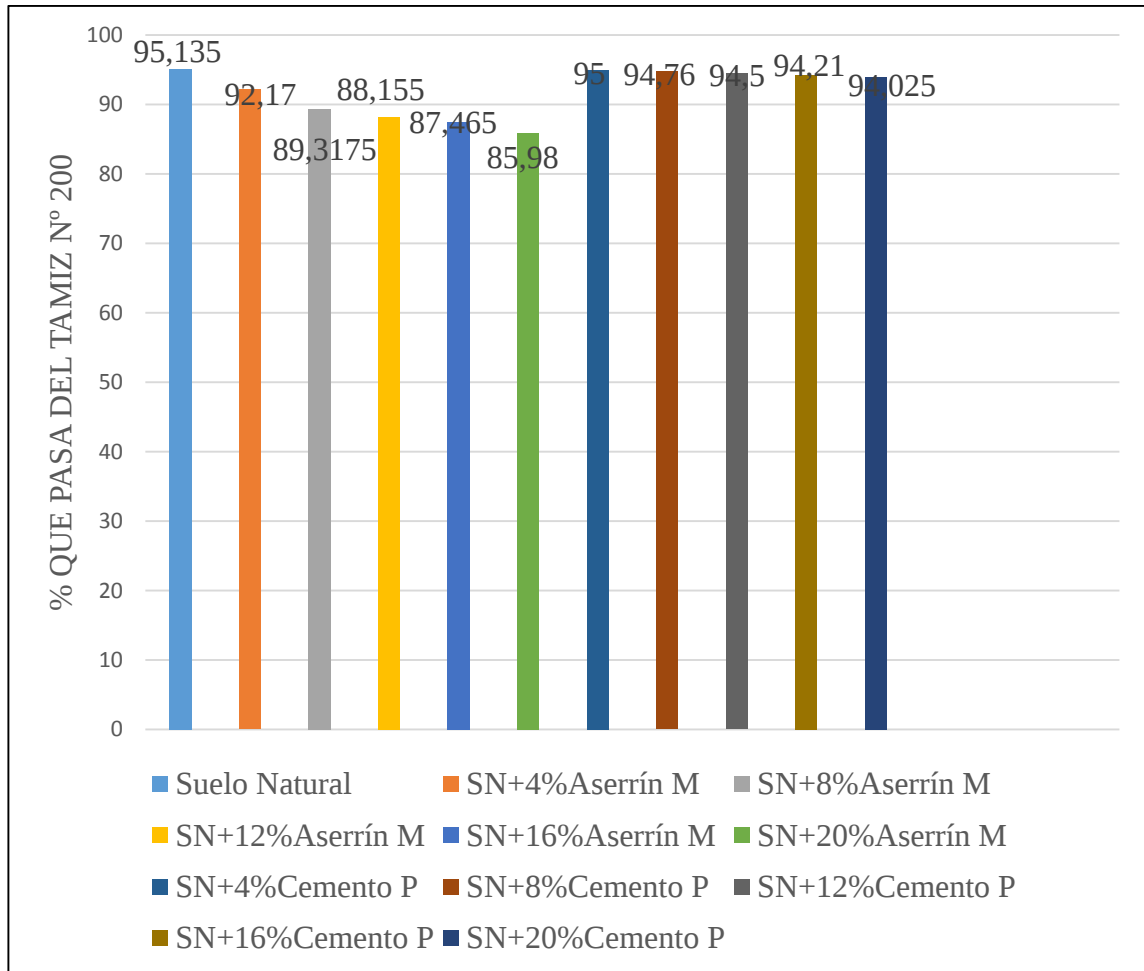
CAPÍTULO IV
COMPARACIÓN Y
ANÁLISIS DE
RESULTADOS

CAPÍTULO IV

COMPARACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Comparación y análisis granulométrico

Gráfico N° 29. Análisis granulométrico de la arcilla de baja plasticidad

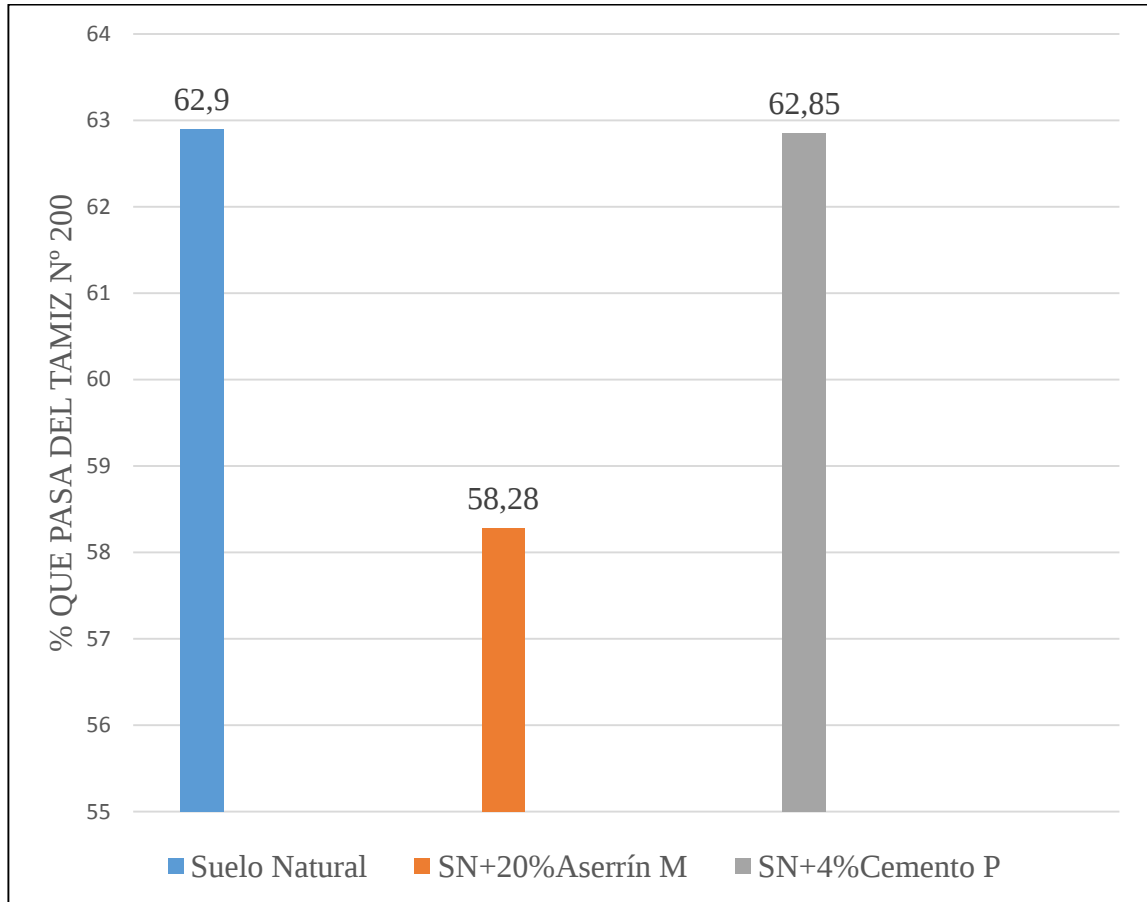


Fuente: Elaboración propia

En los resultados de granulometría, vemos que el suelo puro pasa más cantidad de suelo tanto en el tamiz N°. 200 pasa el 95,135%, y a medida que se va aumentando los porcentajes nos muestra que el porcentaje que pasa el tamiz N°. 200 van disminuyendo en su cantidad, si vamos al caso de 20% de aserrín metálico en el tamiz N°. 200 pasa el 85,98%, esto se debe a que el aserrín metálico contiene material granular menos fino que el suelo. Esto nos indica que, si aumentamos mayor porcentaje de aserrín, entonces mayor será la cantidad de material que se retiene en los tamices 40 y 200, pero en cambio del

cemento se reduce lo mínimo al suelo natural eso quiere decir que tiene más fino que el aserrín metálico.

Gráfico N° 30. Análisis granulométrico de la arcilla de alta plasticidad



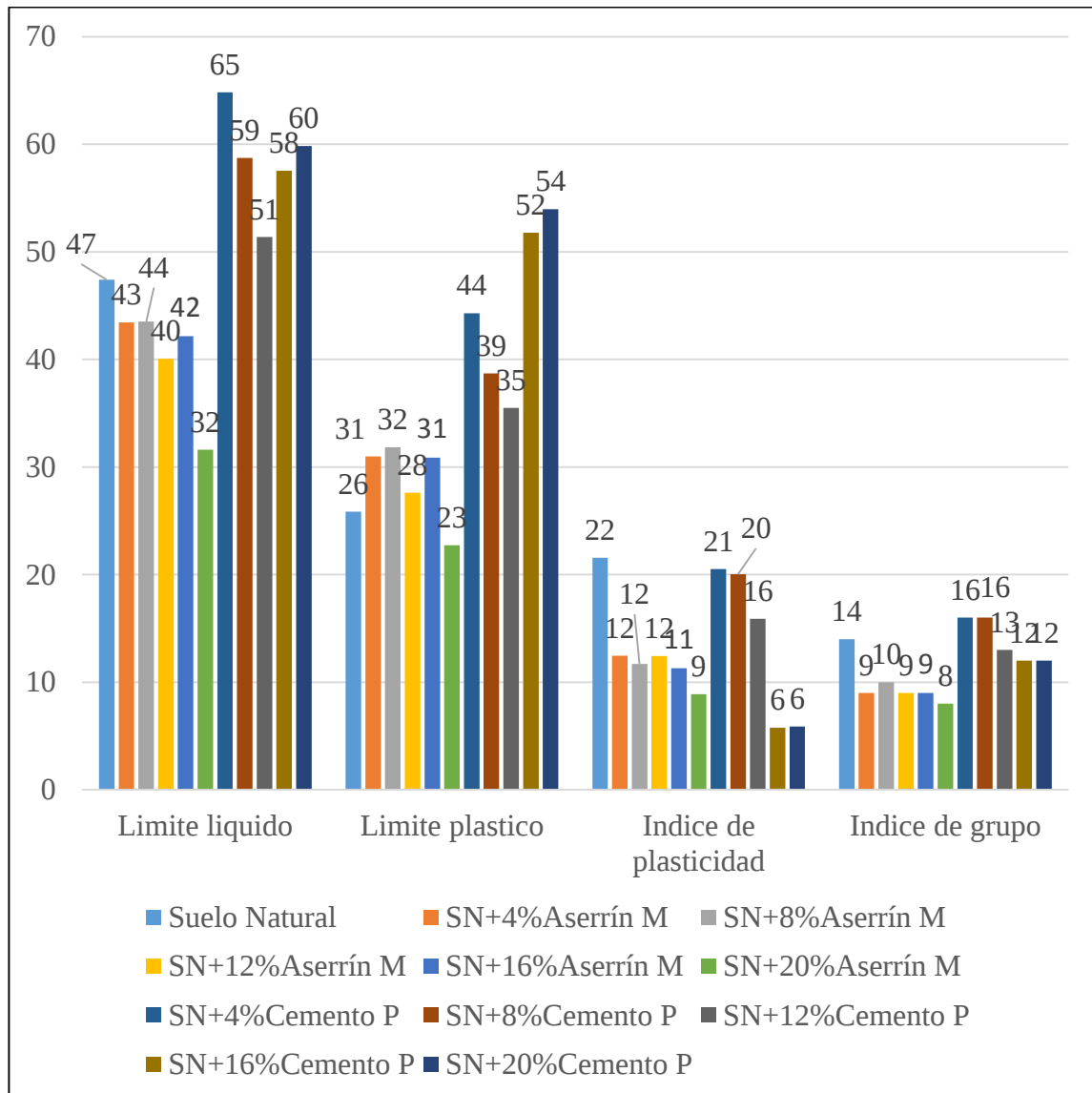
Fuente: Elaboración propia

En el análisis granulométrico, de la muestra de alta plasticidad sucede lo mismo que en la de baja plasticidad, porque en los resultados muestra que el porcentaje que pasa es menor con la mezcla de aserrín metálico, mientras que el cemento el porcentaje que pasa reduce lo mínimo ni el 1%.

Esto nos indica que el suelo arcilloso del Barrio Jesús de Nazaret de la ciudad de Tarija, representa un alto porcentaje de finos de acuerdo a lo que se indica en la granulometría en la que el porcentaje que pasa en el tamiz N° 200, que pasa más del 35 % confirma que está en el grupo de limos y arcilla, pero con los límites de Atterberg afirmaremos si es arcilla o limo.

4.2. Comparación y análisis del límite de Atterberg

Gráfico N° 31. Análisis de los límites de Atterberg de la arcilla de baja plasticidad



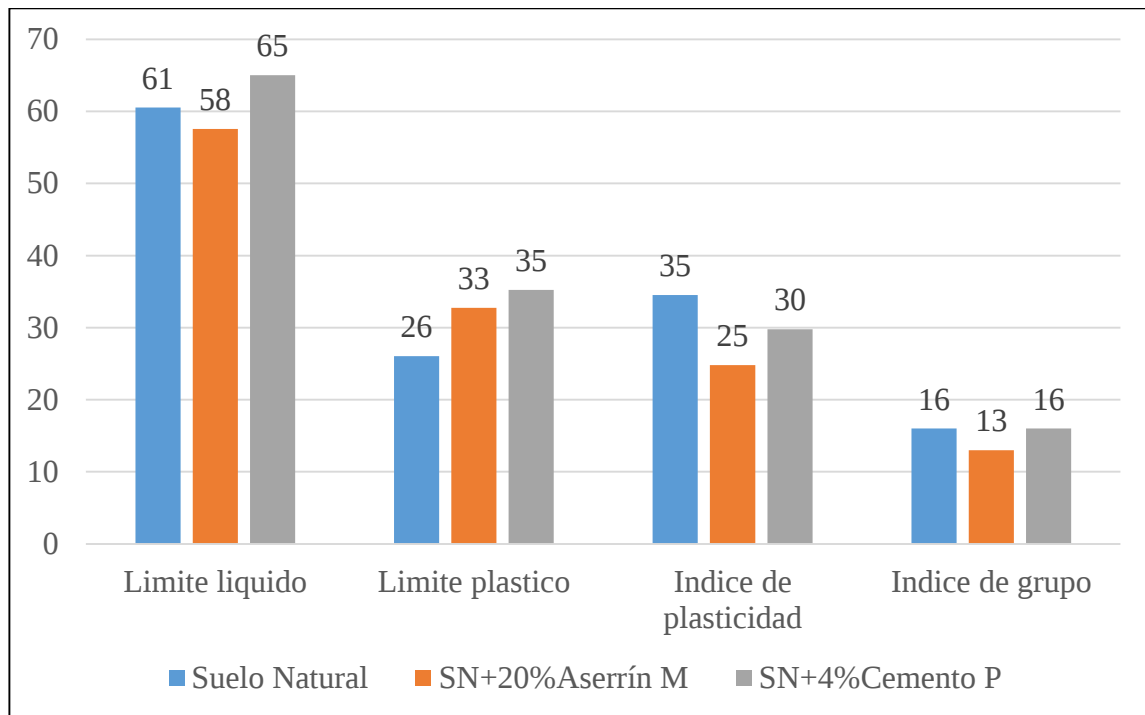
Fuente: Elaboración propia

En base a los resultados indicados, se pudo observar mejora de las propiedades físicas de la arcilla, debido a la adición del aserrín metálico y cemento portland, obteniéndose disminución del Índice de Plasticidad del suelo natural arcilloso.

El índice de plasticidad del suelo de baja 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=22 hasta

IP=9 y IP=6 a medida que se va aumentando los porcentajes nos muestra que el índice de plasticidad disminuye, esto se debe a que el aserrín metálico y el cemento portland es un material no plástico, esto nos indica que si aumentamos mayor porcentaje de los dos aditivos, entonces menor será el índice de plasticidad hasta llegar a ser un material no plástico.

Gráfico N° 32. Análisis de los límites de Atterberg de la arcilla de alta plasticidad



Fuente: Elaboración propia

En base a los resultados indicados, se pudo observar mejora de las propiedades físicas de la arcilla, debido a la adición del aserrín metálico y cemento portland, obteniéndose disminución del índice de plasticidad de suelo natural arcilloso.

Se observa que el límite líquido del suelo arcilloso tiende a disminuir conforme se estabiliza con aserrín metálico y su límite plástico tiende a aumentar estos casos se debe a varios factores como la naturaleza no plástica del aserrín metálico también se atribuye a la reacción entre partículas óxido de calcio del suelo arcilloso y el aserrín metálico, los cuales forman compuestos que poseen propiedades de cementación como los silicatos de calcio. También la reducción se debe a la comprensibilidad y de las características de expansión de las arcillas y el aumento del límite plástico se incrementa conforme se

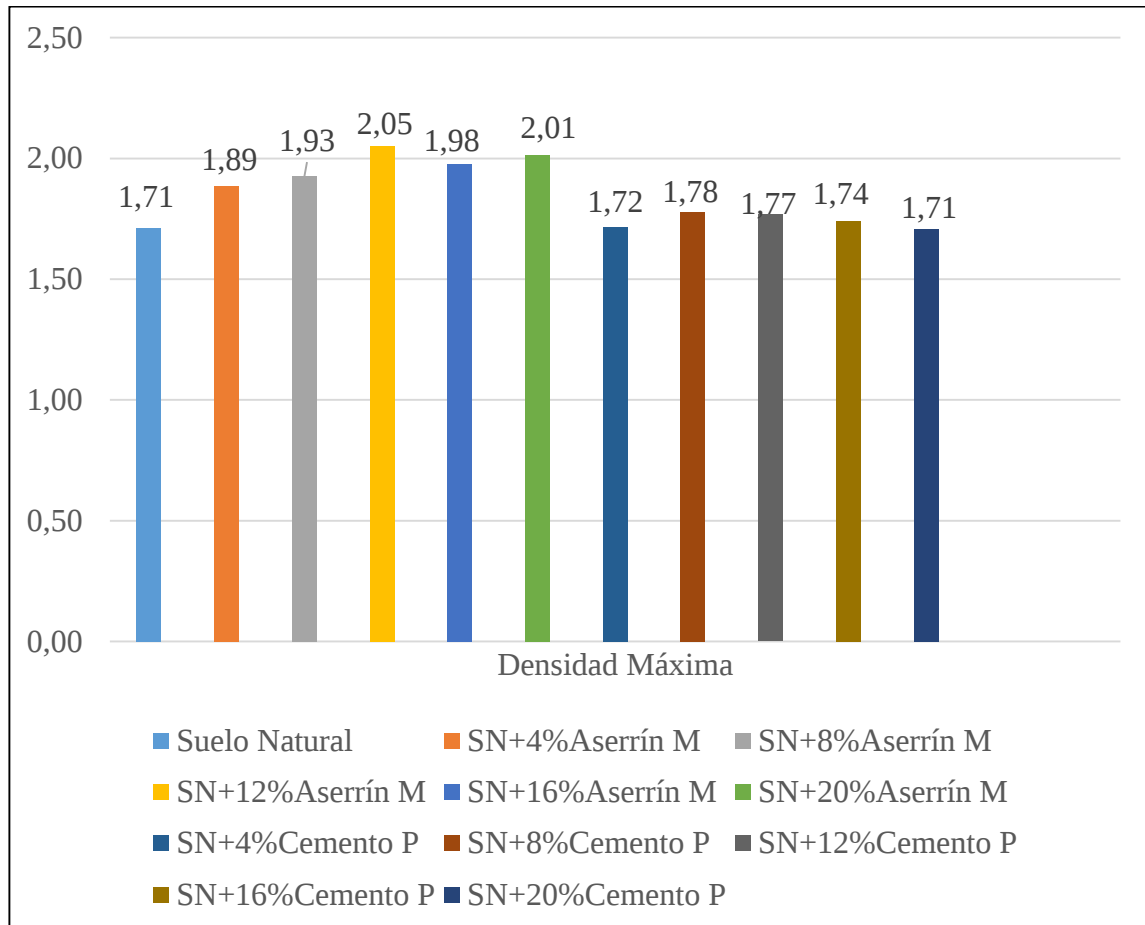
aumenta el contenido de aserrín metálico con ello se produce un efecto cementante formado con la estabilización de la arcilla y aserrín metálico.

Los resultados indicados, se puede observar al añadir cemento portland al suelo estabilizado su límite líquido y límite plástico aumentan esto se debe a que se produce fuertes uniones entre partículas minerales del suelo con el cemento formando una microestructura y esto requiere más agua mayor humedad, por lo tanto, su límite líquido y plástico son altos.

Es una razón válida para decir que la arcilla ante la presencia del cemento y aserrín metálico, pasa de un estado plástico a un estado sólido con mayor rapidez a un sin haber dejado fraguar la mezcla. De esta manera cumplen las funciones de ser materiales que controlan el índice de plasticidad del suelo estudiado, provocando en el aserrín metálico un aumento del límite plástico y por consiguiente una disminución del límite líquido mientras que en el cemento portland un aumento del límite plástico como también del límite líquido, esto se debe el resultado de iteración entre las partículas de arcilla y cemento portland, que produce un cohesión entre dichas partículas, dando como resultados el aumento a su tamaño, esto reduce significativamente su índice de plasticidad, mientras más porcentajes de aditivos aumenta más se reducirá el IP, muestras más se reduce el IP mayor C.B.R. y menor expansión ayudando al comportamiento de la arcilla garantizando una subrasante buena.

4.3. Comparación y análisis de la densidad máxima y humedad óptima (Proctor modificado)

Gráfico N° 33. Análisis de la densidad máxima de la arcilla de baja plasticidad



Fuente: Elaboración propia

En la Gráfica 33 se distingue que la densidad seca máxima del suelo analizado se incrementa con un mayor porcentaje de aserrín metálico, de 1,71. gr/cm³ para el suelo existente natural, a 2,05 gr/cm³ con la adición de 12% de aserrín metálico, se puede afirmar que cuando se logra aumentar la densidad del suelo, mediante la adición de aserrín metálico, se alcanza una mayor capacidad de soporte del mismo.

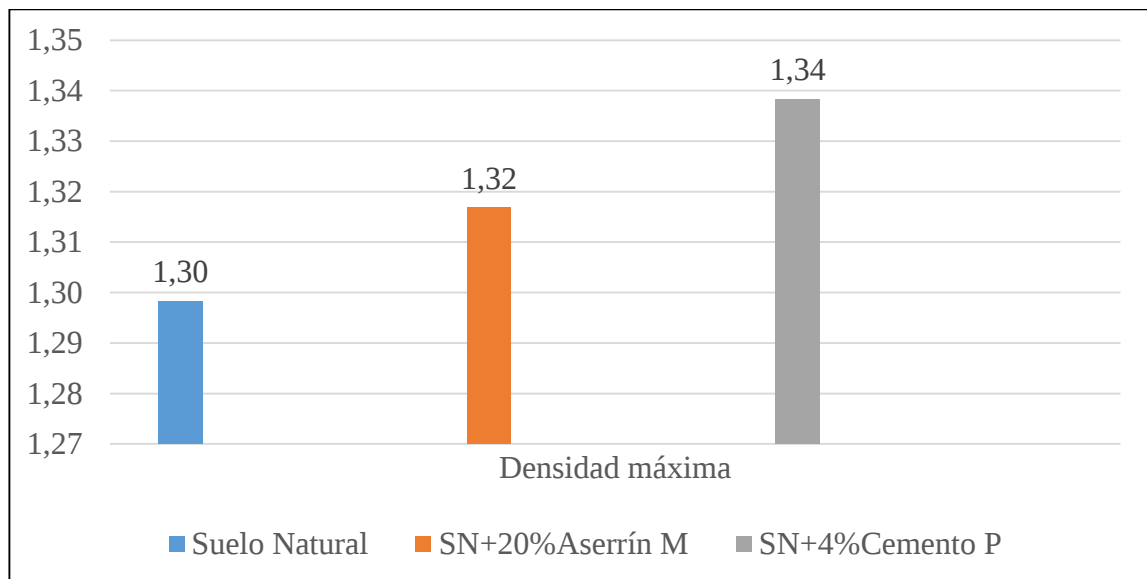
Pero en el caso de la adición al 16 % del aserrín metálico baja al 1,98 gr/cm³ y al 20% sube al 2,01 gr/cm³ esto se debe que sus propiedades que tiene el aserrín metálico de ser un material cementante pierde humedad, que al momento de compactar las muestras, estas se acomodan en los poros del aserrín metálico reduciendo el porcentaje de vacíos y que al

ser mezclado con un suelo arcilloso, lo estabiliza aumentando sus propiedades mecánicas tales como el índice de resistencia y densidad seca por eso es que sube y baja o por las propiedades del suelo, procedimiento el material aditivo.

Con la aplicación del cemento al suelo arcilloso de baja plasticidad de acuerdo al gráfico demuestra que el cemento portland aplicando porcentajes de 4%, 8% incrementa su densidad máxima, esto se debe a la formación de compuestos hidratados de silicatos y aluminato de calcio que produce al mezclar el cemento con la arcilla proporcionando, una estructura cohesiva al suelo, y logrando un aumento en su densidad máxima en los porcentajes de 12 %, 16 % y 20 % disminuye la densidad del conjunto, debido a que al aumentar más cemento absorbe el agua que contiene el suelo impidiendo que exista una adecuada consolidación.

Por tanto, establece de acuerdo a los resultados de las combinaciones del cemento portland y aserrín metálico, el contenido óptimo de la combinación suelo+cemento portland está a un 4 % y del suelo+aserrín metálico está a un 20 %, por el motivo que aumenta y luego disminuye su densidad seca.

Gráfico N° 34. Análisis de la densidad máxima de la arcilla de alta plasticidad



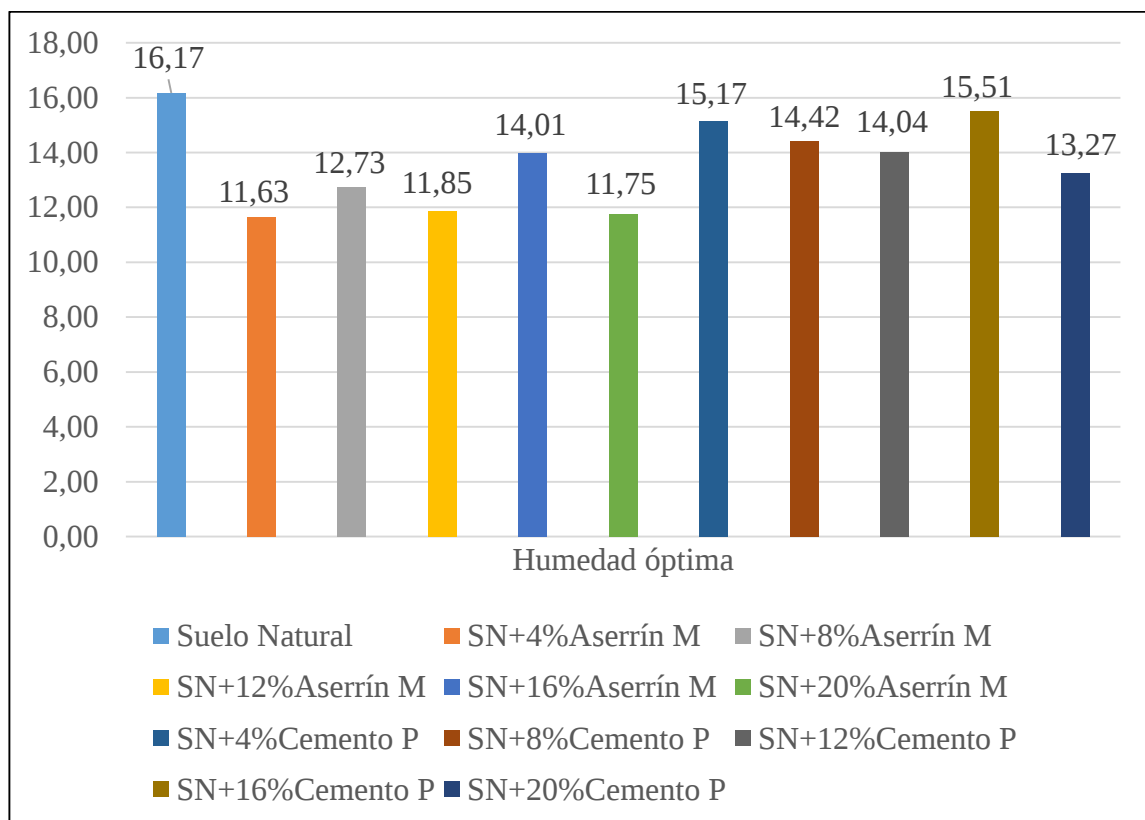
Fuente: Elaboración propia

En el análisis de la arcilla de alta plasticidad, se evaluó los efectos del cemento Portland Tipo I y aserrín metálico como estabilizante del material fino. Además, destacando que

con la adicción aumenta la densidad máxima y que el contenido más apropiado de agua se determina con el ensayo Proctor modificado dándonos un aumento necesario para el incremento de la resistencia del suelo. Cuanto más alta es la densidad alcanzada, mayor es la resistencia del material.

Al añadirle cemento y aserrín metálico al suelo de partida, y antes de iniciarse el fraguado, su índice de plasticidad disminuye y la densidad máxima y la humedad óptima varían ligeramente en un sentido u otro según el tipo de suelo como el material fino varia al incrementar diferentes porcentajes de aditivos.

Gráfico N° 35. Análisis de la humedad óptima de la arcilla de baja plasticidad



Fuente: Elaboración propia

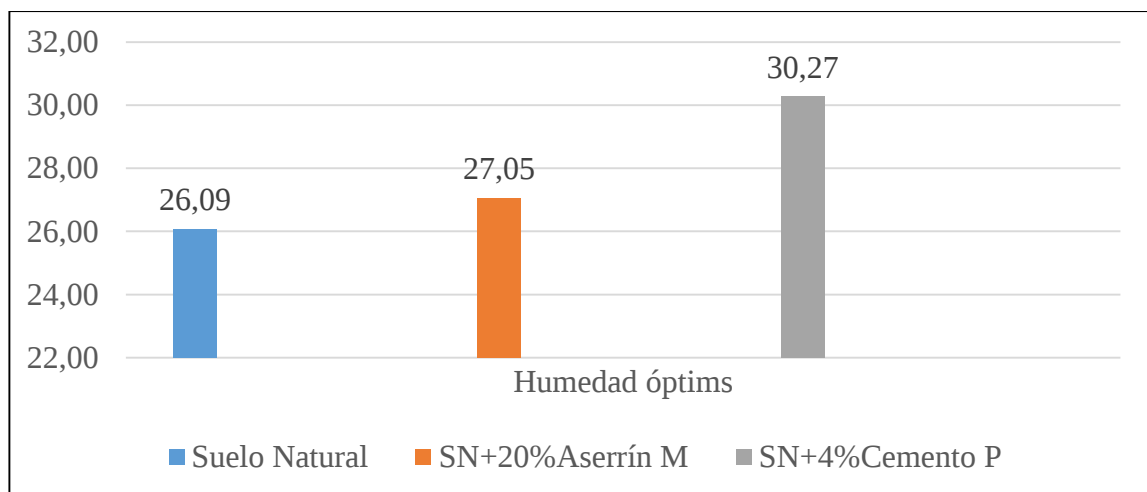
De acuerdo al Gráfico N° 35, el contenido de humedad óptimo obtenido del ensayo Proctor modificado, disminuye su valor con un mayor porcentaje de aserrín metálico y cemento portland, de 16,17 % para el suelo existente a 11,75 % con la adición de 20 % de aserrín metálico y un 13,27 % con la adición de 20 % de cemento portland. Aunque esta disminución es regular, se deduce, de acuerdo a su tendencia, que alcanza un valor mayor

para una adición de 20 % para ambos adictivos, luego, para porcentajes mayores de cemento y aserrín, la demanda de agua se puede incrementar indicando la cantidad de agua necesaria en el suelo para generar una correcta compactación del suelo, es así que los datos varían de acuerdo a la necesidad de cada estabilizador para llevar un adecuado funcionamiento.

El aserrín metálico, la humedad necesaria será la que se obtenga en los diferentes porcentajes, dados mediante ensayos del suelo natural por esta razón los porcentajes de aserrín metálico, se nota que hay una considerable disminución hasta un 11,75 % al 20 % , esto se debe a que su índice de plasticidad disminuye y por consiguiente este tiende a disminuir su humedad. Esto se debe también a la reducción del índice de plasticidad, que sufre la mezcla hasta convertirla en no plástica, esto se debe a su composición de óxido de calcio que presenta el aserrín metálico que hace que funcione como material estabilizante.

El cemento portland aplicado, a suelo estudiado como agente estabilizador necesita de una gran cantidad de agua debido, a su propiedad de absorción es así que se arrojan los valores hasta un 13,27% al 20 %, mencionando a mayor porcentaje de cemento portland, mayor humedad necesaria el motivo por el cual la humedad reduce es la formación de compuestos hidratados de silicato y aluminato de calcio. Estos compuestos tienen una alta capacidad de absorción de agua.

Gráfico N° 36. Análisis de la humedad óptima de la arcilla de alta plasticidad

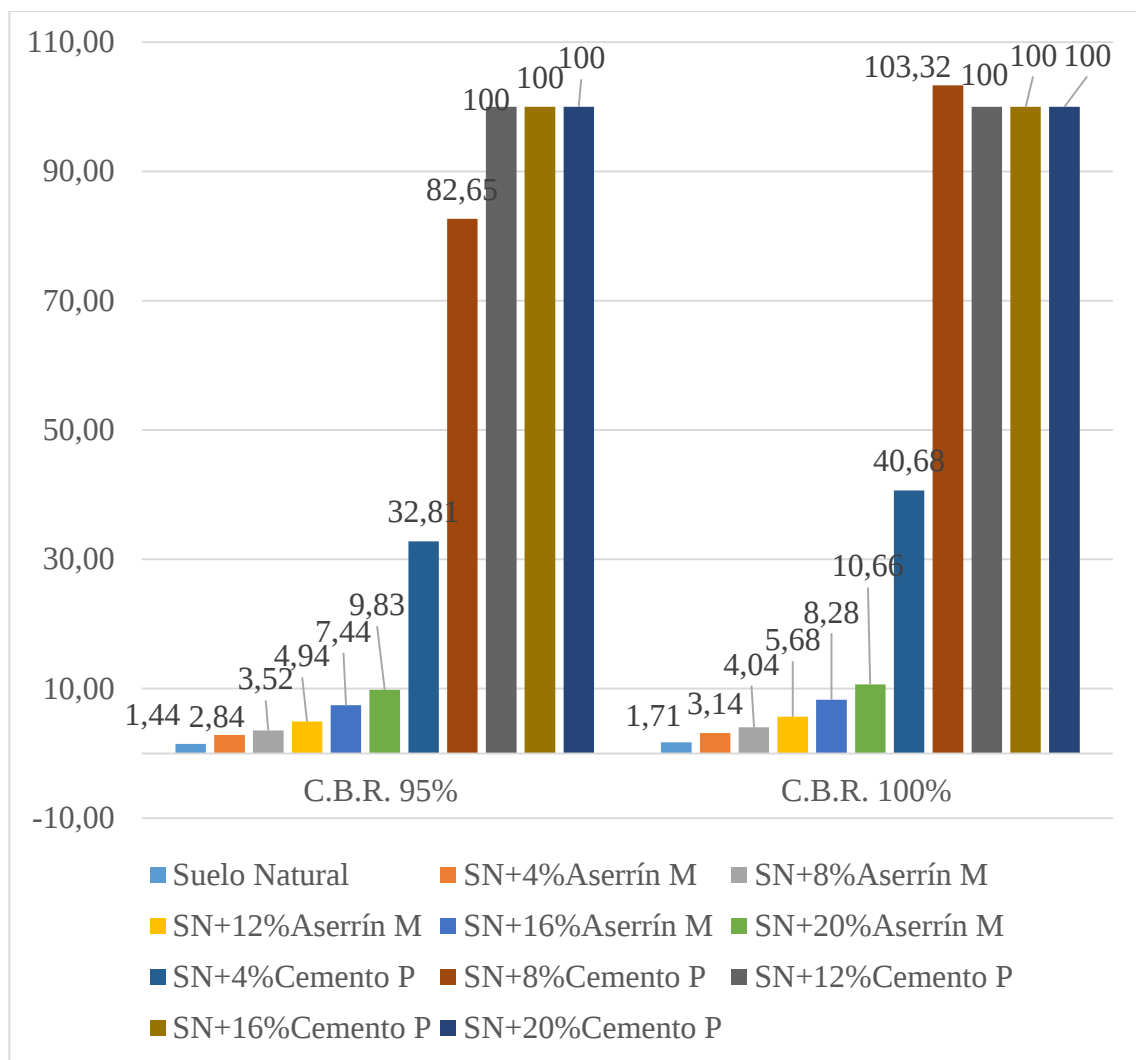


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo al Gráfico N° 36, de la muestra de alta plasticidad el contenido de humedad óptimo obtenido del ensayo Proctor modificado, al contrario aumenta su valor con un mayor porcentaje de aserrín metálico y cemento portland, de 26,09 % para el suelo existente a 27,05 % con la adición de 20 % de aserrín metálico y un 30,27 % con la adición de 4 % de cemento portland, esto sucede por ser de alta plasticidad requiere mayor humedad para compactar más si es con adictivos por eso son los resultados elevados de la humedad, por cierto estos porcentajes óptimos determinados con la muestra de baja plasticidad.

4.4. Comparación y análisis de la capacidad de soporte (C.B.R.)

Gráfico N° 37. Análisis de capacidad de soporte de la arcilla de baja plasticidad



Fuente: Elaboración propia

Los resultados, de la capacidad de soporte que se determinó para el suelo natural corresponde, a una arcilla de baja plasticidad CL de acuerdo a la identificación de suelos SUCS y un A-7-6 por AASHTO. Resultados que corresponde a 1,71 indicando que la muestra de suelo arcilloso es una subrasante muy pobre y debe ser estabilizada.

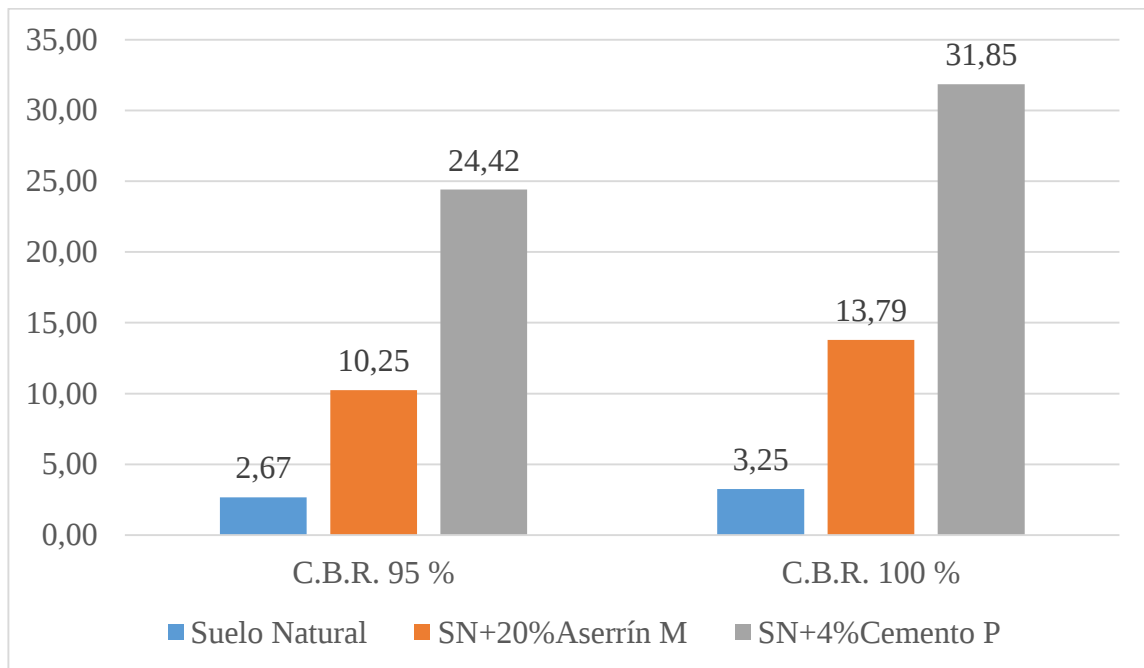
La capacidad portante, de la muestra mejora sustancialmente al aplicar los estabilizadores teniendo una variación de C.B.R., cuando es combinado con aserrín metálico el suelo arcilloso, dando como resultado de 2,84% al 4% hasta 8,83% al 20% de aserrín metálico en comparación al suelo natural de 1,44% , esto nos confirma que aditivo incrementa el CBR al 95%. Esto es debido al poder aglutinante que tiene este agente estabilizador, esto también se debe a una buena adherencia entre los dos materiales. En la composición química del aserrín metálico se observa que está formada por dióxido de silicio y óxido de calcio que son materiales estabilizantes. Estos elementos reaccionan ante la presencia de agua, generando una reacción expansiva de acuerdo a los datos de esponjamiento, resistiendo a la infiltración del agua.

Además, la acción de cemento portland aplicado a la muestra de suelo arcilloso presenta mayores variaciones con respecto al aserrín metálico esto ocurre una reacción química, durante este proceso, el cemento forma compuestos hidratados como el silicato y aluminato de calcio hidratados. Estos compuestos hidratados actúan como un aglutinante, teniendo la capacidad de unir las partículas de arcilla y formar una estructura más rígida y cohesiva, aumentando su capacidad portante del suelo dando como resultados con porcentajes de 4% da un CBR=32% hasta el 20% da un CBR=100% al 95% del CBR. Al aplicar estos altos porcentajes de cemento, aumenta a la capacidad portante, , que el porcentaje óptimo es el 4% debido a que es muy buena o excelente ya no es necesario aplicar más cemento por el tema de costos.

En los porcentajes 4 % y 8 %, se puede apreciar que el cemento portland que cuando se utilizó la máquina de capacidad de soporte en las lecturas se observó, que las deformaciones primeras, la lectura está en aumento, pero de un momento de repente disminuye, esto se debe a que ya llegó a su punto de falla del cemento portland llegando a su máxima resistencia del soporte y este se procede a romperse por ende disminuye la lectura.

En los resultados del 12 % al 20 % de cemento portland tiene un 100 % del C.B.R., no se procedió a colocar los moldes a la maquina por el motivo de que podría arruinarlo o deformarle el anillo de lecturación, esto me causaría una pérdida económica también por el hecho de que al 8% de cemento portland aumenta a un 82 % al 95% de CBR. Por eso no era necesario lecturar los demás porcentajes, pero si se hizo y se procedió a visualizar para ver si estaba muy endurecido así que no se procedió a lecturar directo se supuso que tenía un 100 % del C.B.R.

Gráfico N° 38. Análisis de capacidad de soporte de la arcilla de alta plasticidad



Fuente: Elaboración propia

Los resultados, de la capacidad de soporte que se determinó para el suelo natural corresponde, a una arcilla de alta plasticidad CH de acuerdo a la identificación de suelos SUCS y un A-7-6 por AASHTO. Resultados que corresponde a 3,25 indicando que la muestra de suelo arcilloso es una subrasante pobre y debe ser estabilizada.

En la muestra de la arcilla de alta plasticidad con los porcentajes óptimos determinados, con la arcilla de alta plasticidad se incrementó en un 13,79 al 20 %, de aserrín metálico hay un leve aumento ante la muestra de baja plasticidad, esto se debe que a que el suelo natural presentaba un estado más duro al lado de la otra muestra, mientras que el cemento

portland da como resultados al porcentaje del 4 % da un CBR=24% reduce a comparación con el suelo de baja plasticidad, esto se debe al intercambio de iones que se produce ya que la muestra de alta plasticidad tiene un límite líquido y un índice de plasticidad altos, como consecuencias de estos se forman vacíos convirtiéndolo la mezcla compactada más porosa y por consecuencia disminuye el CBR, pero el resultado está en el rango de buena subrasante.

El cemento portland y el aserrín metálico tienen la capacidad de reducir la expansión del suelo, en cuanto su efectividad del cemento es mayor al aserrín es porque la reacción química que se produce al mezclar suelo con cemento son diferentes al mezclar suelo con aserrín metálico. Las dos mezclas forman una matriz sólida que rodea las partículas de arcilla y las une entre sí, reduciendo su capacidad de expansión.

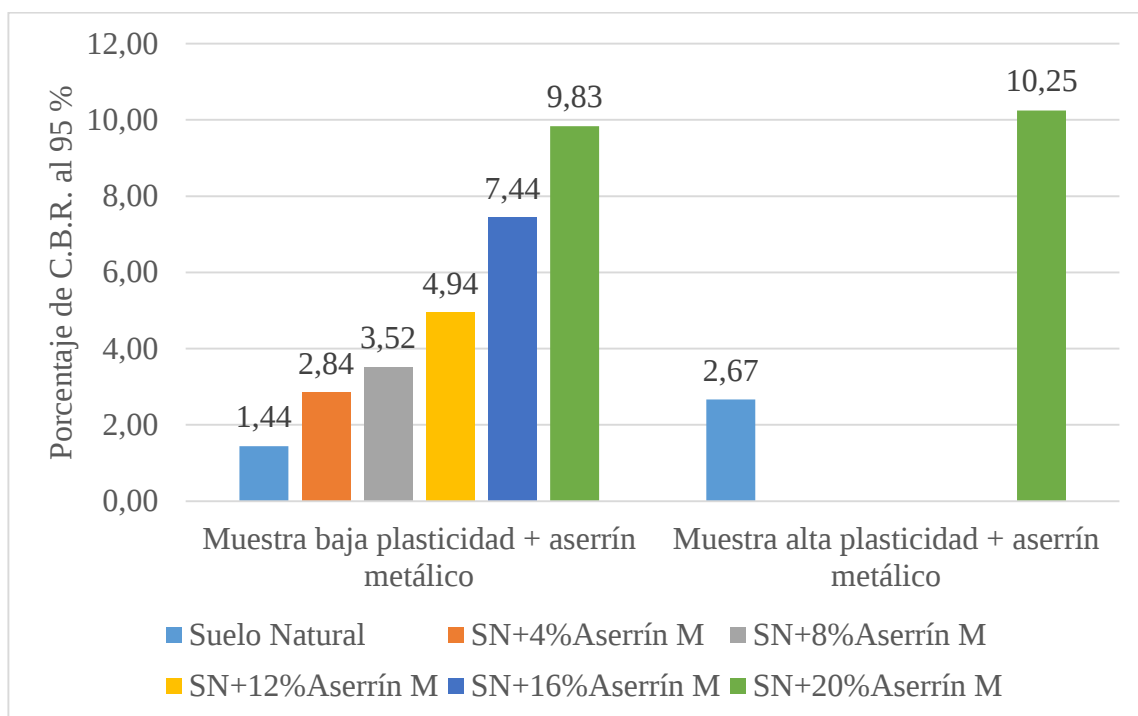
Al determinar el esponjamiento o expansión del suelo natural y cemento en las dos muestras diferentes que cuando colocamos cemento, al medir con el extensómetro hay una variación de lectura hasta llega a un tope en el segundo al tercer día de saturación después disminuye, la lectura debido a que ya no filtra agua a la probeta y este procede a su endurecimiento por ende disminuye su esponjamiento en el caso del cemento.

4.5. Verificación de la hipótesis

Una vez determinados los valores de C.B.R. de los suelos y sus correspondientes combinaciones con aserrín metálico se indica una comparación de resultados en los gráficos.

La combinación de aserrín metálico con el suelo arcilloso mejoró las propiedades del suelo de manera ínfima así se muestra en el gráfico.

Gráfico N° 39. Verificación y comparación suelo más aserrín metálico



Fuente: Elaboración propia

Ho= Hipótesis nula

Hi= Hipótesis alternativa

Ho= El uso de aserrín metálico no mejora el C.B.R. del suelo arcilloso.

Hi= El uso de aserrín metálico mejora el C.B.R. del suelo arcilloso.

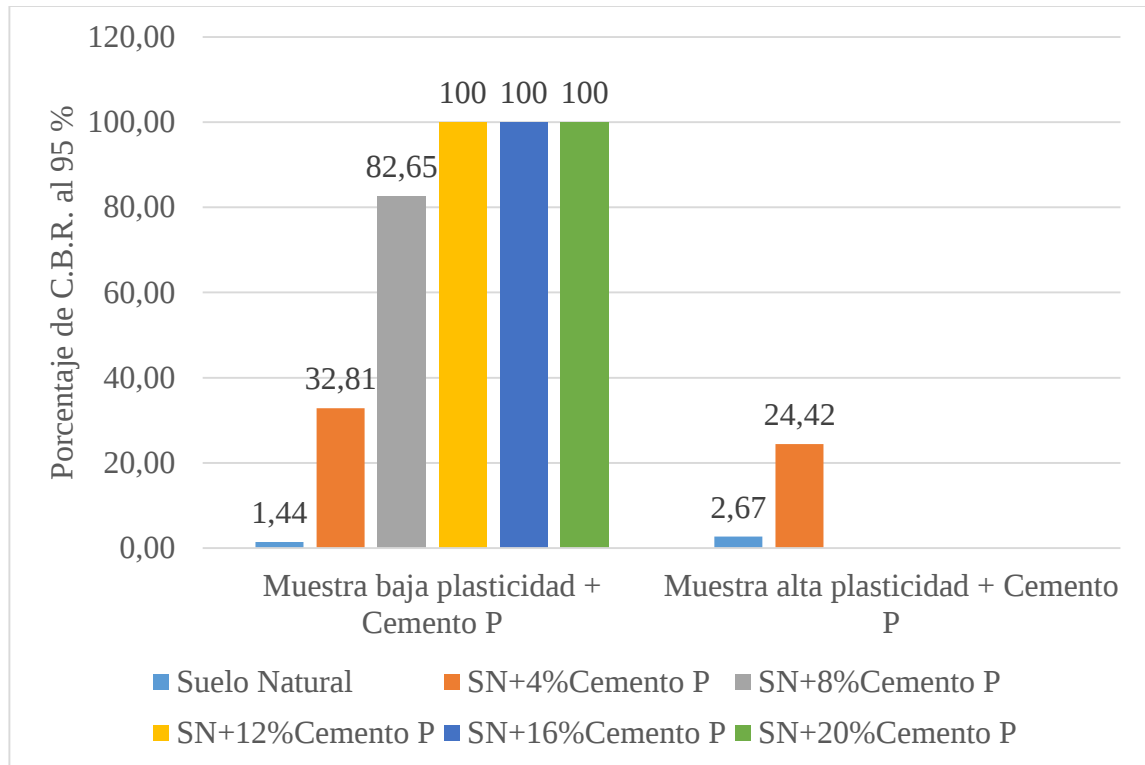
El uso del aserrín metálico mejoró de manera ínfima el suelo, se eligió el valor más alto de C.B.R. del suelo natural y se comparó con el valor de C.B.R. del suelo estabilizado.

El C.B.R. del suelo natural de baja plasticidad, aumentó en 9,33% con el 20% de aserrín metálico, no es del todo suficiente ya que se encuentra dentro del rango regular-bueno de una sub rasante, pero mejoró el C.B.R.

Pero en el C.B.R. del suelo natural de alta plasticidad, tiene un aumento de 10,25 con el 20% de aserrín metálico, tiene un leve aumento más que la muestra de baja plasticidad, pero no es del todo suficiente ya que se encuentra dentro del rango regular-bueno de una sub rasante, pero si mejoró el C.B.R. por el cual se aprueba la Hipótesis Alternativa (Hi) el uso de aserrín metálico mejora el C.B.R. del suelo arcilloso en ambas muestras estudiadas.

La combinación de cemento portland con el suelo arcilloso mejoró las propiedades del suelo de manera significativa así se muestra en el gráfico.

Gráfico N° 40. Verificación y comparación suelo más cemento portland



Fuente: Elaboración propia

Ho= Hipótesis nula

Hi= Hipótesis alternativa

Ho= El uso del cemento portland no mejora de manera significativa el CBR del suelo arcilloso.

Hi= El uso del cemento portland mejora de manera significativa el C.B.R. del suelo arcilloso.

El uso del cemento portland mejoró significativamente el suelo siendo este apto como sub rasante, se eligió el valor más alto de C.B.R. del suelo natural y se comparó con el valor de CBR del suelo estabilizado.

La capacidad de soporte del suelo aumentó su C.B.R. en un 32,81% correspondiente al 4% de cemento portland siendo éste el porcentaje óptimo para mejorar las propiedades y ser utilizado como una sub rasante muy buena se eligió este porcentaje por el costo de este

aditivo por ende no hace falta colocar más porcentaje de cemento porque este llega a su máxima capacidad de soporte de subrasante.

Con el análisis realizado se aprueba la Hipótesis Alternativa (Hi) el uso de cemento portland mejora de manera significativa el CBR del suelo arcilloso.

4.6. Evaluación técnica y económica de la propuesta de estabilización

La aplicación de este proyecto se lo hará para las subrasantes 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 solicitudes en nuestro medio.

4.6.1. Evaluación técnica

Para realizar la estabilización de este material suelo + aserrín metálico y suelo + cemento portland se tendrá que utilizar el porcentaje óptimo encontrado en los ensayos de laboratorio, debido a que cumplen con las especificaciones de resistencia y expansión en la subrasante 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.

Ubicación del material apto para utilizar

Para la ubicación del material apto para usar se tiene que conseguir cualquier tipo de aserrín metálico de una tornería o de diferentes trabajos con metales para después llevar a un lugar donde se aplicara para que cumpla con las condiciones de trabajabilidad y comodidad, así como también el cemento portland en fábricas de elaboración por mayor para la cantidad existente que pueda usarse para realizar la estabilización del suelo + aserrín metálico y suelo + cemento portland.

Preparación de la subrasante

Antes de colocar los adictivos, 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 subrasante natural del camino será preparada y acondicionada con maquinaria necesaria con un raspado y limpiado, como es arcilla se tendrá que pulverizar.

Método de colocación

El material será depositado y esparcido homogéneamente sobre la superficie de la subrasante natural del suelo, que será extendido con la motoniveladora, de manera uniforme, evitándose la formación de montones de material fino.

Distribución de los aditivos

La distribución más adecuada para lograr una distribución uniforme es haciéndolo manualmente y utilizando los dos aditivos en sacos, éstos se colocarán en hileras y filas regulares con la separación necesaria para la dosificación.

Como el aditivo 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 = Volumen del suelo a estabilizar m³

L = Longitud del tramo m

A = Ancho de la franja m

E = Espesor de la capa m

Conocido el volumen de suelo lo multiplicamos por el porcentaje del aditivo y obtenemos el volumen total del aserrín metálico y cemento portland.

Mezclado Uniforme de la mezcla suelo + aserrín metálico y suelo + cemento portland

La mezcla húmeda es la más usada y es la que se adiciona agua a la mezcla también 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.

Adición del Agua a la mezcla suelo y aditivos

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 este 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 4 % y 20 %.

Terminado y compactado del material

Por último, después de ser depositado, extendido y distribuido uniformemente el material estabilizante, 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.

4.6.2. Evaluación económica

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 + aserrín metálico y suelo + cemento portland en su respectivo contenido óptimo calculado en ensayos de laboratorio.

A continuación se realizará los precios unitarios respectivo que se necesitaran para la estabilización en caminos no pavimentados.

Tabla N° 44. Espesor de la capa a estabilizar

Capa	Espesor del suelo a estabilizar
	cm
	40

Fuente: Tratamiento. Diseño de espesores para estabilizaciones suelo-cemento: norma boliviana.

La estabilización de la subrasante debe tener el 4 % de cemento portland.

La estabilización de la subrasante debe tener el 20 % de aserrín metálico.

Cálculo de costos.

Para el cálculo de los costos para la estabilización se considera los siguientes datos de la vía.

Tabla N° 45. Longitud y ancho de la vía.

Datos de la vía		
Barrio Jesús de Nazaret		
Longitud de la vía:	100	m
Ancho de la vía:	7	m

Fuente: Elaboración propia

Calculamos cuantas bolsas de cemento se utilizará para m³ de estabilización suelo+cemento.

Densidad máxima del suelo natural es 1710 kg/m³

Para 4 % de cemento ($4 \% * 1710 \text{ kg/m}^3 = 68,4 \text{ kg de cemento/m}^3$)

Si una bolsa de cemento contiene 50 kg de peso

$68,4/50 = 1,36$ bolsas de cemento portland

Entonces se necesitará 1,36 bolsas o 68 Kg de cemento para 1 m³ de suelo.

Tabla N° 46. Análisis de precios unitarios por m3 con cemento

Datos Generales					
Proyecto:	Presupuesto de la subrasante estabilizada				
Actividad:	Subrasante estabilizada con suelo arcilloso + cemento portland				
Cantidad:	280,00		Moneda:	Bs.	
Unidad:	1 m3		N° Item:	2	

Descripcion	Unidad	Cantidad o Rendimiento	Precio Unitario	Costo Total
-------------	--------	------------------------	-----------------	-------------

1 Materiales					
1	Material fino seleccionado para subrasante	m3	1,25	100,00	125,00
2	Cemento portland	Kg	68,00	1,00	68,00
3	Agua	m3	0,09	4,24	0,39
Total Materiales					193,39

2 Mano de Obra					
1	Op. Volqueta	hr	0,35	16,50	5,78
2	Op. Camión Cisterna	hr	0,35	20,50	7,18
3	Op. Compactador	hr	0,35	21,00	7,35
4	Op. Tractor	hr	0,35	19,00	6,65
5	Op. Motoniveladora	hr	0,35	20,00	7,00
4	Ayudante	hr	1,00	15,00	15,00
Sub total Mano de Obra					48,95
Beneficios Sociales 65% del sub total M. O.					26,92
Impuestos IVA M.O. = 14,94% (del Sub Total de M. O. + Cargas Sociales)					11,34
Total Mano de Obra					87,21

3 Equipo, Maquinaria y Herramientas					
	Volqueta de 6 m3	hm	0,35	210,00	73,50
	Camion cisterna 4*4(agua)9000 lt	hm	0,35	148,31	51,91
	Rodillo liso vibratorio 101-135 HP	hm	0,35	295,00	103,25
	Tractor de orugas de 190-240 HP	hm	0,35	420,00	147,00
	Motoniveladora de 120-140 HP	hm	0,35	320,00	112,00
Herramientas Menores 5 % de la mano de obra					4,36
Total Equipo, Maquinaria y Herramientas					492,02

4 Gastos Generales y Adminsitrativos					
Gastos Generales 10% (1+2+3)					77,26

5 Utilidad					
Utilidad 10% (1+2+3+4)					67,99

6 Impuestos					
Impuestos I. T. 3,09% (1+2+3+4+5)					28,36

Total Item Precio Unitario (Bs.)				946,23
----------------------------------	--	--	--	--------

Fuente: Elaboración propia

Tabla N° 47. Análisis de precios unitarios por m3 con aserrín metálico

Datos Generales					
Proyecto:	Presupuesto de la subrasante estabilizada				
Actividad:	Subrasante estabilizada con suelo arcilloso + aserrín metálico				
Cantidad:	280,00		Moneda:	Bs.	
Unidad:	1 m3		N° Item:	1	

Descripcion	Unidad	Cantidad o Rendimiento	Precio Unitario	Costo Total
-------------	--------	------------------------	-----------------	-------------

1 Materiales					
1	Material fino seleccionado para subrasante	m3	1,25	100,00	125,00
2	Aserrín metálico	Kg	342,00	0,40	136,80
3	Agua	m3	0,09	4,24	0,39
Total Materiales					262,19

2 Mano de Obra					
1	Op. Volqueta	hr	0,35	16,50	5,78
2	Op. Camión Cisterna	hr	0,35	20,50	7,18
3	Op. Compactador	hr	0,35	21,00	7,35
4	Op. Tractor	hr	0,35	19,00	6,65
5	Op. Motoniveladora	hr	0,35	20,00	7,00
4	Ayudante	hr	1,00	15,00	15,00
Sub total Mano de Obra					48,95
Beneficios Sociales 65% del sub total M. O.					26,92
Impuestos IVA M.O. = 14,94% (del Sub Total de M. O. + Cargas Sociales)					11,34
Total Mano de Obra					87,21

3 Equipo, Maquinaria y Herramientas					
	Volqueta de 6 m3	hm	0,35	210,00	73,50
	Camion cisterna 4*4(agua)9000 lt	hm	0,35	148,31	51,91
	Rodillo liso vibratorio 101-135 HP	hm	0,35	295,00	103,25
	Tractor de orugas de 190-240 HP	hm	0,35	420,00	147,00
	Motoniveladora de 120-140 HP	hm	0,35	320,00	112,00
Herramientas Menores 5 % de la mano de obra					4,36
Total Equipo, Maquinaria y Herramientas					492,02

4 Gastos Generales y Adminsitrativos					
Gastos Generales 10% (1+2+3)					84,14

5 Utilidad					
Utilidad 10% (1+2+3+4)					74,04

6 Impuestos					
Impuestos I. T. 3,09% (1+2+3+4+5)					30,89

Total Item Precio Unitario (Bs.)				1,030,49
----------------------------------	--	--	--	----------

Fuente: Elaboración propia

Calculamos cuantas bolsas de aserrín se utilizará para m³ de estabilización suelo+aserrín metálico.

Densidad máxima del suelo natural es 1710 kg/m³

Para 20 % de cemento (20 % * 1710 kg/m³ = 342 kg de aserrín metálico/m³

Si una bolsa de aserrín metálico contiene 50 kg de peso

$342/50 = 6,84$ bolsas de cemento portland

Entonces se necesitará 6,84 bolsas de cemento para 1 m³ de suelo.

Tabla N°48. Análisis de costos de la estabilización de cemento portland y aserrín metálico

Costo de estabilización por 100 m de vía						
	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor (m)	volumen (m ³)	costo (Bs)	costo total(Bs)
Suelo arcilloso + cemento portland	100	7	0,4	280	946,23	264944,66
Suelo arcilloso + aserrín metálico	100	7	0,4	280	1030,49	288537,46

Fuente: Elaboración propia.

Si hacemos, un comparativo de costos en si el cemento portland tiene menor costo que el aserrín metálico, esto se debe a que su óptimo del cemento es el 4 % mientras que el aserrín es el 20 %, por ende, entrara más en un metro cubico y esto generara más costo en una estabilización de un camino no pavimentado.

En si los dos adictivos son viables porque su C.B.R., aumenta pero más el cemento portland por el tema del costo, esto nos quiere decir que el cemento es eficaz a la hora de estabilizar un camino no pavimentado, además que el cemento portland a la hora de encontrar material es más común para obtener este material en cambio el aserrín metálico es más complicado.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones

- Los ensayos de caracterización de las dos muestras de suelo natural, lo clasifican como una subrasante muy pobre ya que el CBR es inferior al 3% por lo que se recomienda su estabilización química.
- Se determinó el porcentaje de material fino que pasa el tamiz número 200, mediante el ensayo de la granulometría, lo cual nos dio como resultado lo siguiente, el suelo puro de las dos muestras de 95,14% y 62,9% arcilla de baja y alta plasticidad, pero a medida que aumentamos porcentaje al 20% de aserrín metálico y cemento portland, este reduce el valor de las arcillas, hasta volverse un limo de baja y alta plasticidad.
- La plasticidad del suelo está relacionada con la técnica de ensayo de límites de Atterberg, después de realizar los ensayos nos muestra que el aserrín metálico y cemento portland es un material no plástico, ya que en el suelo puro nos dio un índice de plasticidad de 22 % de baja plasticidad y 35 % de alta plasticidad, pero a medida que se aumentan los porcentajes de los dos adictivos, el índice de plasticidad de las mezclas fue reduciendo considerablemente, en el caso de la muestra de baja plasticidad al 20 % de aserrín metálico disminuyo al 9%, y al 20% de cemento portland redujo al 6% el índice de plasticidad, pero en la muestra de alta plasticidad al 20 % de aserrín metálico reduce al 25 % y al 4 % de cemento portland como resultado baja al 30 %. En conclusión, el cemento y el aserrín metálico ha demostrado mayor efectividad en la reducción de la plasticidad.
- Una vez realizado el presente proyecto experimental se determinó mediante los límites de Atterberg, que el suelo ensayado sustraído del Barrio Jesús de Nazaret fue un suelo CL y CH según la clasificación establecida en la tabla del SUCS, y según AASHTO se escogió A-7-6 una arcilla de baja y alta plasticidad, pero al incrementar al 20 % de aserrín metálico, dio en el sistema SUCS un suelo (ML y OH) y en AASHTO (A-4 y A-7-5) generando un cambio de arcilla a limo de baja y alta plasticidad, y en el caso del cemento portland al 4 % dio en el sistema SUCS un suelo OH y según AASHTO un A-7-5, cambiando de arcilla inorgánica a

orgánica. Esto quiere decir que a medida que se aumenta aditivo este cambia su clasificación llegando de arcilla hasta un limo.

- Mediante el ensayo CBR se evaluó y concluyó que a medida que aumenta, el porcentaje de aserrín metálico y cemento portland, va incrementando la capacidad portante para ambas muestras ya sea de baja y alta plasticidad estabilizadas siendo más evidente en la muestra, con cemento portland llegando a una excelente sub rasante y menor con aserrín metálico logrando una sub rasante regular – buena.
- A través de los ensayos realizados CBR se determinó que entre los cinco porcentajes utilizados 4%, 8%, 12%, 16% y 20% de aserrín metálico, el porcentaje óptimo para mejorar la capacidad de soporte es del 20% de aserrín metálico, mientras que la estabilización con cemento portland su porcentaje optimo está en 4 % por que ya alcanza una subrasante muy buena.
- A través de un gráfico N° 39 comparativo se logró establecer que al aumentar el 20% de aserrín metálico a la muestra arcillosa, el CBR aumentó de manera significativa siendo de 1,44% del suelo en estado natural hasta el 9,83% en la combinación de suelo natural arcilloso de baja plasticidad más el 20% de aserrín metálico, obteniendo una mejora de CBR del suelo del 8,39%, mientras que la muestra de alta plasticidad siendo el CBR 2,67% de suelo puro e incrementa hasta el 10,25% del CBR con aserrín metálico obteniendo una mejora de 7,58%.
- A través de un gráfico N° 40 comparativo se logró establecer que al aumentar el 4% de cemento portland a la muestra arcillosa, el CBR se incrementó significativamente siendo de 1,44% del suelo en estado natural hasta 32,81% la combinación de suelo natural arcilla más el 4% de cemento portland, obteniendo una mejora de CBR del suelo del 31,37% debido a que ya es una muy buena sub rasante, en cambio de la muestra de alta plasticidad siendo el CBR 2,67% del suelo puro e incrementando hasta un 24,42% con cemento portland mejorando un 21,75%.
- Se puede decir que a medida que se añade aserrín metálico y cemento portland la expansión del suelo tiende a disminuir respecto al suelo natural esto debido que el aserrín metálico y el cemento son materiales cementantes y no plásticos generando

una matriz sólida y rígida al muestra así reduciendo la expansión menor a 2 % para caminos no pavimentados.

- 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 aserrín metálico y cemento portland para modificar las propiedades del suelo de dicha mezcla, entonces se podrá analizar el Comportamiento físico-mecánico del suelo arcilloso con aserrín metálico y cemento portland, para validar la estabilización de esta técnica de estabilización de subrasantes en caminos no pavimentados en nuestro medio.
- Se concluyó que el aserrín metálico como también el cemento portland es un material óptimo e idóneo el cual fue un 4 % de cemento portland y el 20 % de aserrín metálico para la estabilización de suelos arcilloso, así lo demuestra los ensayos del presente trabajo experimental.
- En cuanto a la evaluación económica, se observó que la estabilización de suelo genera un impacto favorable en el presupuesto de un proyecto vial. Este efecto se atribuye a la mejora de las propiedades físicos mecánicas del suelo lo que conlleva a la disminución en los espesores requeridos del proyecto, y en consecuencia, una reducción del presupuesto.
- Finalmente podemos decir que el estudio realizado confirma tanto la hipótesis como los objetivos propuestos en la investigación, lo que confirma la factibilidad de utilizar aserrín metálico y cemento portland como material estabilizante.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda analizar más profundidad el aserrín metálico con diferentes ensayos. También de ver si la mezcla mixta entre cemento portland-aserrín metálico con el objetivo de reducir el porcentaje óptimo del cemento y así lograr un costo menor.

En cuanto a los ensayos determinados se recomienda que las muestras del suelo arcilloso estén secas para así no variar su humedad natural al echar agua y obtener datos precisos.

Antes de hacer cada ensayo se recomienda verificar el material a utilizar por sus diferentes errores que tiene (materiales viejos, errores en la balanza, materiales rotos malos

calibrados moldes que no se ajustan bien etc.) y esto origina malos resultados en la investigación.

Se recomienda utilizar las Normas correspondiente como indica cada una.

Una vez analizados los datos que refleja el presente proyecto experimental, se recomienda utilizar el aserrín metálico como alternativa para estabilizar suelos arcillosos.

El aserrín metálico 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 metal de buena resistencia, porque tiene mejores propiedades.

Se recomienda utilizar aserrín metálico reciclado, para evitar mayores costos en la estabilización del suelo con aserrín metálico, ya que el aspecto económico es muy importante en las obras vial