

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

El mejoramiento de las propiedades mecánicas del suelo es aplicado en obras ingenieriles, ya que a la hora de realizar o construir una obra vial nos encontramos con suelos que no poseen las condiciones físicas-mecánicas, lo cual el proceso de estabilización mecánica es uno de los más utilizados.

El grado de mejoramiento de las propiedades de los suelos finos, combinados con caucho granular para la subrasante, consiste en mejorar las propiedades mecánicas, aumentando resistencia de CBR y la disminución de su expansión.

En el contexto internacional, nacional y local existen varias investigaciones sobre estabilización de suelos en las cuales se utilizan distintos tipos de agentes estabilizantes y verifican el mejoramiento de sus propiedades mecánicas, no existen trabajos en el que se use caucho granular para el mejoramiento de suelos finos.

Un trabajo corresponde a Wilder Danny Cusquisibón Ocas quien realizó un: “Mejoramiento de suelos arcillosos utilizando caucho granular de neumáticos para fines constructivos de pavimento”.

El autor en este trabajo pretende analizar el mejoramiento de sus propiedades mecánicas de los suelos finos, combinados con caucho granular a distintos porcentajes, de tal manera que se pueda identificar sus mejoras para su aplicación en el diseño de obras civiles.

Este trabajo de investigación se basa en la teoría de estabilización de suelos para subrasantes con lo que se comprobará que el suelo fino sea apto para terreno de fundación mediante normas como ser la AASHTO y ASTM, su aplicación consiste en la estabilización de un suelo fino combinado con caucho granular mediante ensayos de laboratorio, que beneficiará en la construcción de obras viales, para la mejor transitabilidad de vehículos y por lo tanto un buen servicio para la población.

1.2 Situación problemática

En el estudio del mejoramiento de suelos finos utilizando caucho granular de neumáticos para fines constructivos de pavimentos, los suelos finos son un problema que el ingeniero civil debe solucionar para la construcción de diferentes obras, dentro de ellos la construcción de pavimentos.

La presencia de materiales naturales y su influencia en las obras de construcción es casi inevitable. Es por eso que debemos verificar y analizar con diferentes porcentajes de caucho en la compactación, para así poder comparar los resultados y ver si es factible la inclusión de polímero o no.

Es posible encontrar suelos finos en las etapas de movimiento de tierras para la construcción de una obra, especialmente de pavimentos, por eso la necesidad de abordar este análisis de suelo con la incorporación de caucho granular para optar uno de muchas formas de mejorar un suelo fino, el suelo al no ser estable o consistente nos puede traer problemas a futuro con asentamientos. (consolidación a largo plazo).

Es necesario el análisis de cómo afecta el caucho en un mejoramiento de una estabilización de suelos finos y como varia sus resistencias compactándolas con diferentes porcentajes de caucho.

Sabemos que el caucho que provienen de gomas es una contaminación mundial que afecta mucho al medio ambiente, pero existen muchas formas de reciclar este material y uno de esos métodos lo estudiaremos en este tema.

1.2.1 Formulación del problema

¿Cuál es el efecto de caucho granular de neumáticos en la estabilización de suelos finos de subrasante?

1.2.2 Delimitación temporal

La presente investigación tendrá su validez hasta que las condiciones del terreno donde se ha extraído el material cambien, en síntesis, las propiedades mecánicas, químicas y físicas del suelo en estudio o presenten características diferentes a los resultados encontrados en este proyecto.

1.2.3 Delimitación espacial del problema

Área de trabajo: Esta en el área de suelos finos.

Base de operaciones: Pruebas en laboratorio de suelos.

Aplicación: Para la estabilización de suelos en Carreteras.

1.3 Justificación de la investigación

Actualmente, hay una necesidad de cuidar la naturaleza para brindar a la humanidad un ambiente saludable en beneficio de la generación presente y futura; por lo cual, la investigación debe buscar, en todos los campos de la actividad humana, prácticas y productos más amigables con el medio ambiente; y es en este enfoque que se realiza este trabajo.

Lo cual este proyecto pretende realizar un análisis del mejoramiento de las propiedades de los suelos finos, combinados con caucho granular a distintos porcentajes, de tal manera que se pueda observar como varían sus propiedades mecánicas de resistencia CBR y expansión mediante ensayos de laboratorio, por lo que el empleo de esta técnica puede resultar siendo una solución adecuada.

En cercado - Tarija, no se han realizado trabajos de investigación de mejoramiento de suelos finos propio del lugar del proyecto con caucho granular, es por eso que sacamos muestras de diferentes partes del tramo en estudio para tener muestras distribuidas y tener datos generalizados en todo el tramo, al tratarse de un suelo fino homogéneo y que este está en proceso de ejecución con cortes a cielo abierto, es por eso que la extracción de las calicatas de trabajo se lo puede obtener en todo el ancho y largo del tramo pero siguiendo las normas de extracción de muestras, para que así los resultados obtenidos se puedan aplicar en cualquier punto que necesite estabilizar del tramo.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Analizar el mejoramiento de las propiedades de suelos finos, combinados con caucho granular a distintos porcentajes, a través de los ensayos de CBR, para el mejoramiento

en la estabilización de suelos finos.

1.4.2 Objetivos específicos

- Realizar extracción de muestras de suelos de la subrasante en estudio, a través de calicatas.
- Obtener caucho granular para el desarrollo del estudio.
- Determinar las propiedades físico - mecánicas de los suelos finos y del caucho granular, realizando ensayos de laboratorio.
- Realizar los ensayos de compactación y CBR de los suelos finos haciendo variar diferentes porcentajes de caucho granular, para la obtención de diferentes resultados de estabilización.
- Analizar el desempeño de los suelos finos en natural y con la presencia de caucho granular, para definir el mejoramiento en la estabilización.
- Determinar el porcentaje óptimo de la mezcla de subrasante con la adición de caucho.
- Comparación de costos entre la estabilización con material aluvial y caucho granular.

1.5 Formulación de la hipótesis

Si, se adiciona caucho granular en diferentes porcentajes a un suelo fino, será posible mejorar su capacidad de soporte (CBR) con la finalidad de estabilizar sub rasantes en suelos finos.

1.6 Operacionalización de las variables

- Variable independiente

Porcentaje de caucho granular en el suelo fino.

- Variable dependiente

Estabilización por medio de CBR.

1.6.1 Conceptualización y operacionalización de las variables

Tabla 1.1 Variable independiente

Variable independiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Unidad
Porcentaje de caucho granular en suelo fino	Son diferentes cantidades de caucho granular, que se adiciona respecto a la cantidad del suelo seco	Clasificación del suelo fino	Granulometría	Según normas AASHTO y SUCS
			L.L.	
		L.P.		
Í.P.				
Compactación			I.G.	
			Humedad óptima	%
			Densidad máxima	gr/cm ³

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1.2 Variable dependiente

Variable dependiente	Concepto	Dimensión	Indicador	Acción
Estabilización por medio de CBR	Se refiere a la comparación de los valores obtenidos, con los parámetros poblacionales que indican las especificaciones técnicas.	12 golpes	Densidad seca	gr/cm ³
		25 golpes	Expansión	%
		56 golpes	CBR	%

Fuente: Elaboración propia.

1.7 Identificación del tipo de investigación

Según su aplicación, esta investigación fue de tipo aplicada porque se basó en conocimientos existentes, sobre los diferentes procesos y materiales, para el mejoramiento de suelos finos con caucho granular utilizable para la construcción de pavimentos por la sociedad y que contribuya a la conservación del medio ambiente. También por su fin, es de tipo proyectiva porque se orienta a elaborar una propuesta dirigida a resolver un problema existente en la sociedad. Asimismo, por la naturaleza de la información a recolectar, es de tipo experimental ya que se ha manipulado diversas variables para evaluar sus efectos y resultados.

1.7.1 Selección de programa a utilizar

El programa que se va utilizar es el Word y Excel.

1.7.2 Estadística descriptiva

La información cuantitativa, que se obtuvo de los análisis que se realizaron a los prototipos fue procesada mediante técnicas estadísticas para determinar las diferencias de los prototipos, que se elaboran según los diferentes porcentajes de suelo/caucho. Para tal efecto, se usó programas computarizados como Microsoft Excel; con el que se obtuvo los CBR.

1.7.3 Estadística inferencial para comprobar la hipótesis formulada

Este estudio tendrá como finalidad de ver cómo afecta en los diferentes porcentajes de adición de caucho a una arcilla determinada, que con el trabajo de gabinete realizado se podrá obtener la información de CBR que obtendrán los suelos, con ello encontrar el porcentaje óptimo de caucho para saber que efecto causara al terreno y las estructuras.

1.7.4 Limitaciones de la investigación

Para la investigación se han realizado los ensayos de suelos en el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho, sin embargo, es probable que los equipos del laboratorio no sean los suficientes para todo el avance de este tema por la gran demanda de estudiantes en este 2do periodo del año en curso por lo que se reconoce este limitante.

1.7.5 Viabilidad de la investigación

La investigación se basa en la recolección de muestras de suelo de la zona de la 2da circunvalación mediante calicatas; asimismo, mediante los ensayos de laboratorio realizados a las muestras extraídas se obtendrá las características propias del suelo y por ende podremos conocer el comportamiento del suelo; cabe precisar se cuenta con información variada, teórica y estudios realizados que confirman la viabilidad de la investigación.

1.7.6 Relevancia y factibilidad del problema

La importancia de realizar dicha investigación se basa en la utilidad de los datos obtenidos para presentes y futuros proyectos de la ingeniería civil y vías que pueden ser utilizados o tomados en cuenta para diferentes propósitos de investigación en relación con la estabilización de suelos (CL).

Entonces podemos asumir que el presente proyecto si es factible, por el hecho de que contamos con los materiales y equipos adecuados que nos brinda el laboratorio de la universidad UAJMS a un costo mínimo para realizar la investigación uno de ellos es el CBR equipo que es adecuado y moderno para la recolección de datos.

1.7.7 Identificación del tipo de diseño de investigación

El tipo de diseño es el Diseño Cuasi Experimental donde los porcentajes de adición de caucho son controlados.

Es un proyecto de investigación explicativa, implica buscar una relación causal entre dos o más variables y las causas que ocasionan un problema.

1.8 Criterios metodológicos de la investigación

1.8.1 Unidad de estudio y decisión muestral por variable

1.8.2 Unidad de estudio o muestreo

La unidad de estudio o muestreo serán los ensayos de CBR de suelos finos combinados con caucho granular a distintos porcentajes.

1.8.3 Población y muestra

- **Población:** Todos los ensayos de caracterización de suelos finos (CL).
- **Muestra:** Ensayos de CBR.

1.8.4 Tamaño de la muestra

El tamaño de la muestra se calculará mediante el método de proporciones de población finita, para luego obtener el tamaño de la muestra ahora conocida se desarrollará el cálculo de muestra estratificada por fijación proporcional.

1.8.5 Selección de las técnicas de muestreo

La técnica de muestreo que optamos por seguir es el método del muestreo probabilístico:

-Muestreo estratificado por fijación proporcional.

Formula:

$$n = \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N \left(\frac{e}{Z}\right)^2 + \frac{\sum_{i=1}^n N_i \sigma^2}{N}}$$

Donde:

n= Tamaño de la muestra.

N= Población.

e= Margen de error.

Z= Variable estandarizada.

σ^2 = Varianza de acuerdo al tiempo asignado.

Cálculo de muestra:

$$n = \frac{6,4}{64\left(\frac{0,05}{1,96}\right)^2 + \frac{6,4}{64}} \quad n = 45 \text{ ensayos}$$

Tabla 1.3 Nivel de confianza

Nivel de confianza	50	75	80	85	90	95	96	97	98	99
Z	0.574	1.15	1.28	1.44	1.64	1.96	2.05	2.17	2.33	2.58

Fuente: Elaboración propia

Tabla 1.4 Confiabilidad

Confiabilidad	95%
Margen de Error	± 5 %
Distribución Normal Z	1,96
Desviación Estándar	0,1

Fuente: Elaboración propia.

1.8.6 Población finita (muestreo estratificado)

Tabla 1.5 Muestreo estratificado

Estracto	Fase de la investigación	Nombres de los ensayos	Cantidad de los ensayos	desv	Ni*Desv	fi	ni
1	Análisis granulométrico	Granulometría	10	0,1	1	0,1563	7
2	Límites de atterberg	Límite líquido	10	0,1	1	0,1563	7
		límite plástico	10	0,1	1	0,1563	7
3	Contenido de humedad	C.H.O	10	0,1	1	0,1563	7
4	Proctor modificado	Proctor modificado en condiciones normales	3	0,1	0,3	0,0469	2
		Proctor modificado adicionando el 5% de caucho granular	3	0,1	0,3	0,0469	2
		Proctor modificado adicionando el 10% de caucho granular	3	0,1	0,3	0,0469	2
		Proctor modificado adicionando el 15% de caucho granular	3	0,1	0,3	0,0469	2
5	California Bearing Ratio (CBR)	CBR en condiciones normales	3	0,1	0,3	0,0469	2
		CBR adicionando el 5% de caucho granular	3	0,1	0,3	0,0469	2
		CBR adicionando el 10% de caucho granular	3	0,1	0,3	0,0469	2
		CBR adicionando el 15% de caucho granular	3	0,1	0,3	0,0469	2
n = 45 Ensayos			64		6,4		45

Fuente: Elaboración propia.

1.9 Métodos y técnicas empleadas

1.9.1 Método

En la investigación se realizará ensayos en el laboratorio característicos de clasificación de suelos siguiendo la norma indicada y verificación de la resistencia, posteriormente se hará un análisis de datos.

1.9.2 Experimentos y técnicas

- Análisis granulométrico (ASTM D-422 - AASHTO T-88).
- Determinación del contenido de humedad
- Determinación del límite líquido y límite plástico de los suelos (ASTM D-4318 AASHTO T-89).
- Clasificación de suelos (Aashto y Sucs)
- Compactación (ASTM D-1557 - AASHTO 180).

- Relación de soporte de california CBR (ASTM D-1883-99).

Todo esto con la finalidad de ver las características que presentan los suelos finos, y se analizará el mejoramiento de los suelos al combinarlo con distintos porcentajes de caucho granular, de tal manera permita al investigador partir de la observación que enmarcan el problema de investigación.

1.9.3 Descripción de los instrumentos para la obtención de datos

Son los equipos y materiales estandarizados de laboratorio de suelos de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho empleados para la realización de los ensayos del presente trabajo los cuales fueron mencionados anteriormente.

1.10 Procedimiento de aplicación

- Se realizará un muestreo a cada una de las zonas para obtener los tipos de suelos finos y la extracción de las muestras por debajo de los 30 cm para evitar extraer desechos orgánicos.
- Las muestras deben ser identificadas adecuadamente por medio de ensayos de clasificación en laboratorio (granulometría, límites, compactación y CBR).
- Después de realizar la caracterización de los suelos naturales será combinado con distintos porcentajes de caucho granular (5%, 10%, y 15%).
- Al combinar la muestra con el caucho granular se debe realizar los ensayos de compactación y CBR.
- Se ejecutarán los cálculos, y resultados que permitirán verificar la incidencia del caucho granular en los suelos finos.

1.11 Alcance de la investigación

En la investigación se contempla el análisis de los suelos finos cuyas características son las que presentan menores resistencias, por lo cual se busca mejorar sus propiedades combinándolos con caucho granular a distintos porcentajes, aumentando su capacidad de resistencia.

Para el presente proyecto se usará muestras de suelos finos de baja compresibilidad clasificadas como arcillas CL debido a que en Tarija existe una variabilidad de tipos de arcillas y realizar el estudio de cada una de ellas requiere bastante tiempo y uso de equipos de laboratorio ya que los mismos son prestados por la universidad con un pago económico

mínimo por su uso y aun tiempo limitado por tal motivo el estudio solo será analizado para arcillas CL.

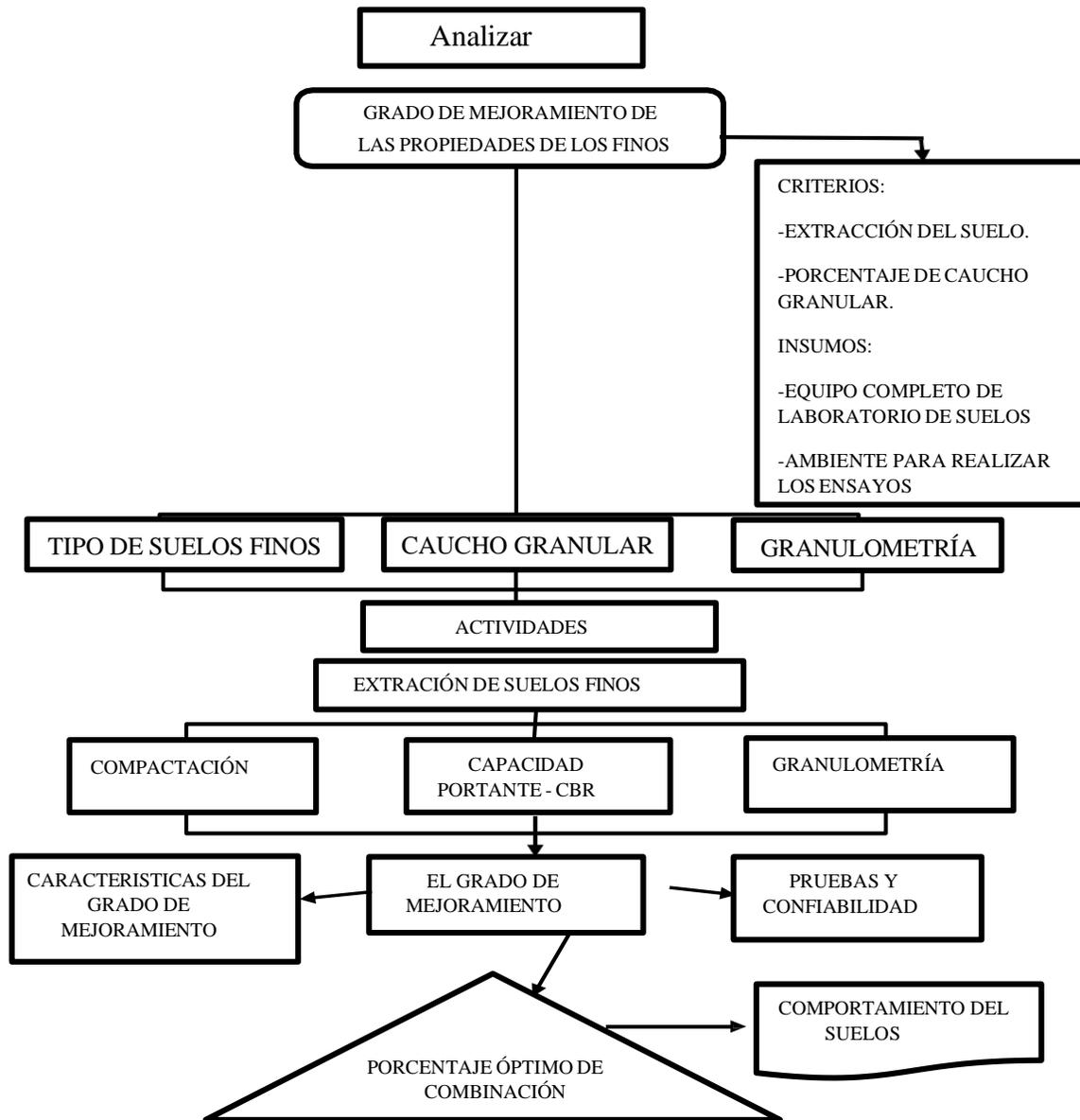
Se clasificará por medio de los métodos de clasificación AASTHO (American Association of State Highway and Transportation Officials) y el sistema de clasificación unificado USCS (Unified Soil Classification System).

Para la realización de los ensayos de granulometría, límites de Atterberg, compactación, resistencia CBR, se realizará una cantidad de ensayos en laboratorio cuyo procedimiento y equipos a ser utilizados en laboratorio estarán regidos bajo las especificaciones de la normas AASHTO y ASTM que están plasmados en el manual técnico para el diseño de carreteras en Bolivia (volumen 4 “Manual de ensayo de suelos y materiales”), y con el equipo disponible en el laboratorio de la Universidad Autónoma Juan Misael Saracho.

Para las interpretaciones de los resultados se usarán gráficas donde se podrá apreciar la variación de la resistencia CBR, debido a los distintos porcentajes de caucho granular.

El alcance principal del trabajo de investigación es comprobar, si al combinar el suelo fino con caucho granular a distintos porcentajes este mejorara la capacidad portante CBR, para el uso de transitabilidad de vehículos y así mismo un buen servicio para la población.

1.10.1 Esquema de actividades en función a la perspectiva.



1.10.2 Análisis de resultados

Para recopilar la información se usaron métodos cualitativo y cuantitativo. El método cuantitativo se usó para evaluar las características de los suelos finos sin combinación con el caucho granular y en combinación con el caucho granular; para lo cual se emplearon las máquinas y los equipos del Laboratorio de la U.A.J.M.S, tales como: Mallas ASTM (tamices), taras, balanzas, estufa, molde cilíndrico metálico de 4", pistón de 4.536 kg, martillo, pesas, prensa de ensayo, etc.

El método cualitativo, se usó para obtener información acerca del proceso de mejoramiento de suelos finos.

Para las muestras combinadas con caucho se usó la humedad óptima (asignada con 0%, 5%, 10% y 15% de caucho), procediendo a observar la trabajabilidad en cada una de ellas. El compactado se realizó con normalidad siempre conservando la igualdad de condiciones para cada nivel de compactado y al final se hizo el curado de los especímenes que fue durante el periodo de 96 horas, de esa manera se garantiza la saturación al 100 %, después se puede realizar el corrido del CBR.

CAPÍTULO II

ANÁLISIS DEL MEJORAMIENTO EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS FINOS UTILIZANDO CAUCHO GRANULAR

2.1 Principales tipos de suelos

De acuerdo con el origen de sus elementos, los suelos se dividen en dos amplios grupos; suelos cuyo origen se debe a la descomposición física o química de las rocas, o sea de los suelos inorgánicos, y los suelos cuyo origen es principalmente orgánico.

Si en los suelos inorgánicos el producto del interperismo de las rocas permanece en el sitio donde se formó, da origen a un suelo residual; en caso contrario, forma un suelo transportado, cualquiera que haya sido el agente transportador (por gravedad: talud; por agua: aluviales o lacustres; por viento: eólicos; por glaciares: Depósitos glaciares).

En cuanto a los suelos orgánicos, ellos se forman casi siempre in situ. Muchas veces la cantidad de materia orgánica, ya sea en forma de humus o de materia no descompuesta o en estado de descomposición, es tan alta con relación a la cantidad de suelos inorgánicos que las propiedades que pudiera derivar de la porción mineral quedan eliminadas. Esto es muy común en las zonas pantanosas en las cuales los restos de vegetación acuática llegan a formar verdaderos depósitos de gran espesor, conocidos con el nombre genérico de turbas. Se caracterizan por su color negro o café oscuro por su poco peso cuando están secos y su gran compresibilidad y porosidad.

2.2 Identificación de suelos

El límite entre ambas fracciones está dado por la posibilidad de la distinción de sus partículas a simple vista.

- **Grava - Arena**

Materiales de la fracción gruesa (% pasa tamiz N°200 < 50%)

- **Limo – Arcilla**

Materiales de la fracción fina (% pasa tamiz N°200 > 50 %).

Existen cuatro métodos de clasificación e identificación de suelos expansivos.

- Primero, la experiencia local indicará si existen suelos potencialmente expansivos.
- La identificación mineralógica y tipo de mineral de arcilla son útiles en la identificación de suelos potencialmente expansivos, pero no determinan la magnitud de hinchamiento del suelo.
- Los métodos indirectos tales, como las Propiedades Índice, Clasificación, Potencial a Cambios Volumétricos (PVC), Actividad, son excelentes herramientas para evaluar el potencial de hinchamiento de suelos, pero no se deben usar independientemente, y se requiere de la determinación de más de una prueba para evitar conclusiones erróneas.
- Los métodos directos ofrecen la mejor opción para determinar el potencial de encogimiento e hinchamiento de un suelo. La prueba de Consolidación e Hinchamiento sobre muestras no-alteradas (ASTM D-4546) ofrece un método directo para evaluar el hinchamiento-encogimiento de suelos y los parámetros necesarios para el diseño de cimientos sobre suelos expansivos. (Nadeo, 2007).

2.2.1 Textura del suelo

La textura del suelo está relacionada con el tamaño de las partículas minerales. Se refiere a la proporción relativa de los tamaños de varios grupos de partículas de un suelo. (Sampat A. Gavande, 1991).

El término textura se usa para representar la composición granulométrica del suelo. Cada término textural corresponde con una determinada composición cuantitativa de arena, limo y arcilla. En los términos de textura se prescinde de los contenidos en gravas; se refieren a la fracción del suelo que se estudia en el laboratorio de análisis de suelos y que se conoce como tierra fina. Por ejemplo, un suelo que contiene un 25% de arena, 25% de limo y 50% de arcilla se dice que tiene una textura arcillosa.

Los gránulos cuyo tamaño excede los 2 mm reciben el nombre de grava y no se considera en los análisis de suelos, los otros se dividen en tres clases, según su diámetro, las partículas entre 2 y 0,02 mm se llaman arena; las de diámetro de 0,02 y 0,002 se llaman limo, y aquellas cuyo diámetro medio es igual o inferior a 0,002 mm forma la arcilla. (Carrasco J.M. 1981).

2.2.2 Porosidad

Representa el porcentaje total de huecos que hay entre el material sólido de un suelo. Es un parámetro importante porque de él depende el comportamiento del suelo frente a las fases líquida y gaseosa, y por tanto vital para la actividad biológica que pueda soportar.

Llámesse porosidad el volumen total de los poros en la unidad de volumen de suelo. La porosidad total se compone de la porosidad capilar y la porosidad no capilar. Dentro de los poros capilares por lo general hay aire y se encuentra agua retenida por las fuerzas del menisco (curva de la superficie de un líquido que se produce en respuesta a la superficie de su recipiente).

Desde el punto de vista agronómico es conveniente que los suelos tengan gran volumen de suelos capilares no menor de 20-25% de la porosidad total.

Los suelos con porcentajes mayores del 70%, tienen una capacidad de porosidad excesiva, estos son suelos esponjosos, los suelos de porosidad excelente sus valores oscilan entre el 55-65% de porosidad son suelos bien cultivados, los suelos con porosidades menores de 50% tienen una porosidad no satisfactoria para la capa arable y valores de 40-25% poseen porosidad demasiado baja.

2.2.3 Capacidad de saturación de agua

Es la cantidad de agua para llenar todos los espacios de poros entre las partículas de suelo, es decir el límite superior del contenido de humedad. Para que los suelos estén saturados es necesario que todo el aire retenido en los espacios de los poros sea reemplazado con agua. Algunas veces a la saturación se le denomina capacidad máxima de retención de agua o poder retentivo para el agua.

La alta cantidad de materia orgánica, ayuda a que los índices de saturación aumentan considerablemente con el contenido de materia orgánica.

Según la apreciación de la capacidad de adsorción de agua en el suelo se puede definir según los siguientes parámetros 40-50% optima, 30-40% buena, 25-30 satisfactoria, <25 no satisfactoria.

2.3 Teoría de las arcillas

La Arcilla es un tipo de Roca Natural Sedimentaria. Proviene de la descomposición de las Rocas Feldespato, siendo un silicato alumínico hidratado. Puede ser un elemento suelto o puede estar formando una masa en estado sólido, puede ser coherente o incoherente. Es un material terroso de grano generalmente fino y capaz de convertirse en una masa plástica al mezclarse con cierta cantidad de agua.

Conserva su forma inicial después del secado, adquiriendo a la vez la suficiente dureza para ser manejada. La Arcilla no se transforma en cerámica hasta que toda el agua que contiene de manera natural y química se elimina por el calor; cuando esto sucede al cocerlo en el horno, el producto que resulta posee una dureza y un estado inalterable a veces incluso mayor que el de algunas clases de piedra.

El suelo arcilloso es aquél en el que predomina la arcilla sobre otras partículas de otros tamaños. La arcilla es un conjunto de partículas minerales muy pequeñas, de menos de 0,001 mm. de diámetro, en contraposición a otras partículas más grandes como son el limo y la arena, por orden de tamaño, de menor a mayor. Un suelo arcilloso tendrá también parte de limo y de arena, pero predominará la arcilla, en distintas proporciones según el suelo en cuestión. (Quesada, 2008).

2.3.1 Características de las arcillas

- Material de estructura laminar.
- Sumamente hidrocópico.
- Su masa se expande con el agua.
- Con la humedad se reblandece y se vuelve plástica.
- Al secarse su masa se contrae en un 10%.
- Generalmente se le encuentra mezclada con materia orgánica.
- Adquiere gran dureza al ser sometida a temperaturas mayores a 600°C.

2.3.2 Clasificación de las arcillas

Cada una de las propiedades de la Arcilla puede dar lugar a una clasificación distinta. Así pues, puede clasificarse según su color, su temperatura de cocción, sus propiedades plásticas, su porosidad después de la cocción, su composición química, etc.

Suelos Gruesos: Partículas mayores a los 74μ (0,074 mm).

Suelos Finos: Partículas menores a los 74μ .

Suelos Gruesos: Las fuerzas que gobiernan su comportamiento son fundamentalmente las de gravedad. (gravas y arenas)

Suelos Finos: Las fuerzas que gobiernan su comportamiento son fundamentalmente en las arcillas, las de atracción y repulsión de origen físico - químicas. (arcillas y limos)

2.3.3 Origen de las arcillas

La arcilla es un silicato de aluminio hidratado, en forma de roca plástica, impermeable al agua y bajo la acción del calor se deshidrata, endureciéndose mucho. Desde el punto de vista químico está compuesta de silicio (Si), aluminio (Al), oxígeno (O) e hidrógeno (H). Las partículas que conforman la arcilla son de menos de 0,002 mm.

La época moderna ha incorporado a las arcillas en numerosos productos de uso cotidiano a través de las nuevas tecnologías de modo que, aunque no lo percibamos, las arcillas forman parte importante de nuestras vidas. Un ejemplo son los nuevos materiales poliméricos que incluyen en su composición las arcillas minerales con el fin de lograr superficies suaves al tacto y propiedades mecánicas mejoradas.

Figura 2.1 Arcillas: Partículas menores a 2μ



Fuente: Jiménez Salas

2.3.3.1 Suelos arcillosos e ingeniería civil

Los suelos arcillosos son los materiales geológicos más contradictorios desde el punto de vista de su utilidad en ingeniería civil. Son fuente inagotable de problemas de estabilidad en buen número de obras, pero constituyen por sí mismas un material de valiosas propiedades ingenieriles. Por otro lado, durante los últimos años, las arcillas han cobrado un interés especial en la medida que constituyen potenciales emplazamientos de repositorios de residuos nucleares de alta actividad o se considera su empleo en las barreras de ingeniería previstas para retardar o evitar la migración de radionucleidos y su interacción con la biosfera. Para la mayor parte de actuaciones sobre el terreno, las propiedades que determinan el comportamiento de un suelo pueden determinarse a partir de ensayos estandarizados de laboratorio más o menos laboriosos. La mayor parte de estos ensayos se ocupan de la evaluación de parámetros tales como el contenido de humedad, permeabilidad, porosidad, densidad, forma y tamaño de las partículas (granulometría), estructura, plasticidad, capacidad de hinchamiento, etc. Sin embargo, hay situaciones en las que es importante comprender por qué un suelo se comporta de la manera que lo hace antes de poder aplicar una solución geotécnica adecuada a un problema. Para ello es necesario conocer el suelo no sólo desde el punto de vista macroestructural sino también del microestructural, esto es, su mineralogía, composición y las interacciones con los fluidos de su entorno, principalmente agua. (García, P. 2010).

Figura 2.2 Tipos de suelos arcillosos

Símbolo	Características Generales		
GW	Gravas (> 50% en tamiz N° 4 ASTM)	Limpias (Fino < 5%)	Bien graduadas
GP			Pobrementemente graduadas
GM		Con finos (Finos >12%)	Componentes limosos
GC			Componente arcilloso
SW	Arenas (< 50% en tamiz N° 4 ASTM)	Limpias (Fino < 5%)	Bien graduadas
SP			Pobrementemente graduadas
SM		Con finos (Finos >12%)	Componentes limosos
SC			Componente arcilloso
ML	Limos	Baja plasticidad (LL < 50)	
MH		Alta plasticidad (LL > 50)	
CL	Arcillas	Baja plasticidad (LL < 50)	
CH		Alta plasticidad (LL > 50)	
OL	Suelos organicos	Baja plasticidad (LL < 50)	
OH		Alta plasticidad (LL > 50)	
Pt	Turbas	Suelos altamente organicos	

Fuente: Universidad Católica de Valparaíso- 2003

2.3.4 Propiedades físico – químicas de las arcillas

Las arcillas tienen capacidad de intercambio catiónico, es decir son capaces de cambiar fácilmente los iones fijados en la superficie exterior de sus cristales, en los espacios interlaminares, o en otros espacios interiores de las estructuras, por otros existentes en las soluciones acuosas envolventes.

La capacidad de absorción es otra de las propiedades de las arcillas ya que pueden absorber agua u otras moléculas en el espacio interlaminar o los canales estructurales.

Las arcillas son eminentemente plásticas. Esta propiedad se debe a que el agua forma una envuelta sobre las partículas laminares produciendo un efecto lubricante que facilita el deslizamiento de unas partículas sobre otras cuando se ejerce un esfuerzo sobre ellas. Su elevada plasticidad se debe a su morfología laminar, tamaño de partícula muy pequeño y a su alta capacidad de hinchamiento.

Todas las arcillas son refractarias, es decir resisten los aumentos de temperatura sin sufrir variaciones, aunque cada tipo de arcilla tiene una temperatura de cocción. La porosidad en las arcillas varía según el tipo de arcilla.

Las importantes aplicaciones industriales de las arcillas radican en sus propiedades físico-químicas. Dichas propiedades derivan, principalmente, de:

- Su extremadamente pequeño tamaño de partícula (inferior a 2 μm).
- Su morfología laminar (filosilicatos)
- Las sustituciones isomórficas, que dan lugar a la aparición de carga en las láminas y a la presencia de cationes débilmente ligados en el espacio interlaminar.

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

2.3.5 Flujo de agua en los suelos arcillosos

Quesada, (2008), menciona, al tratar con el tema de permeabilidad de los suelos arcillosos, es necesario mantener en mente los conceptos más importantes referentes al estado energético del agua.

a) Fenómeno capilar en suelos arcillosos

El fenómeno capilar en suelos arcillosos es la respuesta a las fuerzas de cohesión y adhesión que se generan en los líquidos en la interface con un 12 cuerpo sólido.

b) Cohesión y adhesión

Las fuerzas básicas responsables de la retención y movimiento del agua en el suelo, se define como cohesión y adhesión. La fuerza de cohesión es la atracción entre moléculas de agua, mientras la adhesión es la atracción de las moléculas con la superficie sólidas. La fuerza de adhesión hace que algunas moléculas de agua estén rígidamente unidas a las partículas de suelo arcilloso y se llama agua absorbida; en cambio las moléculas unidas por fuerzas de cohesión sobre superficie de los granos de suelo pueden ser fácilmente removidas. Las fuerzas de cohesión y adhesión juntas regulan el movimiento de agua. En suelos arcillosos la adhesión y cohesión ejercen sus fuerzas sobre sus propiedades de plasticidad.

c) Permeabilidad en los suelos

Es la facilidad o dificultad que tiene un suelo arcilloso de permitir que lo atraviese el agua a través de sus vacíos. Estos suelos tienen un grado de permeabilidad muy bajo, en algunos casos son impermeables. El cuadro 2.2 muestra los valores tipos de permeabilidad para diferentes tipos de suelos.

Figura 2.3 Coeficiente de permeabilidad

Tipo de suelo	K(cm/seg)
Grava limpia	100 - 1,00
Arena gruesa	1,00 - 0,01
Arena fina	0,01 - 0,001
Arcilla limosa	0,001 - 0,00001
Arcilla	0,000001

Fuente: La librería del ingeniero

Los suelos arcillosos son casi impermeables, por esta razón es que estos tipos de suelos retienen gran cantidad de agua causando a su vez problemas para la construcción de pavimentos.

Los factores más importantes que intervienen en la permeabilidad son:

c.1) Relación de vacíos

El espacio de los vanos es proporcional al tamaño de la partícula. En otras palabras, a mayor tamaño mayor cantidad de vanos. Los suelos arcillosos generalmente poseen una proporción de vacíos mucho más alta que la que es posible en suelos granulares. Esto se debe a la actividad electroquímica asociada con las partículas de mineral de arcilla, que dan lugar a la formación de estructuras muy abiertas.

$$e = \frac{V_v}{V_s} , \quad n = \frac{V_v}{V_t}$$

Dónde:

e= Relación de vacíos

n= Porosidad

V_v= volumen de vacíos de la muestra de suelo (volumen de vacíos).

V_s= volumen de la fase sólida de la muestra (volumen de sólidos).

V_t= volumen total de la muestra del suelo (volumen da la masa).

Generalmente la relación de vacíos en suelos arcillosos varían entre 0,55 - 5,00 y su porosidad 35% - 83 % (Leoni - 2005).

c.2) La estructura y estratificación del suelo arcilloso

En un suelo arcilloso se pueden encontrar diferentes permeabilidades en estado inalterado y remoldeado, aun cuando la relación de vacíos sea la misma en ambos casos; esto puede ser debido a los cambios en la estructura y estratificación del suelo inalterado o una combinación de los factores. La permeabilización sufre variaciones debido a que en el remoldeo quedan libres algunas partículas del suelo y al fluir el agua, estas se mueven y las

reacomoda, tapando los canales o arrastrándolas a la superficie o al exterior de la muestra causando turbidez en el agua.

c.3) Tamaño de las partículas

La permeabilidad del suelo arcilloso será más baja cuando más pequeñas sean sus partículas y por ende menor serán los vacíos que forman los canales de flujo

Figura 2.4 Grado de permeabilidad

Particula mineral	Tamaño	Grado de permeabilidad
Limo	0,05 mm a 0,02mm	Muy bajo
Arcilla	De 0,02mm a menos	Muy bajo o practicamente impermeable

Fuente: Angelone y Garibay. 2006

c.4) Grado de saturación

Es la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos de una muestra de suelo arcilloso; cuando mayor sea el grado de saturación mayor será la permeabilidad, debido a la reducción en los canales disponibles al flujo del agua.

c.5) Polaridad

Depende de la movilidad del flujo que rodea a las partículas de suelo arcilloso y del movimiento del fluido en dirección opuesta al flujo neto debido al potencial eléctrico generado por la filtración. En el intercambio catiónico se produce procesos reversibles en las cuales las partículas sólidas del suelo se unen a iones de la fase acuosa expulsando al mismo tiempo cantidades iguales de otro catión generando así un equilibrio entre estos dos procesos y, una compensación de cargas positivas por partes de los aniones que están presentes en la masa del suelo.

c.6) Peso específico

Los suelos arcillosos tienen su peso específico mayor de los suelos de fracción gruesa.

A mayor peso específico será menor la permeabilidad.

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

Dónde:

γ_s = Peso específico del suelo, también llamado peso volumétrico de los sólidos.

W_s = Peso de la fase solida de la muestra

V_s = Volumen de la fase solida de la muestra.

2.4 Estabilización de suelos

2.4.1 Concepto de estabilización

La estabilización es un procedimiento por el cual los suelos naturales son sometidos a determinados tratamientos para tratar de mejorar las propiedades y características del suelo.

2.4.2 Alternativas para contrarrestar el efecto de suelos arcillosos

Nadeo (2007), menciona que el efecto negativo de suelos arcillosos puede ser contrarrestado por dos métodos. Primero, se puede estabilizar el suelo para minimizar el hinchamiento y encogimiento del mismo, y segundo, se pueden diseñar los cimientos para resistir las presiones de hinchamiento y deformaciones que genera el suelo bajo el cimiento.

a) Estabilización del suelo arcilloso: Todo procedimiento escogido para estabilizar un suelo arcilloso deberá estar respaldado por una adecuada investigación de sitio y laboratorio y las recomendaciones del Profesional Idóneo.

- Remoción y reemplazo: Remoción del suelo arcilloso y su reemplazo por un suelo no expansivo. Se recomienda remover entre 0.90m y 1.50m del material en la zona activa. Remover profundidades mayores puede ser muy costoso. Todo material no clasificado como CL, CH, MH, OH, OL y SC (con Límite Líquido mayor que 30%) puede ser usado como material de reemplazo.
- Remoldeo y compactación: Especialmente rellenos con suelo de potencial a expansión bajo a mediar. Jo, pueden ser mejorados sustancialmente

compactándolos a un contenido de humedad mayor que el óptimo estimado en la prueba Proctor Estándar. Se deberá llevar un estricto control de compactación por un Profesional Idóneo.

- Sobrecarga: Para suelos arcillosos la presión de hinchamiento puede ser controlada por una sobrecarga o relleno. Su aplicación requiere de una investigación de las características expansiva del suelo.
- Pre-mojado: Suelos altamente fisurados y desecados responden favorablemente al pre-humedecimiento para minimizar futuros hinchamientos. El contenido de humedad del mismo debe incrementarse al menos hasta un 3% sobre el Límite Plástico (PL).
- Tratamiento del suelo con aditivos: El tratamiento de suelos arcillosos con aditivos (mezclado o inyectado) como cal, cemento, sal, ceniza fina y resinas (compuestos orgánicos) reducen la capacidad expansiva de los suelos. La dosificación adecuada depende de tipo de arcilla que se esté estabilizando y requiere de pruebas de laboratorios y el criterio del Profesional Idóneo.
- Control de la humedad por medio de barreras horizontales y/o verticales: El propósito de barreras para el control humedad es promover un contenido de humedad uniforme en el suelo arcilloso debajo del cimiento por medio de la minimización de la pérdida o ganancia de humedad, y por ende reduciendo los cambios volumétricos del suelo. También, un buen drenaje perimetral a la construcción mejorará el desempeño de los cimientos en suelos expansivos como son los arcillosos.

2.4.3 Propiedades que se mejoran

Con la estabilización tratamos de mejorar la granulometría hasta la requerida, la humedad hasta la óptima, la compacidad hasta la más alta, la compactación hasta la máxima, la permeabilidad hasta la mínima, la resistencia al corte hasta la máxima y la deformabilidad hasta la mínima.

2.4.4 Tipos de estabilización

Existen muchos tipos de mejoramientos de suelos donde es esencial saber el comportamiento de los diferentes suelos, con el propósito de elegir el sistema adecuado para realizar la estabilización.

a) Estabilización Mecánica

Es un proceso que se realiza mediante la mezcla de diferentes materiales, con el objetivo de conseguir un nuevo material con mejores características. Los parámetros que se quieren mejorar son la granulometría y la plasticidad.

b) Estabilización Física.

Este tipo de estabilización se caracteriza por mezclar varios tipos de suelos para mejorar la resistencia, debe de ir acompañada de una compactación como complemento.

c) Estabilización Química.

Es un método moderno que se refiere a la utilización de sustancias químicas y su utilización involucra a cambios en la constitución de los suelos en estudio.

2.4.5 Tipos de ensayos

- Ensayo de laboratorio
- Ensayo In Situ

2.4.5.1 Ensayo de laboratorio

Son aquellos ensayos que sirven para obtener las características geotécnicas del terreno, y como su nombre lo indica este tipo de ensayo se lo realiza en un laboratorio que preste las mejores condiciones y que tenga los equipos necesarios, dependiendo del tipo de ensayo se exigen distintas calidades de muestra.

2.4.5.2 Ensayo In Situ

Son aquellos que se realizan en el mismo lugar donde se encuentra el suelo que se quiere estudiar.

2.4.6 Normas para los ensayos

a) AASHTO

American Association of State High-way and Transportation Officials. (Asociación Americana de Agencias Oficiales de Carreteras y Trasportes).

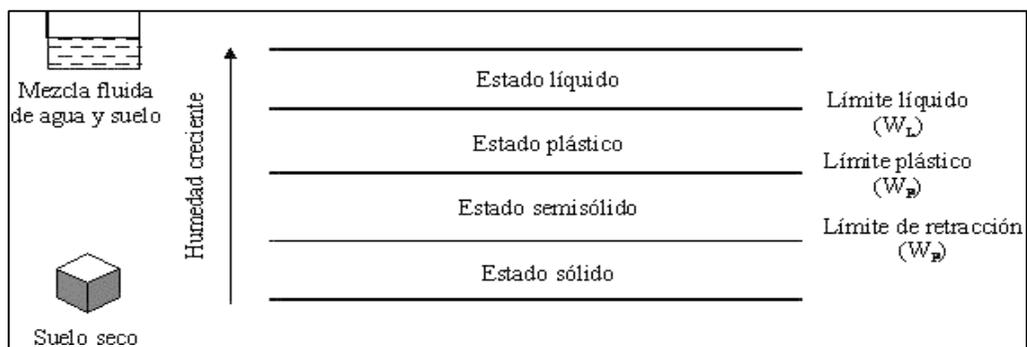
b) ASTM

American Society for Testing Materials (Sociedad Americana para el Ensayo de Materiales).

2.5 Límites de consistencia

Los límites de consistencia o también llamados los límites de Atterberg 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. Así 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. La plasticidad se convirtió en una propiedad ingenieril de interés científico escrito 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. Cuando a un suelo cohesivo se le reduce lentamente su contenido de humedad el suelo pasa gradualmente del estado líquido a su estado plástico y así hasta llegar a su estado sólido. Los límites que son necesarios para la identificación del suelo son el límite líquido y el límite plástico.

Figura 2.5 Estados de consistencia del suelo y límites de Atterberg



Fuente: Escuela politécnica nacional, Quito noviembre 2016.

El contenido de agua con que se produce el cambio entre estados varía de un suelo a otro y en mecánica de suelos interesa fundamentalmente conocer el rango de humedades para el cual el suelo presenta un comportamiento plástico, es decir, acepta deformaciones sin romperse (plasticidad). Se trata de la propiedad que presentan los suelos hasta cierto límite.

El método usado para medir estos límites de humedad fue ideado por el científico sueco Albert Atterberg en el año 1911. Los límites de Atterberg son propiedades, valores de humedad de los suelos que se utilizan en la identificación y clasificación de un suelo.

2.5.1 Plasticidad de los suelos

Se define como plasticidad la capacidad que tenía un suelo de ser deformado sin agrietarse, ni producir rebote elástico. A su vez observa que los suelos arcillosos en condiciones húmedas son plásticos y se vuelven muy duros en condiciones secas, que los limos no son necesariamente plásticos y se vuelven menos duros con el secado y que las arenas son desmenuzables en condiciones sueltas y secas.

2.5.2 Índice de plasticidad

El índice de plasticidad indica la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, representa la variación de humedad que tiene el suelo para permanecer en estado plástico.

$$IP = LL - LP$$

Donde:

IP = Índice de plasticidad de suelo (%)

LL = Límite líquido de suelo (%)

LP = Límite plástico de suelo (%)

Tabla 2.1 Índice de plasticidad de suelos

IP	Descripción
0 - 3	No plástico
mar-15	Ligeramente plástico
15 - 30	Baja plasticidad
> 30	Alta plasticidad

Fuente: Apuntes de ingeniería civil.

2.5.3 Límite Líquido

Se produce cuando el suelo pasa del estado semilíquido al estado plástico. Es el contenido de humedad al cual una muestra de suelo húmedo colocada en el aparato de Casagrande cierra una ranura de 1/2'' de amplitud, a los 25 golpes generados a la cápsula de bronce, con un ritmo de dos golpes por segundo.

Figura 2.6 Aparato de casa grande



Fuente: Elaboración propia.

2.5.4 Límite Plástico

El límite plástico es el contenido de agua en porcentaje, con el cual el suelo separa el estado semisólido del plástico. Se logra determinar amasando el suelo seco con poca agua y formando rollitos con la palma de la mano sobre una placa de vidrio hasta llegar a un diámetro de 3 mm y una longitud de 25 a 30 mm, el momento en que se empiezan a formar fisuras en fracciones de alrededor de 6mm, su humedad es la correspondiente al límite plástico. Los valores típicos entre limos y arcillas se encuentran entre 5 y 30%.

Figura 2.7 Prueba de limite plástico



Fuente: Elaboración propia.

2.6. Sistema de clasificación de suelos.

Es un ordenamiento en grupos de los suelos que tienen propiedades similares, su propósito es estimar las propiedades que tienen el suelo por comparación de suelos de la misma clase las cuales sus propiedades son conocidas. Para la determinación su clasificación se realiza previamente un ensayo de granulometría y límites de Atterberg.¹

La clasificación de suelos consiste en incluir un suelo en un grupo que presenta un comportamiento semejante. La correlación de unas ciertas propiedades con un grupo de un sistema de clasificación suele ser un proceso empírico puesto a punto a través de muchos años de experiencia.

La mayoría de las clasificaciones de suelos utilizan ensayos muy sencillos, para obtener las características del suelo necesarias para poderlo asignar a un determinado grupo, las propiedades ingenieriles básicas que suelen emplear las distintas clasificaciones son la distribución granulométrica, los límites de Atterberg, el contenido en materia orgánica, etc.

Los dos sistemas principales de clasificación de suelos actualmente en uso son el sistema AASHTO y el sistema SUCS.

2.6.1. Sistema de clasificación AASHTO

El sistema de clasificación AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials), se usa principalmente para la evaluación cualitativa de la

¹ K. Terzaghi y R. B. Peck, (1973), Mecánica de Suelos en la Ingeniería Práctica, segunda ed., Barcelona: El Ateneo, S.A.

conveniencia de un suelo como material para la construcción de carreteras el cual ha derivado en la actualidad como AASHTO. De acuerdo con este sistema de clasificación, el suelo se clasifica en 7 grupos mayores A-1 al A-7.

Los suelos clasificados en los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales granulares, donde 35% o menos de las partículas pasan por la malla N° 200.

Los suelos de los que más del 35% pasan por la malla N° 200 son clasificados en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7. La mayoría están formados por materiales tipo limo y arcilla. El sistema de clasificación se basa en los siguientes criterios:

Tamaño del grano

Grava: fracción que pasa la malla de 75 mm y es retenida en la malla N° 10 (2 mm) de Estados Unidos.

Arena: fracción que pasa la malla N° 10 (2 mm) US. y es retenida en la malla N° 200 (0.075 mm) US.

Limo y arcilla: fracción que pasa la malla N° 200 US.

Plasticidad

El término limoso se aplica cuando las fracciones de finos del suelo tienen un índice de plasticidad de 10 o menor, el término arcilloso se aplica cuando las fracciones de finos tienen un índice de plasticidad de 11 o mayor.

Índice de grupo

El Índice de grupo se presenta en números enteros y si es negativo su valor será igual a 0 (cero). Para la evaluación de la calidad de un suelo como material para subrasante de carreteras, se incorpora también un número llamado índice de grupo (IG) junto con los grupos y subgrupos del suelo.

A la vez estos se evalúan en un “índice de grupo”, el cual se calcula con la siguiente fórmula empírica:

$$IG = (F - 35)(0.2 + 0.005(LL - 40)) + 0.01(F - 15)(IP - 10)$$

Donde:

F = Porcentaje que pasa por el tamiz N° 200 (0.075mm).

LL = Límite líquido

IP = Índice de plasticidad

Este índice de grupo se presenta en números enteros y si es negativo su valor será igual a O (cero). El grupo en que se clasifique incluyendo el índice de grupo, será utilizado para determinar la calidad relativa de suelos para terraplenes, material de subrasantes, subbases y bases.

Disponiendo de los resultados obtenidos en laboratorio y estando posicionado sobre el cuadro de clasificación (tabla 4 y 5), realiza un recorrido de izquierda a derecha y el grupo correcto será el primero que satisfaga todos los valores, estos valores se aplicarán como números enteros, si algún número presenta un decimal este deberá ser aproximado al entero más cercano.

Tabla 2.2 Clasificación de suelos granulares por el sistema AASHTO.

Clasificación general	Materiales Granulares (35% o menos de la muestra que pasa la malla N° 200)						
	A-1		A-3	A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamices (porcentaje que pasa las mallas)							
N° 10	50 máx.						
N° 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción que pasa la malla N° 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos usuales de materiales componentes significativos	Fragmentos de piedra, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Tasa general de los subrasantes	Excelente a bueno						

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Braja M. Das).

Tabla 2.3 Clasificación de suelos finos por el sistema AASHTO.

Clasificación general	Materiales limo arcillosos (más del 35% de la muestra que pasa la malla N° 200)			
	A-4	A-5	A-6	A-7
Grupo de clasificación				A-7-5 | A-7-6
Análisis de tamices (porcentaje que pasa las mallas) N° 10 N° 40				
N° 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción que pasa la malla N° 40				
Límite líquido	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos usuales de materiales componentes significativos	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Tasa general de los subrasantes	Regular a malo			
Para A-7-5, $IP \leq LL-30$ Para A-7-6, $IP > LL-30$				

Fuente: Fundamentos de Ingeniería Geotécnica (Braja M. Das).

2.6.2 Características de los suelos clasificados según el sistema AASHTO

Toma en cuenta los materiales granulares y finos, y son específicamente los siguientes:

- Grupo A-1

Son mezclas bien graduadas, compuestas por piedra, grava, arena y poco o casi nada de material fino. Estos se subdividen a su vez en:

A-1-a.- Estos suelos son compuestos principalmente por gravas, con o sin partículas finas de granulometría bien definidas.

A-1-b. Son arenas con o sin partículas finas de granulometría bien definidas.

- Grupo A-2

Contiene menos del 35% de material fino, este se sub dividen a su vez en:

Subgrupo A-2-4 y A-2-5

El contenido de material fino es menor o igual al 35%, la fracción que pasa el tamiz N° 40, se comporta igual a los grupos A-4 y A-5 respectivamente.

Son gravas y arenas (arenas gruesas), que contienen limo y arcilla en cantidades reducidas, cuya plasticidad es baja, pero que excede al grupo A-1, también incluye la arena fina con limos no plásticos.

Subgrupo A-2-6 y A-2-7

La única diferencia de los anteriores, es que la fracción que pasa el tamiz N° 40, se comporta en plasticidad igual a los grupos A-5 y A-7.

- Grupo A-3

Son arenas finas conteniendo limos no plásticos, algunas veces pueden contener poca grava y arena gruesa.

- Grupo A-4

Son suelos limosos, poco o nada plásticos, puede contener más de un 75% del material que pasa el tamiz N° 200.

- Grupo A-5

Son suelos similares al anterior, pero contiene un material micáceo, que hace que el límite líquido a veces sea elevado, además de aparecer una propiedad elástica rara en los suelos.

- Grupo A-6

Predomina la arcilla, más del 75% del material pasa el tamiz N° 200, este suelo suele contener pequeños porcentajes de arena fina y limo, cuyas características son absorbidas por el gran porcentaje de arcilla.

- Grupo A-7

Se parecen mucho al A-6, pero estos tienen propiedades elásticas, además su límite líquido casi siempre es elevado.

Subgrupo A-7-5.- Sus índices de plasticidad no son muy altos con respecto a sus límites líquidos. Subgrupo A-7-6.- Sus índices de plasticidad son muy elevados con respecto a sus límites líquidos, además presentan grandes cambios de volumen entre sus estados seco y húmedo.

2.6.3 Sistema de clasificación Unificada

El sistema USCS (Unified Soil Classification System), fue propuesto inicialmente por Casagrande en 1942 y después revisado por el Bureau of Reclamation de Estados Unidos y por el Cuerpo de Ingenieros. Este sistema es el más extendido para la amplia variedad de problemas geotécnicos. El sistema USCS clasifica los suelos en base a su granulometría, los límites de Atterberg y el contenido en materia orgánica. A continuación, se muestra dicha clasificación, junto con los símbolos empleados en la misma, así como una descripción de las propiedades esperables de los grupos diferenciados.

Tabla 2.4 Símbolos de grupo según el sistema de clasificación Unificada.

Símbolos de grupos (SUCS)			
Tipo de suelo	Prefijo	Subgrupo	Sufijo
Grava	G	Bien graduado	W
Arena	S	Pobrementemente graduado	P
Limo	M	Limoso	M
Arcilla	C	Arcilloso	C
Orgánico	O	Límite líquido alto(>50)	L
Turba	Pt	Límite líquido bajo(<50)	H

Fuente: Guía de laboratorio de suelos.

Tabla 2.5 Tipología de suelos según el sistema de clasificación Unificada.

Símbolo	Características generales		
GP	GRAVAS (>50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias	Bien graduadas
GM		(Finos<5%)	Pobrementemente graduadas
GC		Con finos	Componente limoso
GC		(Finos>12%)	Componente arcilloso
SW	ARENAS (<50% en tamiz #4 ASTM)	Limpias	Bien graduadas
SP		(Finos<5%)	Pobrementemente graduadas
SM		Con finos	Componente limoso
SC		(Finos>12%)	Componente arcilloso
ML	LIMOS	Baja plasticidad (LL<50)	
MH		Alta plasticidad (LL>50)	
CL	ARCILLAS	Baja plasticidad (LL<50)	
CH		Alta plasticidad (LL>50)	
OL	SUELOS ORGÁNICOS	Baja plasticidad (LL<50)	
OH		Alta plasticidad (LL>50)	
Pt	RURBA	Suelos altamente orgánicos	

Fuente: Guía de laboratorio de suelos.

Asimismo, dentro de la tipología expuesta pueden existir casos intermedios, empleándose una doble nomenclatura, por ejemplo, una grava bien graduada que contenga entre un 5 y un 12% de finos se clasificará como GW-GM.¹⁰

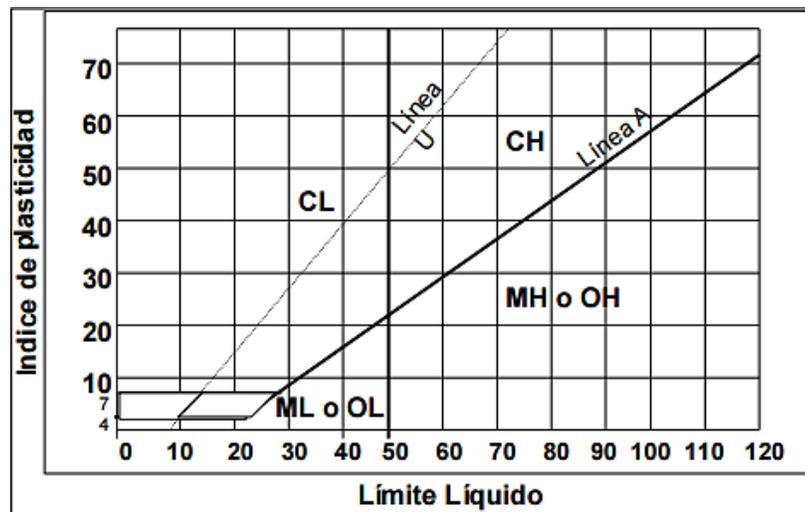
Tras un estudio experimental de diferentes muestras de suelo de grano fino. Casagrande consigue ubicarlos en un diagrama que relaciona el límite líquido (LL) con el índice de plasticidad (IP). En este diagrama, conocido como la carta de Casagrande de los suelos cohesivos, destacan dos grandes líneas que actúan a modo de límites:

Línea A: $IP = 0.73*(LL-20)$

Línea B: $LL = 50$

Como muestra la siguiente gráfica:

Figura 2.8 Carta de plasticidad.



Fuente: Clasificación de suelos, Farias D, Niemann J.

Tabla 2.6 Clasificación de suelos gruesos por el sistema de clasificación Unificada.

Gruesos (< 50% pasa 0.08mm)						
Tipo de suelo	Símbolo	% pasa 5mm.***	% pasa 0.08mm.	CU	CC	IP
Gravas	GW	< 50	< 5	> 4	1 a 3	< 0.73 (wl-20) ó <4
	GP			≤ 6	< 1 ó >3	
	GM		> 12			> 0.73 (wl-20) ó >7
	GC					
Arenas	SW	> 50	< 5	> 6	1 a 3	< 0.73 (wl-20) ó <4
	SP			≤ 6	< 1 ó >3	
	SM		> 12			< 0.73 (wl-20) ó <4
	SC					> 0.73 (wl-20) ó >7
*Entre 5 y 12% usar símbolo doble como GW-GC, GP-GM, SW-SM, SP-SC.						
***respecto a la fracción retenida en el tamiz 0.080 mm						
***SI IP= 0.73 (wl-20) ó si IP entre 4 y 7 e IP>0.73 (WL-20), usar símbolo doble: GM-GC, SM-SC						
En casos dudosos favorecer clasificación menos plástica Ej: GW-GM en vez de GW-GC.						
$C_u = (D_{60})/D_{10}$				$C_u = (D_{30}^2)/(D_{60} \cdot D_{10})$		

Fuente: Clasificación de suelos, Gonzalo Duque y Carlos E. Escobar.

Tabla 2.7 Clasificación de suelos finos por el sistema de clasificación Unificada.

Finos (≥ 50% pasa 0.08mm)			
Tipo de suelo	Símbolo	Límite líquido W_L	Índice de plasticidad
Limos inorgánicos	ML	< 50	< 0.73 (wl-20) ó <4
	MH	> 50	< 0.73 (wl-20)
Arcillas inorgánicas	CL	< 50	> 0.73 (wl-20) ó >7
	CH	> 50	> 0.73 (wl-20)
Limos y arcillas orgánicos	OL	< 50	** W_L seco al horno ≤ 75% de W_L seco al aire
	OH	> 50	
Turba	Pt	Materia orgánica fibrosa se carboniza, se quema o se pone incandescente.	
Si IP= 0.73 (W_L -20) ó si IP entre 4 y 7 e IP>0.73 (W_L -20), usar símbolo doble: CL-ML, CH-OH			
** Si tiene olor orgánico debe determinarse adicionalmente W_L seco al horno			
En casos dudosos favorecer clasificación más plástica Ej: CH-MH en vez de CL-ML.			
Si $W_L=50$; CL-CH ó ML-MH			

Fuente: Clasificación de suelos, Gonzalo Duque y Carlos E. Escobar.

2.7 Compactación de los suelos

“La compactación es el proceso artificial/mecánico, por el cual se pretende obtener mejores características en los suelos que constituyen la sección estructural de las carreteras, de tal manera que la obra resulte duradera y cumpla con el objetivo por el cual fue proyectada” (Terzagui, 1986).

La compactación logra una disminución de los huecos del suelo ocupados por aire, Se realiza mediante la aplicación de energía a la masa de suelo, por un proceso mecánico a través del que se busca obtener la máxima densidad seca del material, estando el suelo humectado con el contenido de agua óptimo.

La compactación en obra se lo puede realizar con múltiples equipos y maquinarias entre estas existen: los rodillos de ruedas lisas, los rodillos patas de cabra, los rodillos con neumáticos de hule, especialmente se utiliza el rodillo vibratorio para la densificación de los suelos granulares.¹¹

Es un proceso que aumenta el peso volumétrico de un material fino, mediante el proceso de compactación se consigue:

- Incrementar la resistencia al corte
- Aumentar la capacidad de carga y soporte
- Reducir la relación de vacíos
- Disminuir los asentamientos

2.7.1 Principios básicos de la Compactación

La compactación es el producto de la reorientación de las partículas de suelo en la que el agua juega un papel muy importante, pues reduce la fricción entre los granos y facilita el proceso

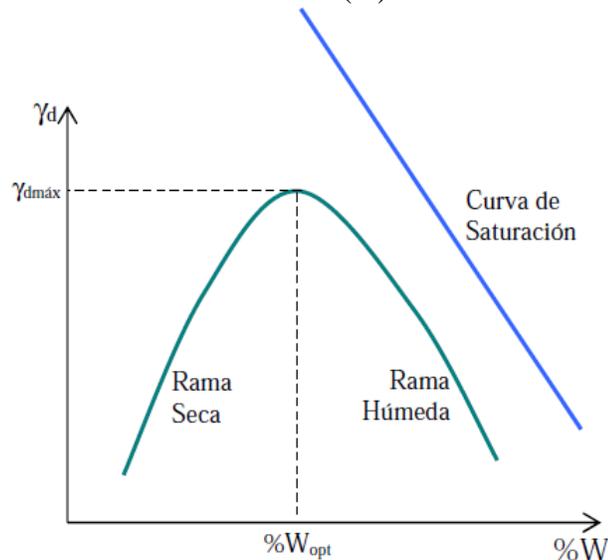
Mediante la compactación se trata de reacomodar las partículas este reacomodo no depende solamente de las características del instrumento que se utilizó, sino también depende de la humedad del material.

En la compactación la densidad seca de un suelo, depende del porcentaje de humedad y de la intensidad de la fuerza aplica.

2.7.1.1 Curvas de compactación

Cuando se compacta un suelo bajo diferentes condiciones de humedad y siendo cualquiera el método empleado, se relaciona las densidades con los porcentajes de humedad, lo que da como resultado una curva como la que se muestra.

Figura 2.9 Representación gráfica de la densidad máxima seca vs humedad óptima (%).



Fuente: Ensayo de compactación de suelo, Andrés Botía D.

En la figura se observa que densidad máxima seca es la mayor densidad que puede alcanzar un suelo al ser compactado a la humedad óptima.

- Densidad máxima seca; corresponde a la mayor densidad que puede alcanzar un suelo al ser compactado a la humedad óptima, que se determina dividiendo la masa seca por su volumen.
- Humedad óptima; es el porcentaje de humedad para el cual un suelo sometido a una energía de compactación determinada presenta su máxima densidad.

2.7.2 Pruebas de compactación

Se han establecido distintos procedimientos para ejecutar los ensayos de compactación, llamados:

- Proctor Estándar.

- Proctor Modificado.

Para la obtención de los resultados del ensayo de compactación se utilizó el Proctor Modificado en la presente investigación.

2.7.2.1 Proctor Modificado

Este ensayo consiste en compactar un suelo dentro de un molde en varias capas y con una energía de compactación que actúa de acuerdo al tipo de prueba.

Para llegar alcanzar la humedad óptima y la densidad seca máxima existen dos grupos:

2.7.2.1.1 Métodos Dinámicos

Son a los cuales se les aplica una energía de compactación por medio de golpes, con la ayuda del pistón Hoy en día se usa el Proctor Modificado debido a que brinda mejores resultados que el Proctor Standard, se describe una tabla con los distintos procedimientos.

Tabla 2.8 Proctor Modificado

AASHTO Modificado T-180				
Martillo 10 libras	Altura de caída 10"			
	Pasa tamiz N°4		Pasa tamiz N° 3/4	
Material	A	B	C	D
Métodos	A	B	C	D
Molde usado	4"	6"	4"	6"
Número de capas	5	5	5	5
Número de golpes/capas	25	56	25	56
Volumen del molde sin collar (pies cúbicos)	0,03	1/13,33	0,03	1/13,33
Volumen del molde sin collar (centímetros cúbicos)	944	12317	944	12317
Energía de compactación lb pie / pie	12375	12375	12375	12375
Energía de compactación kg cm / cm ³				

Fuente: F. Mantilla, Mecánica de suelos elemental para ingeniería civil, Ambato, Ecuador 2012

2.7.2.1.2 Métodos Estáticos

Estos tipos de métodos se caracterizan porque la energía de compactación es aplicada por medio de una presión hidráulica o estática.

2.7.3 Valor Soporte California (CBR)

La finalidad de este ensayo, es determinar la capacidad de soporte (CBR) de suelos y agregados compactados en laboratorio, con una humedad óptima y niveles de

compactación variables. Es un método desarrollado por la división de carreteras del Estado de California (EE.UU.) y sirve para evaluar la calidad relativa del suelo para subrasante, subbase y base de pavimentos.

La capacidad de soporte se refiere a la resistencia que presenta a las deformaciones bajo la aplicación de cargas de tráfico, presentan factores que interviene 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 de soporte en comparación a suelos no saturados, debido a la relación que a mayor humedad menor capacidad de soporte del suelo.

El número de CBR se obtiene de la relación de carga unitaria (lb/pulg²) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración con el pistón de penetración (2" de diámetro, 19.4cm²), mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas, permitiendo obtener un (%) de la relación de soporte. El (%) CBR, está definido como la fuerza requerida para que un pistón normalizado (con carga de una capacidad mínima de 26.7 kN o 6.000 lbf) penetre a una profundidad determinada, expresada en porcentaje de fuerza necesaria para que el pistón penetre a esa misma profundidad y velocidad uniforme de 1.27 mm/min, en una probeta normalizada constituida por una muestra patrón de material chancado.

El propósito Valor Soporte California. (California Bearing Ratio) es determinar la capacidad soporte de suelos compactados en el laboratorio, con humedad óptima y niveles de compactación diferentes. El CBR mide la resistencia del suelo en condiciones controladas de densidad seca máxima y humedad óptima obtenidas en el ensayo de compactación, Proctor Modificado.

En la presente investigación se elaboraron los ensayos con diferentes porcentajes de caucho para determinar si se incrementa la resistencia del suelo con adición del polímero.

2.8 Antecedentes Generales del caucho

El caucho natural es un material vegetal procesado que se obtiene de la savia de varios árboles existentes en varias partes del mundo principalmente en Sur América y África ecuatorial. El látex que se obtiene de la planta "HEVEA" cubre más del 99% del consumo

mundial de caucho natural. Pero también este producto denominado caucho se puede sacar del ficus elástica y de otras plantas africanas.

Para recolectar el látex se le practica un corte en el tronco, desde el suelo hasta aproximadamente 1.80 m, se debe de colocar debajo de la incisión una pequeña vasija que sirva como recolector del látex que brota de las heridas del árbol, la savia posee de 30 a 36% del hidrocarburo.

Los neumáticos están esencialmente compuestos de caucho que son extraídos principalmente de “HEVEA”. Este material se tarda en destruirse más de 500 millones de años, por lo que es conveniente crear maneras de reutilización y así poder aprovechar este material sin mucha contaminación ya que nosotros seremos los beneficiados.

2.8.1 Composición de neumáticos

El caucho (llanta) está compuesto de varios materiales dependiendo del uso que se le dará, este material cuenta con especiales características como es la resistencia a la carga, adherencia, posibilidad de manejar alta presión, entre otros.

Tabla 2.9 Composición típica de la llanta

Material	Composición (%)	
	Automóviles	Camiones
Caucho natural	14	27
Caucho sintético	27	14
Rellenos Reforzantes	28	28
Acero	14	15
Antioxidante y rellenos	17	16

Fuente: H. Torres, “Valoración de las propiedades mecánicas y de durabilidad de concreto adicionados con residuos de llanta caucho” Magister en Ingeniería Civil, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá, Colombia 2014.

2.8.2 Clasificación de cauchos

2.8.2.1 Caucho Natural

Se obtiene de varias plantas que producen un líquido lechoso al realizarle un corte en el tronco su color es blanco llamado látex.

En estado natural, el caucho aparece en forma de suspensión coloidal en el látex de plantas productoras de caucho. Una de estas plantas es el árbol de la especie *Hevea Brasiliensis*, de la familia de las Euforbiáceas, originario del Amazonas. Otra planta productora de caucho es el árbol del hule, *Castilloa elástica*, originario de México (de ahí el nombre de hule), muy utilizado desde la época prehispánica. para la fabricación de pelotas, instrumento primordial del juego de pelota, deporte religioso y simbólico que practicaban los antiguos mayas. Indonesia, Malaysia, Tailandia, China y la India producen actualmente alrededor del 90% del caucho natural. El caucho en bruto obtenido de otras plantas suele estar contaminado por una mezcla de resinas que deben extraerse para que el caucho sea apto para el consumo. Entre estos cauchos se encuentran la gutapercha y la balata, que se extraen de ciertos árboles tropicales. (Ramírez, 2006).

2.8.2.2 Caucho sintético

Es un material parecido al caucho sintético y su elaboración es artificial. Se obtiene mediante reacciones químicas, conocidas como polimerización. Luego de la elaboración este tipo de caucho se vulcaniza.

2.8.2.3 Neopreno

Es un caucho sintético fue uno de los primeros logrados por la investigación de Carothers. Es muy resistente al calor y a productos químicos como el aceite y el petróleo. Se aplica en la utilización de tuberías de conducción de petróleo y como aislantes para cables.

2.8.2.4 Caucho isobutileno - isopreno

Es un plástico que trabaja como el caucho natural pero no es flexible como el natural. Es muy resistente a la oxidación y a la acción de productos corrosivos, tiene una baja permeabilidad a los gases por esta razón es utilizado en los tubos interiores de las llantas y es muy difícil de vulcanizar.

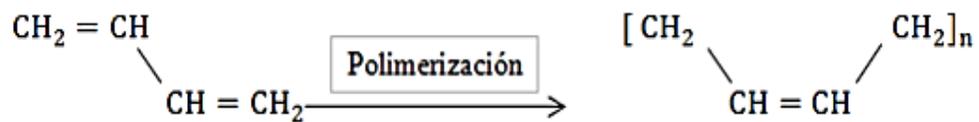
2.8.2.5 Butadieno – Estireno

Es un material conformado de 75% de butadieno y del 25% de estireno que se fabrica por medio de radicales libres. Compite en la fabricación de las llantas para vehículos.

2.8.2.6 Polibutadieno

Es un caucho sintético y se utiliza principalmente en la elaboración de neumático debido a que este tipo de caucho tiene una alta resistencia al desgaste. Está formado a partir del proceso de polimerización del monómero.

Figura 2.10 Estructura del Polibutadieno



Fuente: D. Fuentes, “Obtención de láminas impermeables a partir de caucho reciclado utilizando resina de mortero de uretano”, Tesis de Título, Ingeniera Química, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador 2014.

2.8.3 Métodos de reciclaje

Estos procesos consisten en reducir el material de diferentes maneras, las cuales se encargan de separar el caucho del acero y de los textiles, este caucho se puede utilizar en la elaboración de nuevos productos.

En la actualidad existen muchos procedimientos o métodos para este fin que lo mencionaremos a continuación:

- Trituración Mecánica.
- Trituración Criogénica.
- Pirólisis.
- Regeneración.

2.8.3.1 Trituración mecánica

Esto se logra, metiendo los neumáticos reciclados en la maquina donde las llantas son cortadas por unas cuchillas, se trituran las llantas hasta obtener el tamaño requerido luego

se utilizan clasificadores magnéticos para separar los aceros y los textiles para 18 posteriormente realizar su tamizaje y para finalmente ser almacenado para su venta. En este proceso se obtienen productos de excelente calidad.

Figura 2.11 Trituración de Neumáticos



Fuente: Sitio web: www.google.com. Trituración mecánica

2.8.3.2 Trituración criogénica

Esta trituración se basa en congelar las llantas con nitrógeno líquido para luego ser golpeadas y poder obtener el caucho en polvo, con la liberación de nitrógeno gaseoso.

Este procedimiento tiene como desventaja la baja calidad de los productos obtenidos ya que el caucho se encuentra mezclado con los diferentes materiales del neumático triturado, otros factores negativos son el alto costo de la implementación y mantenimiento de la maquinaria, esto compromete a que este método no sea recomendable.

2.8.3.3 Termólisis

Es un sistema donde a los neumáticos se les somete a un calentamiento, en un medio donde no existe oxígeno. Es la descomposición de un elemento al ser sometido a altas temperaturas. Con este método se produce la descomposición del material obteniendo productos con características muy similares al caucho virgen.

2.8.3.4 Pirólisis

Es la degradación del caucho, mediante el calor en ausencia del oxígeno este proceso es un caso especial de la termólisis además es la descomposición química de los materiales, excepto de metales y vidrio.

Por medio de este proceso podemos elaborar un gas similar al propano que es empleado para el uso industrial, aprovechamos este gas como combustibles para el uso interno de hornos, calderas ya que tiene un alto poder calorífico también podemos elaborar el aceite industrial líquido que mediante la refinación se puede transformar en diésel.

Figura 2.12 Reciclaje con residuos de neumáticos máquina de pirolisis



Fuente: Sitio web: www.google.com. Reciclaje con residuos de neumáticos máquina de pirolisis.

2.8.4 Propiedades del caucho

- Dureza.

Es la reacción elástica del caucho cuando se deja caer sobre el un material duro. Mide la dureza elástica de los materiales.

- Índice de resistencia a la abrasión.

Es la medida de la resistencia de un caucho vulcanizado con la de un estándar bajo condiciones específicas.

- Resistencia al envejecimiento.

Es la resistencia al deterioro por el calor, la luz y el oxígeno durante el uso o en proceso de almacenamiento.

- Elasticidad.

Es la cualidad de un material para regresar a su estado original después de ceder la tensión que lo altero.

- Resistencia al desgarre.

Es la fuerza mínima para desgarrar una probeta de una pulgada de espesor bajo condiciones determinadas.

Tabla 2.10 Propiedades mecánicas del Caucho Natural y del Polibutadieno

		Caucho Natural	Polibutadieno
Propiedades Generales	Adhesión a Metales	Excelente	Excelente
	Adhesión a Tejidos	Excelente	Buena
	Rango de Temperatura de Trabajo (° C)	-20 a 80° C	-10 a 80° C
Propiedades Mecánicas	Resistencia a la Abrasión	Buena	Buena - Excelente
	Resistencia a la Flexión	Buena - Excelente	Buena
	Resistencia al Desgarre	Excelente	Pobre
	Resistencia al Impacto	Excelente	Excelente
	Envejecimiento a 100° C	Pobre - Buena	Buena
	Elasticidad a 100° C	Buena	Buena
	Resistencia a la Llama	No Usar	Casos Especiales

Fuente: D. Fuentes, “Obtención de láminas impermeables a partir de caucho reciclado utilizando resina de mortero de uretano”, Tesis de Título, Ingeniera Química, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador 2014.

2.8.4.1 Propiedades físicas y químicas

El caucho bruto en estado natural es un hidrocarburo blanco o incoloro. El compuesto de caucho más simple es el isopreno o 2-metilbutadieno, cuya fórmula química es C₅H₈. A la temperatura del aire líquido, alrededor de -195 °C, el caucho puro es un sólido duro y transparente. De 0 a 10 °C es frágil y opaco, y por encima de 20 °C se vuelve blando, flexible y translúcido. Al amasarlo mecánicamente, o al calentarlo por encima de 50 °C, el caucho adquiere una textura de plástico pegajoso. A temperaturas de 200 °C o superiores se descompone. El caucho puro es insoluble en agua, álcali o ácidos débiles, y soluble en benceno, petróleo, hidrocarburos dorados y disulfuro de carbono. Con agentes oxidantes químicos se oxida rápidamente, pero con el oxígeno de la atmósfera lo hace lentamente.

Las propiedades físicas del caucho bruto varían con la temperatura. A bajas temperaturas, se vuelve rígido, y cuando se congela en estado de extensión adquiere estructura fibrosa.

Calentando a más de 100 °C., se ablanda y sufre alteraciones permanentes. El caucho bruto adquiere gran deformación permanente debido a su naturaleza plástica. La plasticidad del caucho varía de un árbol a otro y también depende de la cantidad de trabajo dado al caucho desde el estado látex, de las bacterias que lo acompañan e influyen en su oxidación y de otros factores. La plasticidad puede modificarse dentro de ciertos límites por la acción de productos químicos. La densidad del caucho a 0 °C. es de 0.950, y a 20 °C. es de 0.934. El caucho bruto deshelado después de la masticación por cilindros fríos no varía de densidad. (Ramírez, 2006). Cuando el caucho bruto ha sido estirado y deformado durante algún tiempo, no vuelve completamente a su estado original. Si entonces se calienta, la recuperación es mayor que a la temperatura ordinaria. Este fenómeno se denomina deformación residual o estiramiento permanente y es propio del caucho. El caucho bruto absorbe agua. Los coagulantes usados en el látex al preparar el caucho afectan al grado de absorción de agua; usando ácido clorhídrico, sulfúrico o alumbre se obtienen cauchos con poder de absorción relativamente elevado. El poder de absorción de agua del caucho purificado es muy bajo. Gran variedad de sustancias son solubles o pueden dispersarse en caucho bruto, tales como el azufre, colorantes, ácido estéarico, N-fenil-2-naftilamina, mercaptobenzotiazol, pigmentos, aceites, resinas, ceras, negro de carbono y otras. El efecto deteriorante de luz y el calor sobre el caucho se reconoció largo antes del descubrimiento de la vulcanización. El látex está disponible hoy en varias formas y diferentes concentraciones. Cuando el látex apareció por primera vez en grandes cantidades (preservado en amoníaco, en proporciones menores al 1 %), El caucho contenido variaba del 29 al 40 %, de acuerdo a las condiciones de los árboles, y especialmente a los métodos de extracción y recolección en las plantaciones. Debido a las diferentes condiciones de recolección, preservación y transporte, los procesos se vieron limitados por muchos años. Gradualmente la calidad se uniformó y aumentó más allá del estándar. Más recientemente, las concentraciones de látex disponibles en el mercado se clasificaron por su preparación: por evaporación, ó por separación parcial de sueros sólidos por métodos mecánicos. El mejor ejemplo del primer tipo es el Revertex, preparado por evaporación del látex en presencia de un mineral alcalino (hidróxido de potasio}, u otro agente estabilizante, como el jabón de potasio o alguna sal de carácter coloidal. Este posee una consistencia cremosa y contiene cerca del 75 % de los sólidos

totales, de los cuales un 7 al 8 % consiste en sueros sólidos y sustancias estabilizantes agregadas. En la segunda categoría hay dos importantes ejemplos de concentración. El primero, comercializado bajo varias denominaciones, como por ejemplo Utermark látex, Jatex o Dunlop, posee una concentración del 60 % de caucho seco, obtenido por centrifugaron del látex original. Este látex concentrado tiene una ligera consistencia cremosa, y contiene solo una fracción de los componentes que no son caucho presentes en el látex original. Está estabilizado con amoniaco (en una concentración de aproximadamente 0,5 % de NH₃ en peso), y es capaz de dar un color pálido característico. (Ramírez, 2006).

2.8.5 Usos tras el reciclado

Los materiales que se obtienen después del tratamiento de los residuos de neumático, pueden tener varios usos. A partir del triturado del caucho pueden obtenerse productos plásticos, también pueden fabricarse suelas de zapatos, alfombras, aislantes de vehículos cascos de motoristas y otros productos con la adición de ligantes tipo termoplásticos.

Con un sistema de curado y un adecuado ligante se elaboran productos moldeados por compresión, aunque las propiedades son inferiores a las del caucho natural pero económicamente es ventajoso. En fin las utilidades que se les puede dar son varias y crecen con el pasar de los años.

2.9 Pavimento

El pavimento es una estructura vial que tiene como fin principal ofrecer una superficie de tránsito vehicular limpio, cómodo, seguro y durable. Esta estructura se la construye directa y continuamente apoyada sobre el suelo. Existen dos tipos de pavimentos, los pavimentos flexibles y los pavimentos rígidos.

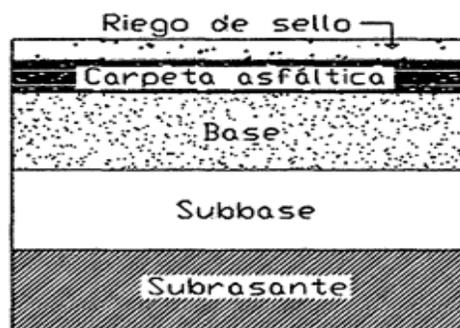
2.9.1 Pavimentos flexibles

Están conformados estructuralmente por capas de materiales granulares compactados y una superficie de rodadura (construida normalmente a base de concreto asfáltico) la cual forma parte de la estructura del pavimento. La superficie de rodadura al tener menos rigidez se deforma más y se producen mayores tensiones en la sub-rasante. (Rico

1998). Becerra (2012), respecto a la estructura expresa que es diseñada con la finalidad de cumplir los siguientes propósitos:

- Soportar y transmitir las cargas que se presenta con el paso de vehículos
- Ser lo suficientemente impermeable.
- Soportar el desgaste producido por el tránsito y por el clima.
- Mantener una superficie cómoda y segura (antideslizante) para el rodamiento de los vehículos.
- Mantener un grado de flexibilidad para cubrir los asentamientos que presente la capa inferior (base o sub base). Valor Relativo de Soporte Los materiales de estos pavimentos necesitan tener una gran resistencia al corte para evitar las posibles fallas. De esta forma el diseño de este tipo de pavimento se basa en ensayos de penetración, es decir mediante la determinación del valor de soporte de California o C.B.R.

Figura 2.13 Pavimento flexible



Fuente: Google web

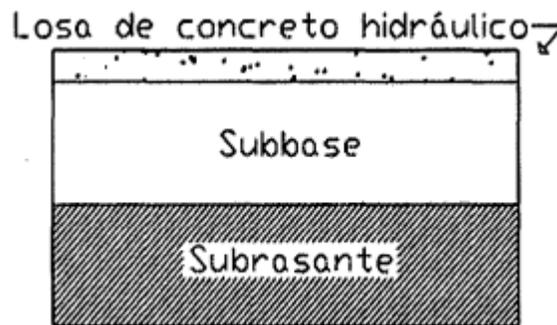
Figura 2.14 Pavimento flexible de concreto asfáltico



Fuente: Universidad técnica de Ambato

2.9.2 Pavimentos rígidos

Fig. 2.15 Pavimento Rígido



Fuente: Universidad técnica de Ambato

Estos pavimentos se conforman por una base y por una losa de concreto hidráulico, la cual le va a dar una alta resistencia a la flexión (Fig. No 15). Además de los esfuerzos a flexión y compresión, este tipo de pavimento se va a ver afectado en gran parte los esfuerzos que tenga que resistir al expandirse o contraerse por cambios de temperatura y por las condiciones climáticas. Es por esto que su diseño toma como parámetros los siguientes conceptos:

- Volumen tipo y peso de los vehículos que transitan por esa viabilidad.
- Módulo de reacción de la subrasante.
- Resistencia del concreto que se va a utilizar.
- Condiciones climáticas.

Crespo (2002), menciona que las características del tránsito pueden ser calculado a través de aforos, el de la resistencia del concreto puede proponerse y el de las condiciones climáticas puede ser obtenido de cartas climáticas. Los pavimentos rígidos pueden ser: de concreto simple con varillas de transferencia de carga (pasadores), de concreto reforzado y con refuerzo continuo. a. Los pavimentos de concreto simple, se construyen sin acero de refuerzo o varillas de transferencia de carga en las juntas. b. Los pavimentos de concreto simple con varillas de transferencia de carga (pasadores), se construyen sin acero de refuerzo, para lo cual se colocan varillas lisas en cada junta de construcción, las mismas que actúan como dispositivos de transferencia de carga, por lo que se requiere que la separación entre juntas sea corta para controlar el agrietamiento. c. Los pavimentos

reforzados contienen acero de refuerzo y pasadores en las juntas de construcción. d. Los pavimentos de refuerzo continuo, se construyen sin juntas de construcción, sin embargo, por la presencia del refuerzo se desarrolla un alto grado de transferencia de carga en las caras de las fisuras.

2.9.3 Componentes estructurales

2.9.3.1 Subrasante

El manual de carreteras, sección suelos y pavimentos (2013), expresa, la Subrasante es la superficie terminada de la carretera a nivel de movimiento de tierras (corte y relleno), sobre la cual se coloca la estructura del pavimento o afirmado.

La subrasante es el asiento directo de la estructura del pavimento y forma parte del prisma de la carretera que se construye entre el terreno natural allanado o explanada y la estructura del pavimento. La subrasante es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, que soportará la estructura del pavimento, y 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. 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 de la estructura del pavimento que se colocará encima. En la etapa constructiva, los últimos 0.30m de suelo debajo del nivel superior de la subrasante, deberán ser compactados al 95% de la máxima densidad seca obtenida del ensayo proctor modificado (MTC EM 115).

Los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante, en una profundidad no menor de 0.60 m, deberán ser suelos adecuados y estables con $CBR \geq 6\%$. Si los suelos no cumplen esta condición por tratarse de suelos de mala calidad, $CBR < 6\%$, es decir suelos blandos o muy compresibles o con materia orgánica o suelos pobres e inadecuados; se considerará la estabilización, mejora o refuerzo de los suelos, según la naturaleza de los mismos, efectuando estudios geotécnicos de estabilidad y de asentamientos

2.9.3.2 Subbase

Es una capa de material especificado y con un espesor de diseño, el cual soporta a la base y a la carpeta. Además se utiliza como capa de drenaje y controlador de la capilaridad del agua. Dependiendo del tipo, diseño y dimensionamiento del pavimento, esta capa puede obviarse. Esta capa puede ser de material granular (CBR \geq 40%) o mejorada con asfalto, cal o cemento. (Manual de carreteras, sección suelos y pavimentos- 2013). En el presente estudio se efectúa el mejoramiento de suelo arcilloso con caucho granular.

2.9.3.3 Base

Es la capa inferior a la capa de rodadura, que tiene como principal función de sostener, distribuir y transmitir las cargas ocasionadas por el tránsito. Esta capa será de material granular drenante (CBR \sim 80%) o será tratada con asfalto, cal o cemento. (Manual de carreteras, sección suelos y pavimentos- 2013). En la presente tesis se efectúa el mejoramiento de suelo arcilloso o expansivo con caucho granular

2.9.3.4 Capa de rodadura

Es la parte superior de un pavimento, que puede ser de tipo bituminoso (flexible) o de concreto de cemento Portland (rígido) o de adoquines, cuya función es sostener directamente el tránsito. (Manual de carreteras, sección suelos y pavimentos- 2013)

2.10 Definición de términos básicos

- Capacidad de Soporte: Resistencia que presenta el material subrasante con fines de diseño de pavimentos.
- Suelo: Agregados naturales de partículas minerales granulares y cohesivas separables por medios mecánicos de poca energía o por agitación de agua.
- Reciclaje: Consiste en convertir materiales ya utilizados en materias primas para fabricar nuevos productos.
- Mejoramiento: Ejecución de las actividades constructivas para dotar a una carretera existente, en bueno, regular o mal estado de mejores condiciones físicas y operativas de las que disponía anteriormente, para ampliar su capacidad o simplemente ofrecer un mejor servicio al usuario.

- Subrasante: Capa de terreno de una carretera, que soporta la estructura del pavimento y que se extiende hasta una profundidad en que no le afecte la carga de diseño que corresponde al tránsito previsto.

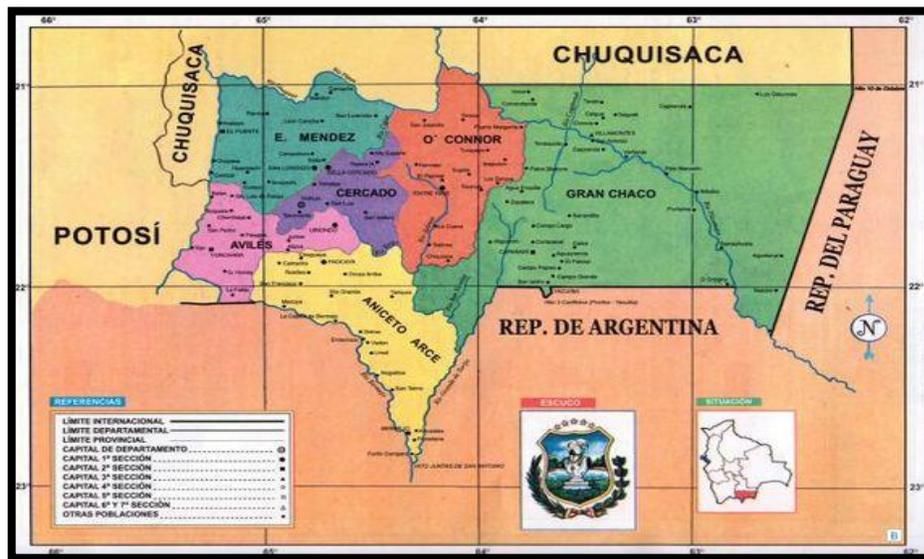
CAPÍTULO III

APLICACIÓN PRÁCTICA

3.1 Ubicación del proyecto

Tarija o San Bernardo de Tarija, ciudad fundada con el nombre de Villa de San Bernardo de la Frontera de Tarixa, es un municipio y una ciudad localizada al sur de Bolivia, ciudad capital de la provincia Cercado y del departamento homónimo. Cuenta con una población de aproximadamente 591.800 habitantes en total. Se encuentra ubicada en los valles bajos entre el río Nuevo Guadalquivir a 1834 msnm. Está ubicado al extremo sur-sureste del país, limitando al este con la República del Paraguay desde el hito 10 de Octubre hasta el trifinio del Hito Esmeralda donde comienza su frontera sur con la República Argentina hasta Santa Victoria, norte de Salta, limita al norte y noroeste con el departamento de Chuquisaca, al suroeste con el departamento de Potosí.

Figura 3.1 Departamento de Tarija-Geografía



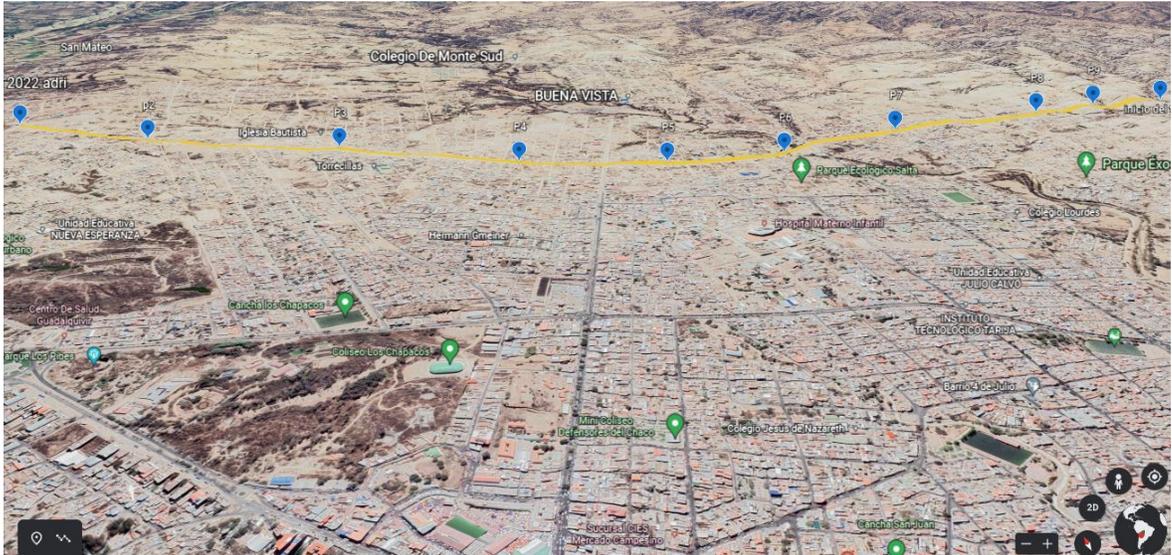
Fuente: Google imágenes.

3.1.1 Características de la zona de estudio

El área en estudio de esta investigación, se encuentra ubicado en el departamento de Tarija ubicada al sur del país de Bolivia, más específicamente en plena capital del departamento de Tarija que conlleva su mismo nombre (Tarija), perteneciente a la provincia cercado, el

muestreo se realizó en la 2da circunvalación de la ciudad en mención que ocupa casi un tramo de 5.3 km que es una parte de la avenida que esta continua su recorrido hasta cerrar con las rutas nacionales de la A.B.C.

Figura 3.2. Ubicación de las zonas de estudio



Fuente: Google earth.

3.2 Muestreo zona de estudio: Tramo 2da circunvalación

El tramo en estudio se encuentra desde la zona de san mateo hasta la avenida gran chaco, siendo este un tramo de la avenida de la ciudad en estudio.

Para la ubicación de las calicatas de manera práctica se tomó en cuenta en campo las características de suelos arcillosos, siendo estas las muestras básicas para el desarrollo de la presente investigación, se procedio a la toma directa del material debido a que estaba removido por maquinaria pesada y se colocaron en bolsas de nylon (etiquetadas) para sus respectivos ensayos en laboratorio y siendo un suelo en común casi en todo su tramo se determinó hacer la caracterización de suelo cada 500 m, haciendo un total de 10 puntos en todo el tramo.

Tabla 3.1 Coordenadas UTM

Coordenadas UTM			
Puntos	Zona	Coordenada Este	Coordenada Norte
P-1	20K	319298,00 m E	7622448,00 m S
P-2	20K	319401,00 m E	7621991,00 m S
P-3	20K	319991,00 m E	7621597,00 m S
P-4	20K	320517,00 m E	7621171,00 m S
P-5	20K	320996,00 m E	7620936,00 m S
P-6	20K	321501,00 m E	7620894,00 m S
P-7	20K	322095,00 m E	7620900,00 m S
P-8	20K	322820,00 m E	7620781,00 m S
P-9	20K	323186,00 m E	7620756,00 m S
P-10	20K	323558,00 m E	7620679,00 m S

Fuente: Elaboración propia.

Se determinó la cantidad mínima de 3 puntos a trabajar en la tesis por las características del suelo siendo casi iguales en todo el tramo ubicadas en las progresivas km 00+000 (P1), km 02+500(P5), km 05+000(P10).

3.3 Toma de muestras de suelo

En este método se describe la forma de obtener muestras de suelos cohesivos que conserven la estructura y humedad que tienen en su estado natural, cuando pueden tomarse superficialmente o de una profundidad a la que se llega por excavación a cielo abierto o de una galería, las dimensiones, forma y demás características de las muestras inalteradas, dependen del tipo de ensayo al cual van a estar sometidas.

3.3.1 Extracción de muestras mediante calicatas

El ensayo consistió en nuestro caso en una excavación de una calicata de forma manual, utilizando las herramientas adecuadas como ser pala y picota y de unas dimensiones de 0.3x0.3x0.3. Su ejecución fue rápida y a bajo costo.

3.3.1.1 Muestras alteradas en calicatas

Se realizan durante la excavación a la cota deseada. Estas muestras se pueden tomar manualmente extrayendo el material del fondo.

La cantidad de muestra a tomar depende de la granulometría de los materiales y del tipo de ensayo a realizar. Para terrenos finos o arenosos y ensayos de identificación suele ser

suficiente con (2 o 3) kg. Una vez cogida la muestra se debe sellar convenientemente y registrarla con los datos de la obra.

Figura 3.3 Puntos de extracción de muestras



Fuente: Elaboración propia.

3.4 Metodología del caucho granular

Esta metodología se trabaja junto con la caracterización de suelos, habiendo ensayos solo para clasificar los suelos como ser límites de atterbeng, los demás ensayos ya se trabajan en condiciones normales y adicionando caucho granular en 5%, 10% y 15% para llegar al objetivo que estamos buscando, que sería el contenido óptimo de caucho granular.

- Análisis granulométrico de suelo natural (ASTM D 422 - AASHTO T-88).
- Determinación del contenido de humedad óptimo mediante el ensayo de compactación (ASTM D 1557 - AASHTO T-180) en condiciones normales

y con diferentes porcentajes de caucho granular, 5%, 10% y 15%.

- Determinación del CBR (ASTM D 1883-99), en condiciones normales y con diferentes porcentajes de caucho granular, 5%, 10% y 15%.

Todo esto con la finalidad de ver las características que presentan los suelos finos, al combinarlo con distintos porcentajes de caucho granular, de tal manera permita al investigador partir de la observación que enmarcan el problema de investigación.

3.4.1 Análisis granulométrico (ASTM D 422 - AASHTO T-88)

El análisis granulométrico es un intento de determinar las proporciones relativas de los diferentes tamaños de granos en una masa de suelo dada. Obviamente para obtener un resultado significativo la muestra debe ser estadísticamente representativa de la masa de suelo, como no es físicamente posible representar o determinar el tamaño real de cada partícula independientemente del suelo, la practica solamente agrupa los materiales por rangos de tamaño y se las representa en una gráfica denominada curva granulométrica en escala semilogarítmica.

Existen varios métodos para realizar la granulometría, pero los más importantes son:

Método general: Que consiste en tamizar la muestra seca y así de esta manera se obtiene los datos para posteriormente graficar la curva granulométrica.

Los tamices que se utilizan para la parte gruesa del material son: 2½", 2", 1½", 1", ¾", ⅜", N°4, N°10 y para la parte final del suelo se utilizará los tamices N°40 y N°200.

Método del lavado: Este método es el más efectivo, ya que con este método se logra que pase por el tamiz, todas las partículas que sean de menor tamaño del diámetro del tamiz.

Luego el material que se retiene en el tamiz N°200, se lo hace secar, ya sea en el horno o en la hornilla, una vez secado se vuelve a tamizar por las mallas N°40 y N°200.

Método del Monograma: Este método es utilizado para la obtención de porcentajes óptimos de mezcla de dos o más suelos.

Procedimiento para el método por lavado.

La muestra de suelo, tal como se obtuvo de campo, se expuso al aire en un cuarto temperado, hasta su secado total. Los terrones de suelo se desmenuzaron utilizando un mortero.

Materiales:

Se tomó 500 gramos de muestra del suelo arcilloso

Equipo:

- Juego de tamices No 4, 10, 40 y 200.
- Mortero y mango de mortero, adecuado para desmenuzar los terrones del suelo.
- Balanzas de capacidad conveniente y con aproximación de 0.1 g.
- Estufa o horno con control de temperatura
- Recipientes (Taras)
- Cepillo y brocha para limpiar las mallas de los tamices.

Procedimiento:

- a) Se secó una porción de muestra y se pesó la muestra seca Pms (antes del lavado).
- b) Se colocó la muestra en un recipiente, y se empapo la muestra con agua.
- c) Se colocó la muestra empapada en la malla No 200 y se lavó cuidadosamente el material, utilizando agua a chorro, se tuvo bastante cuidado de no causar daño al tamiz y evitar la pérdida de suelo que eventualmente pueda salpicar fuera del tamiz.
- d) Se vació en un recipiente las partículas retenidas en la malla No 200 y se puso al horno para secar durante 24 horas a una temperatura de 105°C.
- e) La muestra seca se pasó por el juego de tamices agitándolos manualmente.
- f) Se pesó el material retenido en cada tamiz (PR) y se determinó el peso del suelo perdido durante el lavado, cual nos indicó el suelo que paso el tamiz No 200.
- g) Con los datos obtenidos se determinó los porcentajes de los pesos retenidos en cada tamiz.

$$\%PR = 100 * PR / Pms$$

- h) Luego se determinó los porcentajes de los pesos retenidos acumulado (%PAR).

i) Se determinó los complementos a 100% que son los pasantes acumulativos por los tamices.

$$\%PASA= 100- \%PAR$$

j) Con los datos obtenidos se procedió a dibujar la curva granulométrica, en escala semilogarítmica a partir del tamaño que corresponde a la malla No 200 teniendo como abscisas y en escala logarítmica a los tamaños de los tamices.

k) Se clasifico el suelo según su granulometría, mediante el sistema aashto, teniendo en cuenta la tabla 12.

Tabla 3.2 Clasificación de suelos arcillosos, sistema AASHTO

Clasificación General	Material Granular						Material limo arcillosos				
	A-1		A-2				A-3	A-4	A-5	A-6	A-7
Subgrupos	A-1a	A-1b	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7					A-7-5	A-7-6
% pasante #10 #40 #200	50% máx 30% máx 15% máx	50% máx 25% máx	35% máx	35% máx	35% máx	35% máx	51% mín 10% máx	36% mín	36% mín	36% mín	36% mín
Características del material que pasa por el tamiz #40 LL Ip			40% máx 10% máx	41% mín 10% máx	40% máx 11% mín	41% mín 11% mín	N.P.	40% máx 10% máx	41% mín 10% máx	40% máx 11% mín	41% mín 11% mín
Ig	0	0	0	0	4 máx	4 máx	0	8 máx	12 máx	16 máx	20 máx
Tipo de material	Fragmentos pétreos de gravas y arenas		Gravas y arenas, limosas y arcillosas				Arena fina	Suelos limosos		Suelos arcillosos	

Fuente: Ingeniería geotécnica.

i) Se hizo el mismo procedimiento con las muestras de las demás calicatas.

Granulometría.

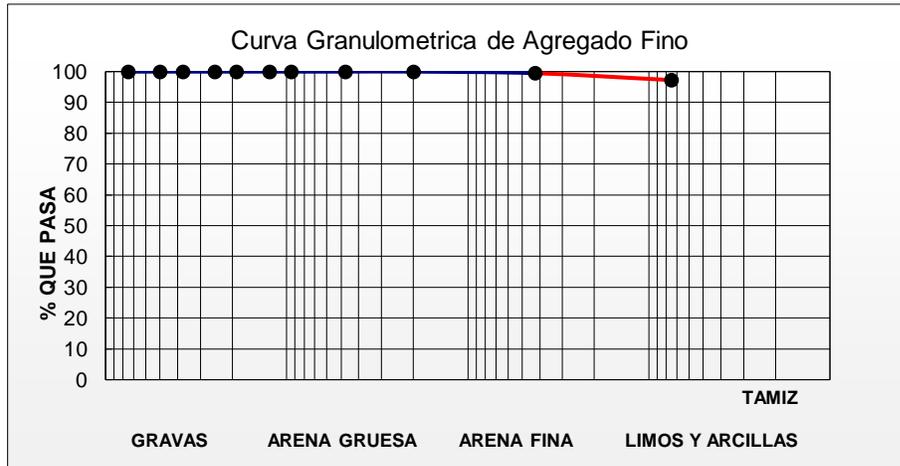
P1: 2da circunvalación.

Tabla 3.3 Granulometría del punto 1

Peso Total (gr.)			500	A.S.T.M.	
Tamices (plg)	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	%Que Pasa del Total
2 1/2"	75	0	0	0	100
2"	50	0	0	0	100
1 1/2"	37,5	0	0	0	100
1"	25	0	0	0	100
3/4"	19	0	0	0	100
1/2"	12,5	0	0	0	100
3/8"	9,5	0	0	0	100
Nº4	4,75	0	0	0	100
Nº10	2	0	0	0	100
Nº40	0,425	2,56	2,56	0,51	99,49
Nº200	0,075	11,2	13,76	2,75	97,25
Base		0			

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.4 Curva granulométrica de la muestra P1



Fuente: Elaboración propia.

Resumen de muestras.

Tabla 3.4 Resumen de resultados de la granulometría

2da circunvalación					
Muestra	% Que pasa del total				
Tamiz	P1	P2	P3	P4	P5
2 1/2"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
2"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1 1/2"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1/2"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/8"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
N°4	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
N°10	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
N°40	99,49%	99,92%	99,63%	99,89%	92,17%
N°200	97,25%	98,68%	98,36%	80,41%	73,21%

Muestra	% Que pasa del total				
Tamiz	P6	P7	P8	P9	P10
2 1/2"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
2"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1 1/2"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/4"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
1/2"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
3/8"	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
N°4	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
N°10	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%
N°40	93,92%	89,06%	99,19%	99,56%	99,72%
N°200	72,36%	83,00%	73,10%	94,48%	93,89%

Fuente: Elaboración propia.

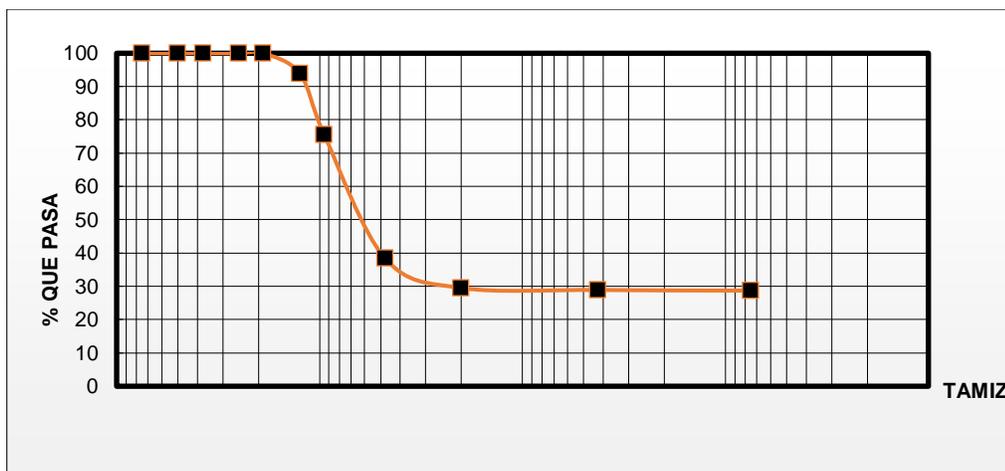
3.4.1.1 Análisis granulométrico del caucho

Tabla 3.5 Granulometría de caucho granular

Granulometría de caucho					
Peso total de muestra de Caucho=				1400	gr
Peso Total (gr.)				1400	
Tamices	Tamaño (mm)	Peso Ret. (gr)	Ret. Acum (gr)	% Ret	% Que Pasa del Total
2 1/2"	75	0	0	0	100
2"	50	0	0	0	100
1 1/2"	37,5	0	0	0	100
1"	25	0	0	0	100
3/4"	19	0	0	0	100
1/2"	12,5	85,72	85,72	6,12	93,88
3/8"	9,5	255,96	341,7	24,4	75,6
Nº4	4,75	521,47	863,2	61,64	38,36
Nº10	2	123,94	987,1	70,49	29,51
Nº40	0,425	8,5	995,6	71,1	28,9
Nº200	0,075	2,72	998,3	71,29	28,71

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.5 Curva granulométrica de la muestra de caucho



Fuente: Elaboración propia.

3.4.1.2 Determinación del contenido de humedad natural

El contenido de humedad de un suelo es la suma de sus aguas libres, capilares e higroscópicas. El objetivo fundamental de esta práctica es la determinación del contenido de humedad de la muestra de suelo, que es la realización entre el peso del agua que contiene la muestra y el peso de la muestra después de ser secada al horno a 110 °C en un tiempo determinado, peso recomendado para el ensayo de (100 a 200) gr.

Procedimiento:

- a) Preparación de la muestra natural obtenida en campo.
- b) Pesamos las taras con las cuales trabajaremos.
- c) Colocamos la muestra en las taras y pesamos, sería peso de suelo húmedo más tara.
- d) Secamos en horno la muestra humedad.
- e) Pasado 24 horas sacamos la muestra y pesamos, sería peso de suelo seco más tara.

Tabla 3.6 Contenido de humedad

Contenido de humedad			
Cápsula	P1	P5	P10
Peso de suelo húmedo + Cápsula (gr)	155,06	154,71	148,75
Peso de suelo seco + Cápsula (gr)	152,15	151,22	145,62
Peso de cápsula (gr)	12,5	12,53	12,55
Peso de suelo seco (gr)	139,65	138,69	133,07
Peso del agua (gr)	2,91	3,49	3,13
Contenido de humedad (%)	2,08	2,52	2,35

Fuente: Elaboración propia.

3.4.2 Límite líquido (ASTM D-4318 - AASHTO T-89)

El límite Líquido, es la humedad, expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remodelado en el límite entre los estados líquido y plástico. Corresponde a la humedad necesaria para que una muestra de suelo remodelada, depositada en el equipo Casagrande, dividida en dos porciones simétricas separadas 2 mm entre sí, fluya y entren en contacto en una longitud de 10 mm, aplicando 25 golpes.

Materiales:

La cantidad de suelo utilizado fue de 100 g. que pasa la malla No 40, la muestra original fue previamente secada al aire.

Equipo:

- Tamiz No 40.
- Copa de Casagrande.
- Espátula.

- Balanza de precisión con sensibilidad a 0.01 g.
- Estufa o horno con control de temperatura.
- Probeta graduada.
- Regla metálica graduada.

Ajuste y Control de la Copa de Casagrande:

Se ajustó la altura de caída de la taza, para lo cual se giró la manivela hasta que la taza se eleve a su mayor altura. Utilizando el calibrador de 10 mm, se verificó que la distancia entre el punto de percusión y base sea 10 mm exactamente.

Procedimiento:

- a) Se colocó la muestra dentro de un recipiente adecuado que nos permitió mezclarlo con agua.
- b) Se adicionó agua y empezó un proceso de homogenización, de tal forma que el agua se incorpore totalmente a la muestra del suelo.
- c) Una vez que el suelo y el agua han formado una masa uniforme y consistente, se colocó una porción en el recipiente del equipo de Casagrande, con la ayuda de la espátula se verificó que el nivel de la muestra del suelo no supere el borde del recipiente y que el nivel máximo entre la base del recipiente y el suelo sea de 10 mm. El exceso de suelo se retiró y retornó al recipiente donde se ha realizado la mezcla.
- d) Con la ayuda del ranurador (se pasó manteniéndolo perpendicular a la superficie interior de la taza), se dividió la muestra del suelo que está en el recipiente del equipo de Casagrande en dos mitades, mediante un movimiento suave a lo largo del diámetro de este, de atrás hacia la parte frontal. El movimiento fue cuidadoso propiciando la construcción de la ranura en un solo movimiento y de manera que esta llegue hasta el fondo y quede limpia y no se dañen los bordes de las mitades de suelo generadas.
- e) Una vez hecho el surco o ranura, con la ayuda de manivela del equipo, se dio golpes sin parar a la cuchara a una velocidad aproximada de 2 golpes/segundo, hasta que las dos mitades se junten (cierren) aproximadamente 12.7 mm. Se registró el número de golpes en las cuales se cerró la ranura.

f) Se removió del equipo parte de la muestra del suelo (10 gr), tomándola del sector donde se cerró la ranura. La muestra tomada fue llevada a un recipiente, se registró su peso y se sometió a secado para determinar la humedad.

g) Luego se retiró el resto de la muestra el recipiente de mezclado, se limpió y seco la copa de Casagrande así como el ranurador.

h) Este proceso se repitió tres veces, adicionando agua o extendiendo la muestra para someterla a secado, facilitando así la obtención de otros puntos con diferente humedad y numero de golpes.

Cálculos:

Se determinó el contenido de agua, expresado en porcentaje de peso respecto al peso del suelo seco, mediante la siguiente ecuación.

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Dónde:

W_w = Peso del agua presente dentro de la muestra. Se determinó como la diferencia entre el peso húmedo y el peso seco de la muestra.

W_s = Peso seco de la muestra.

Elaboración de la curva de flujo.

- El objetivo de este procedimiento fue obtener los puntos suficientes para construir un gráfico semilogarítmico con el número de golpes como abscisa en escala logarítmica vs Contenido de Humedad como ordenada en escala aritmética.
- Se dibujó los puntos correspondientes a los resultados de cada una de los cuatro ensayos efectuados y se construyó una recta (curva de flujo).
- Se expresó el Limite Liquido del suelo como la humedad correspondiente a la intersección de la curva de flujo con la abscisa de 25 golpes, aproximando al entero más próximo.

3.4.3 Límite plástico (Nomas ASTM D 4318 y AASHTO T-90)

Humedad expresada como porcentaje de la masa de suelo seco en horno, de un suelo remodelado en el límite entre los estados plástico y semisólido. Corresponde a la humedad necesaria para que bastones cilíndricos de suelo de 3mm de diámetro se disgreguen en trozos de 0,5 a 1cm de largo y no puedan ser reamasados ni reconstituidos.

Muestra:

La cantidad que se uso fue 100 g. que pasa la malla No 40 de la muestra original, previamente secada al aire.

Equipo:

- Tamiz No 40.
- Balanza de precisión, con sensibilidad a 0.01g.
- Estufa con control de temperatura.
- Mortero y mango.
- Espátula.
- Placa de vidrio esmerilado.
- Probeta graduada de 500 ml de capacidad.
- Pipetas.
- Recipientes (taras).

Procedimiento:

- a) Se colocó la muestra dentro de un recipiente que nos permitió mezclarlo con agua.
- b) Se adiciono agua para empezar un proceso de homogenización, de tal manera que el agua se incorporó al suelo.
- c) Una vez que el agua con el suelo ha formado una masa consistente, con la ayuda de la mano se moldeo una especie de balón, el cual se lo dividió en tres pedacitos más pequeños.
- d) Se tomó uno de los pedazos y con una suave y uniforme presión (peso de la mano), se rodó sobre el vidrio esmerilado hasta ir formando rollos, los cuales en su proceso de rodado disminuyeron poco a poco su tamaño.

e) El proceso de rodado se realizó hasta llegar a un diámetro de 3mm, hasta que el rollito se empezó a resquebrajar.

f) Luego se tomó los rollitos con estas características, se llevó a un recipiente, se tomó su peso y determinó su humedad. g) El proceso de llevar los rollitos hasta el diámetro deseado en las condiciones deseadas, se repitió de igual forma con los baloncitos separados originalmente separados, de manera que se pudo completar tres recipientes con rollitos.

Cálculos:

Se determinó el contenido de agua, expresado en porcentaje de peso respecto al peso del suelo seco, mediante la siguiente ecuación.

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100$$

Dónde:

W_w = Peso del agua presente dentro de la muestra. Se determinó como la diferencia entre el peso húmedo y el peso seco de la muestra.

W_s = Peso seco de la muestra.

Se determinó dos valores de humedad, de los cuales el promedio de los tres valores represento el valor del Límite Plástico.

3.4.4 Índice de plasticidad

Definimos al índice de plasticidad de un suelo como la diferencia entre su límite líquido y su límite plástico.

$$I.P = L.L. - L.P.$$

Dónde:

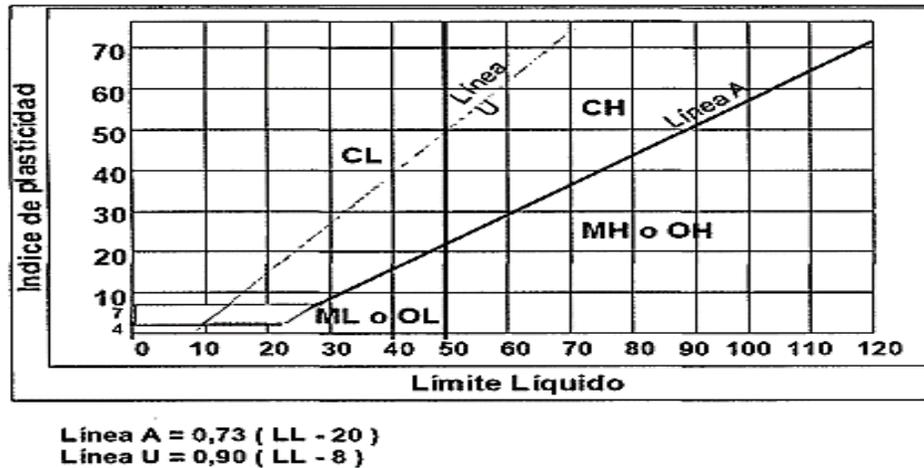
L.L. = Límite Líquido

I.P = Índice de Plasticidad

L.L. y L.P., son números enteros

Calculado en índice de plasticidad clasificamos al suelo, teniendo en cuenta la carta de plasticidad de Casagrande según Norma ASTM D- 2487 -93, fig. 3.5.

Figura 3.6 Carta de Plasticidad



Fuente: Ingeniería geotécnica.

El manual de carreteras "Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimento" en la sección: Suelos y pavimentos, da a conocer la característica del suelo en base al índice de plasticidad, tal como se observa en la figura No 3.6 y de acuerdo a esto se dedujo las características del suelo ensayado.

Figura 3.7 Clasificación de Suelos según Índice de Plasticidad

Índice de Plasticidad	Plasticidad	Característica
IP > 20	Alta	Suelos muy arcillosos
IP ≤ 20 IP > 7	Media	Suelos Arcillosos
IP < 7	Baja	Suelos poco arcillosos plasticidad
IP = 0	No Plástico (NP)	Suelos exentos de arcilla

Fuente: Univercidad Cesar Vallejo.

Límites de Atterberg

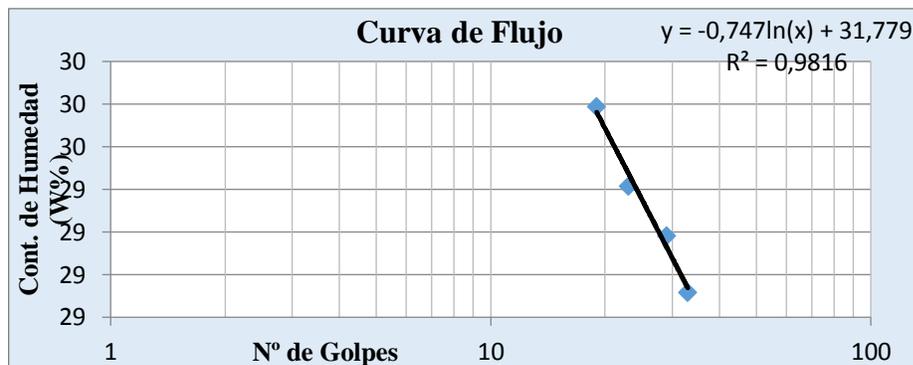
P1: 2da Circunvalación

Tabla 3.7 Límite líquido punto 1

Determinación de Límite Líquido					
Capsula N°	Ud	1	2	3	4
Número de golpes		19	23	29	33
Peso suelo húmedo + cáp.	gr	33,18	34,27	33,56	32,92
Peso suelo seco + cáp.	gr	28,51	29,45	28,97	28,24
Peso del agua	gr	4,67	4,82	4,59	4,68
Peso de la cápsula	gr	12,73	13,06	13,3	12,19
Peso del suelo seco	gr	15,78	16,39	15,67	16,05
Contenido de humedad	%	29,59	29,41	29,29	29,16
				LL=	29

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.8 Límite líquido de la muestra P1



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.8 Límite plástico punto 1

Determinación de Límite Plástico				
Número de cápsula	Ud	1	2	3
Peso suelo húmedo + cápsula	gr	16,25	14,47	15,89
Peso suelo seco + cápsula	gr	15,65	14,13	15,23
Peso del agua	gr	0,6	0,34	0,66
Peso de la cápsula	gr	12,53	12,31	11,86
Peso del suelo seco	gr	3,12	1,82	3,37
Contenido de humedad	%	19,23	18,68	19,58
			LP=	19

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.9 Índice de plasticidad punto 1

$$\mathbf{IP = 10}$$

Fuente: Elaboración propia.

Resumen de muestras.

Tabla 3.10 Resultados de los ensayos de límites de Atterberg

2da Circunvalación					
Ensayos	P1	P2	P3	P4	P5
Límite líquido LL	29	29	29	28	20
Límite plástico LP	19	18	12	17	13
Ind. de plasticidad IP	12	11	17	11	7
2da Circunvalación					
Ensayos	P6	P7	P8	P9	P10
Límite líquido LL	20	26	21	36	34
Límite plástico LP	13	18	13	26	23
Ind. de plasticidad IP	8	8	8	13	11

Fuente: Elaboración propia.

3.4.5 Clasificación S.U.C.S (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos)

Clasificación de Suelos (SUCS); este sistema fue adoptado por la ASTM (American Society of Testing Materials) como parte de sus métodos normalizados.²

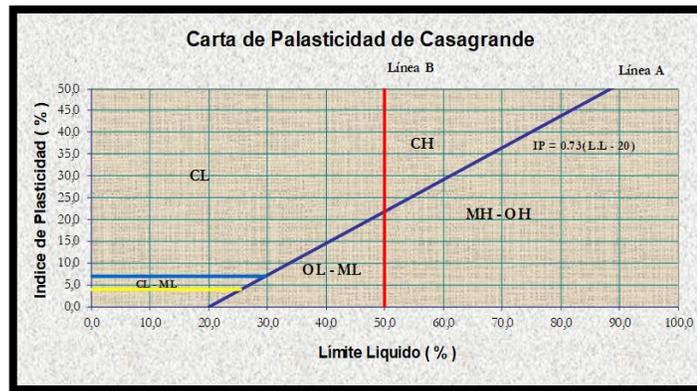
El Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, SUCS (IRAM 10509 y ASTM D 2487 y 2488) es el de uso más extendido en la práctica. Está basado en el análisis granulométrico y en los límites de Atterberg (límites líquido y plástico) de los suelos.³

El objetivo de la clasificación de suelos es de ordenarlos en grupos en base a su granulometría, esto nos facilita la comparación de sus propiedades entre distintos tipos de suelos.

² CARLOS CRESPO VILLALAZ, Mecánica de Suelos y Cimentaciones, 5ta edición, México, Limusa 2004, Cap. 6

³ <http://materias.fi.uba.ar/6408/santamarina.pdf>

Figura 3.9 Carta de plasticidad de Casagrande (S.U.C.S.)



Fuente: Mecánica de suelos aplicados.

Clasificación de suelos según S.U.C.S

Tabla 3.11 Resultados de clasificación de los suelos por S.U.C.S.

2da Circunvalación						
Caract.	% que pasa total		Lim. de Atterberg		Clasificación	
Muest.	N°40	N°200	LL	IP	S.U.C.S	Descripción
P1	99,49	97,25	29	12	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad LL<50% y IP>7%
P2	99,92	98,68	29	11	CL	
P3	99,63	98,36	29	17	CL	
P4	99,89	80,41	28	11	CL	
P5	92,17	73,21	20	7	CL	
P6	93,92	72,36	20	8	CL	
P7	89,06	83,00	26	8	CL	
P8	99,19	73,10	21	8	CL	
P9	99,56	94,48	36	13	ML		Limo de baja compresibilidad
P10	99,72	93,89	34	11	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad

Fuente: Elaboración propia.

3.4.6 Clasificación de suelos según Aashto M-145

El sistema de clasificación de suelos AASHTO (American Association of State Highway Officials) está basado en los mismos parámetros que el Sistema Unificado de Clasificación del Suelo (SUCS). Sin embargo, su empleo se restringe a proyectos de carreteras y, en menor medida, a ciertas aplicaciones que incluyen la caracterización de materiales de relleno.

En el sistema AASHTO, los suelos pueden clasificarse según ocho (8) grupos principales A-1 a A-8, en base a su distribución granulométrica, límite líquido e índice de plasticidad. Los suelos de los grupos A-1, A-2 y A-3 son materiales de grano grueso, mientras que los incluidos en los grupos A-4, A-5, A-6 y A-7 son de grano fino. El grupo A-8, por su parte, incluye suelos como la turba, compostas orgánicas y otros suelos con alto contenido de materia orgánica, los cuales se identifican mediante inspección visual. La figura 3.10 muestra el cuadro que se emplea para aplicar el sistema AASTHO.

Figura 3.10 Clasificación de suelos arcillosos, sistema AASHTO

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

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

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

Fuente: Ingeniería geotécnica

Clasificación de suelos según AASHTO M-145

Tabla 3.12 Resultados de clasificación de los suelos por AASHTO

2da Circunvalación							
Caract.	% que pasa total		Lim. de Atterberg		Clasificación		
Muest.	Nº40	Nº200	LL	IP	A.A.S.H.T.O.	Índice de grupo	Descripción
P1	99,5	97,3	29	12	A - 6	12	Suelo arcilloso de Regular a malo
P2	99,9	98,7	29	11	A - 6	13	
P3	99,6	98,4	29	17	A - 6	13	
P4	99,9	80,4	28	11	A - 6	10	
P5	92,2	73,2	20	7	A - 4	8	
P6	93,9	72,4	20	8	A - 4	8	Suelo arcilloso de Regular a malo
P7	89,1	83,0	26	8	A - 4	10	
P8	99,2	73,1	21	8	A - 4	8	
P9	99,6	94,5	36	13	A - 6	12	
P10	99,7	93,9	34	11	A - 6	12	

Fuente: Elaboración propia.

3.4.7 Compactación Proctor modificado (Norma ASTM D 1557)

El objetivo del ensayo es obtener la densidad máxima de un suelo y la humedad óptima que es necesaria aportar para alcanzar dicha densidad.

Utilizaremos un molde metálico con una capacidad de 2,117 cm³ y una maza de 4,535 kg, la cual se dejará caer en este caso desde una altura mayor (457 mm), dando lugar a una energía de compactación mayor. Además, se dispondrán 5 capas, dando a cada una de ellas un total de 56 golpes.

Material:

- Muestra seca de suelo al aire (25 kg).
- Papel Filtro
- Agua

Equipo:

- Molde cilíndrico.
- Base metálica.
- Pistón.
- Balanza de capacidad mayor a 20 kg, con sensibilidad de 1 g.

- Horno de secado con control de temperatura.
- Enrasador.
- Tamiz No 40.
- Martillo.
- Recipientes, taras.

Procedimiento:

- a) Se pasó el suelo a través del tamiz No 4.
- b) Se pesó el molde W_m .
- c) Se colocó en la base del molde papel filtro y se se puso la extensión.
- d) La muestra se dividió en 4 fracciones (para obtener 4 puntos para la curva).
- e) A cada una de estas fracciones se le agrego agua, de tal manera que el contenido de humedad vario de 1 'Y: a 2 % aproximadamente.
- f) A cada una de estas fracciones se lo dividió en cinco porciones iguales y se lo distribuyo uniformemente dentro del molde (número de capas) y se lo compacta cada capa con 56 golpes con el pisón.
- g) La última (5°) capa excedió el borde del molde y luego se retiró el collarín, para luego enrasar cuidadosamente el suelo compactado. Se rellenó algunas concavidades dadas en algunos de los ensayos.
- h) Se limpió el molde suelo suelto que pudo haberse adherido en el exterior, luego se pesó el molde con la muestra. ($W_{mh} + m$).
- i) Luego se extrajo una muestra compactada y se determinó su contenido de humedad.

Cálculos:

- Se calculó la densidad húmeda de cada una de las fracciones de muestra compactada, mediante la fórmula:

$$D_h = W_{mh} / V_m$$

- Se determinó la humedad promedio de cada muestra compactada.
- Se calculó las respectivas densidades secas, para cada una de las
- fracciones de muestras compactadas, con la fórmula:

$$D_s = \left(\frac{O_h}{1 + (w\% / 100)} \right)$$

- Con los resultados obtenidos se graficó las densidades secas del suelo como ordenadas y sus correspondientes humedades como abscisas, en un gráfico a escala natural.
- La humedad correspondiente a la cumbre de la curva dibujada, se le llama contenido óptimo de humedad y la correspondiente Densidad seca se le llama Densidad Máxima.

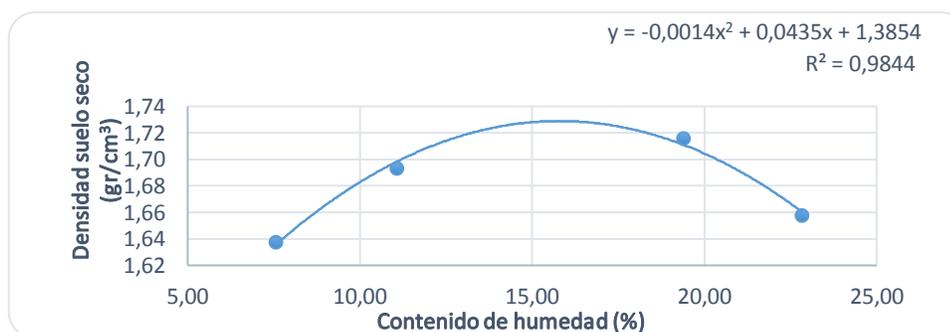
Proctor modificado T-180

Tabla 3.13 Compactación Punto 1 al 0% de caucho

2da Circunvalación punto 1		0% de caucho		
Muestra N° 1	Volumen mm ³	2117		
N° de capas	5	5	5	5
N° de golpes por capa	56	56	56	56
Peso suelo húmedo + molde	10194,1	10446,3	10801,1	10775,7
Peso del molde	6465	6465	6465	6465
Peso suelo húmedo	3729,1	3981,3	4336,1	4310,7
Volumén de la muestra	2117	2117	2117	2117
Densidad suelo húmedo (gr/cm ³)	1,76	1,88	2,05	2,04
Cápsula N°	1	2	3	4
Peso suelo húmedo + capsula	65,22	66,14	74,41	89,37
Peso suelo seco + cápsula	61,6	60,75	64,39	75,16
Peso del agua	3,62	5,39	10,02	14,21
Peso de la cápsula	13,65	12,01	12,7	12,91
Peso suelo seco	47,95	48,74	51,69	62,25
Contenido de humedad (%h)	7,55	11,06	19,38	22,83
Densidad suelo seco (gr/cm ³)	1,64	1,69	1,72	1,66

Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.11 Compactación 0% de Caucho Punto 1



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.14 Resultados de la compactación del punto 1

Densidad máxima (gr/cm ³)	1,72
Humedad óptima (%)	15,54

Fuente: Elaboración propia.

Resumen de muestras de los puntos: P1, P5 y P10 con sus respectivos % de caucho.

Tabla 3.15 Resumen Densidad y humedad óptima.

Ensayos		Densidad seca máxima (gr/cm ³)			Contenido Optimo de Humedad (%)		
		P1	P5	P10	P1	P5	P10
Calicata Progresiva		Km 00+000	Km 02+500	Km 05+000	Km 00+000	Km 02+500	Km 05+000
Porcentaje de caucho granular (%)	0 %	1,72	1,85	1,71	15,54	14,92	15,72
	5 %	1,75	1,93	1,75	15,03	12,37	15,42
	10 %	1,79	1,73	1,76	13,33	10,33	12,89
	15 %	1,62	1,71	1,62	13,83	11,22	13,28

Fuente: Elaboración propia.

3.4.8 Determinación del valor soporte (CBR) California bearing ratio (Normas ASTM D 1883 y AASHTO T-193)

Este ensayo nos permitió determinar el índice de resistencia de los suelos denominado valor de relación de soporte, que es muy conocido como CBR (California Bearing Ratio), este ensayo se realizó sobre suelo preparado en el laboratorio, teniendo en cuenta el contenido óptimo de Humedad, determinado mediante el ensayo de proctor modificado. Mediante este ensayo determinaremos la capacidad de soporte de las arcillas, en condiciones normales y en combinación con caucho granular, objetivo del presente proyecto de investigación.

Equipo:

- Molde CBR (base, collarín de extensión, plato o disco perforado con vástago, trípode).
- Disco espaciador.
- Piston.
- 2 pesas.
- Prensa de ensayo (Ensayo de penetración).

- Horno con control de temperature.
- Balanza.
- Probeta graduada de 500 ml.
- Regla metálica.
- Tamiz No 4.
- Papel filtro.
- Taras.

Muestra:

Para cada determinación de densidad (un punto de la curva de compactación), se necesitó 5kg de muestra, secada previamente al aire. Cada muestra se utilizó una sola vez.

Procedimiento:

- Se realizó los mismos pasos que para el ensayo del proctor modificado compactado en 5 capas con un espesor aproximado.
- La primera muestra se compacto con 12 golpes, la segunda con 25 y la tercera con 56 golpes por capa.
- Se invirtió el molde y se ensambló el molde con la muestra en la placa de base.
- Sobre la superficie libre se colocó un papel filtro, luego se puso el plato con el vástago graduable y sobre las pesas de sobrecarga.
- Se colocó cuidadosamente el molde dentro de un depósito lleno con agua.
- Una vez colocado el molde dentro del depósito con agua, se montó el trípode con un extensómetro y se registró la lectura inicial.
- Cada 24 horas, por un periodo de 96 horas (4 días) se tomaron y se registraron las lecturas del extensómetro.
- Luego de 96 horas se tomó y anotó la lectura final para calcular el hinchamiento, la cual es referida en porcentaje a la altura inicial de la muestra antes de ser sumergida en agua.

Esfuerzo – penetración

- Después de saturada la muestra durante 4 días, se sacó el cilindro y se drenó, durante 15 minutos, para drenar bien se volteó el cilindro.

- Se pesó la muestra.
- Se colocó encima de la muestra las pesas de sobrecarga y se llevó debajo de la prensa y se baja el pistón sobre la muestra.
- Luego de asentado el pistón se colocó en ceros el extensómetro y se hincó el pistón en incrementos de 0.025" a la velocidad de 0.05"/minuto y se leyeron las cargas totales que ha sido necesario aplicar hasta hincar el pistón 0.50 pulgadas.
- Luego de haber hincado hasta 0.50". se soltó la carga lentamente, se retiró el molde de la prensa, se quitan las bases y la base metálica.
- Se determinó el contenido de humedad y la densidad humedad de la muestra, determinando de la parte superior, media y de la parte inferior y considerando el valor promedio de los dos valores.

Cálculo del C.B.R:

- Las lecturas tanto de las penetraciones como de las cargas (reducidas a cargas unitarias) se representaron gráficamente (3 curvas, esfuerzo - penetración) a escala natural, en las abscisas la penetración y el esfuerzo en las ordenadas.
- En las curvas se determinó las cargas unitarias (esfuerzos) correspondiente a 0.10" y 0.20" de penetración.
- Se determinó el C.B.R para 0.10" y 0.20", tomando como material de comparación la piedra triturada (macadám), para ello se dividió los esfuerzos correspondientes a 0.10" y 0.20" de la muestra con los correspondientes de la muestra patrón, con la siguiente formula:

$$C.B.R = 100 \times \frac{\sigma_e}{\sigma_p}$$

Donde:

σ_e = Esfuerzo de la muestra ensayada.

σ_p = Esfuerzo de la muestra patrón.

- Con los resultados obtenidos se dibujó una curva Densidad Seca - CBR, correspondiente a 0.15" de penetración.
- El valor del C.B.R para diseño es el menor valor obtenido, correspondiente al 95% de la densidad seca máxima.

Valor de relación de soporte (CBR).

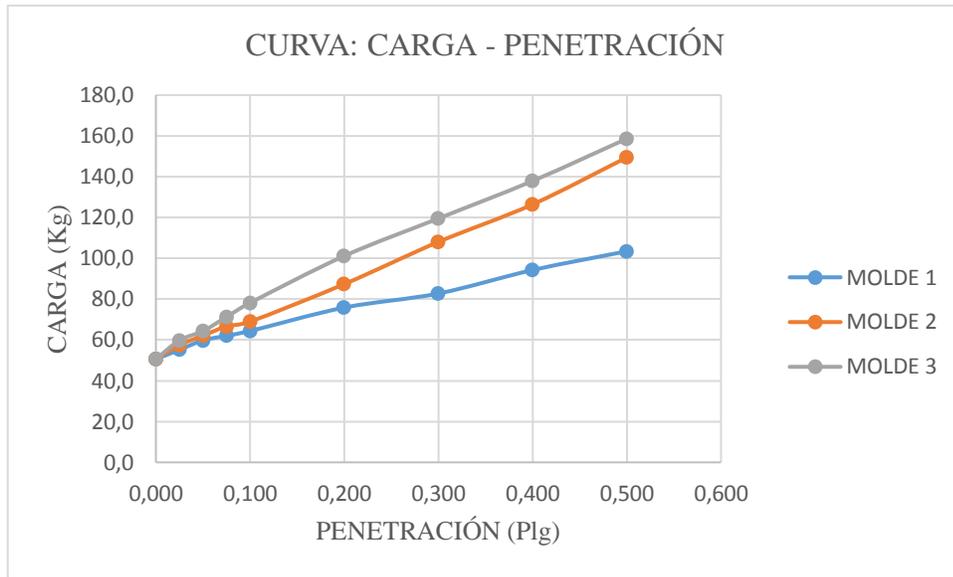
Tabla 3.16 CBR Punto 1 al 0% de caucho

Nº capas	5			5			5				
Nº golpes por capa	12			25			56				
Condición de la muestra	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M	Antes de mojarse		D. de M		
Peso muestra húm.+molde	11395,00		11445,00	11980,00		11880,00	12400,00		12585,00		
Peso Molde	7350,00		7350,00	7870,00		7870,00	7930,00		7930,00		
Peso muestra húmeda	4045,00		4095,00	4110,00		4010,00	4470,00		4655,00		
Volumen de la muestra	2131,29		2131,29	2128,06		2128,06	2132,69		2132,69		
Peso Unit. Muestra Húm.	1,898		1,921	1,931		1,884	2,096		2,183		
Muestra humeda	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.	Fondo	Superf.	2" sup.		
Tara Nº	10,1	10,2	10,3	10,4	10,5	10,6	10,7	10,8	10,9		
Peso muestra húm + tara	53,04	54,90	64,58	68,19	66,91	117,29	59,98	89,92	69,79		
Peso muestra seca + tara	48,98	49,87	59,00	61,90	61,32	105,46	54,07	80,50	63,10		
Peso del agua	4,06	5,03	5,58	6,29	5,59	11,83	5,91	9,42	6,69		
Peso de tara	19,07	12,70	18,80	17,57	20,71	19,35	18,80	18,42	17,78		
Peso de la muestra seca	29,91	37,17	40,2	44,33	40,61	86,11	35,27	62,08	45,32		
Contenido humedad %	13,57	13,53	13,88	14,19	13,77	13,74	16,76	15,17	14,76		
Promedio cont. Humedad	13,55		13,88	13,98		13,74	15,97		14,76		
Peso Unit.muestra seca	1,67		1,69	1,69		1,66	1,81		1,90		
EXPANSIÓN											
		Tiempo	molde nº 1			molde nº 2			molde nº 3		
fecha	hora	en	lect.	expansión		lect.	expansión		lect.	expansión	
		DIAS	EXTENS.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%	EXTENS.	CM.	%
14-nov	10:10	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0
15-nov	08:10	1	1,20	0,12	0,67	0,25	0,03	0,14	0,15	0,02	0,08
16-nov	12:00	2	1,50	0,15	0,84	1,10	0,11	0,62	0,85	0,09	0,48
17-nov	10:36	3	1,90	0,19	1,07	1,15	0,12	0,65	0,90	0,09	0,51
18-nov	11:00	4	2,10	0,21	1,18	1,20	0,12	0,67	0,95	0,10	0,53

Penetracion		carga	molde nº 1				molde nº 2				molde nº 3			
		normal	carga ensayo		c.b.r. correg		carga ensayo		c.b.r. correg		carga ensayo		c.b.r. correg	
Pulg.	mm	Kg	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%	Kg	Kg/cm ²	Kg	%
0,000	0		50,6	0			50,6	0			50,6	0		
0,025	0,63		55,2	2,9			57,5	3,0			59,8	3,1		
0,050	1,27		59,8	3,1			62,1	3,2			64,4	3,3		
0,075	1,9		62,1	3,2			66,7	3,4			71,3	3,7		
0,100	2,54	1360	64,4	3,3		4,7	69,0	3,6		5,1	78,2	4,0		5,7
0,200	5,08	2040	75,9	3,9		3,7	87,4	4,5		4,3	101,2	5,2		5,0
0,300	7,62		82,8	4,3			108,0	5,6			119,5	6,2		
0,400	10,16		94,3	4,9			126,4	6,5			137,9	7,1		
0,500	12,7		103,4	5,3			149,4	7,7			158,6	8,2		

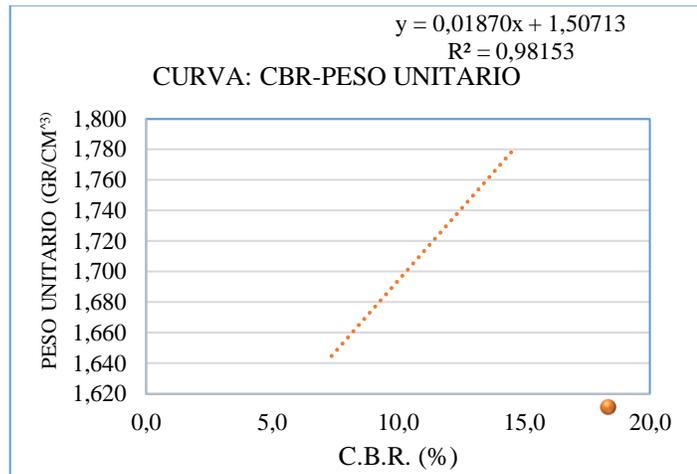
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.12 Curva carga – penetración



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.13 CBR – Peso unitario



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 3.17 Valor de CBR del punto 1

CBR 100% D.máx	
6	%
CBR 95% D.Máx.	
5	%

Fuente: Elaboración propia.

Resumen de muestras de los puntos con diferentes % de caucho.

Tabla 3.18 CBR en condiciones normales y con diferentes porcentajes

C.B.R.	95% MDS (0,1")	100% MDS (0,1")	95% MDS (0,1")	100% MDS (0,1")	95% MDS (0,1")	100% MDS (0,1")	
Ensayos	P1		P5		P10		
Calicata Progresiva	Km 00+000		Km 02+500		Km 05+000		
Porcentaje de caucho granular (%)	0 %	5	6	4	7	5	6
	5 %	10	20	11	16	9	15
	10 %	10	14	10	15	10	13
	15 %	4	9	9	15	4	9

Fuente: Elaboración propia.

3.5 Estabilización suelo – suelo

3.5.1 Lugar de extracción del suelo fino

Se realizó la extracción de la muestra del mismo tramo en estudio, verificando cual de los 3 puntos estudiados era el mas desfavorable revisando los datos obtenidos en sus CBR.

El suelo aluvial se encuentra ubicado en la comunidad de Equis Norte (provincia Méndez) aproximadamente a 10 minutos de Tarija, la capital del departamento. Para la extracción del material se utilizó pala, pico y saquillos (etiquetadas), en la cual se extrajo una muestra representativa de suelo aluvial para realizar los respectivos ensayos de laboratorio en la U.A.J.M.S.

Al ver que el punto mas desfavorable es el punto 1 con valores casi similares al punto 3, se decidió hacer en este punto la estabilización suelo - suelo.

Al tratarse de un suelo fino lo mas recomendable y económico es estabilizarlo con suelo aluvial por lo cual agregamos en diferentes porcentajes, para así verificar y comparar los resultados obtenidos.

3.5.2 Caracterización y clasificación del suelo aluvial

Se entiende por suelo aluvial a un suelo sedimentario que se ha formado a partir de material que ha sido transportado por corrientes de agua, lo cual en este trabajo de investigación se tomará como un estabilizante, que será clasificada mediante una granulometría controlada y se añadirá en diferentes porcentajes al suelo a estabilizar, tomando en cuenta los respectivos porcentajes de combinaciones respecto al suelo.

Tabla 3.19 Resultados del análisis granulométrico del suelo aluvial.

Tamices	Tamaño (mm)	Ensayo 1
		% que pasa del total
3"	75,00	100,0
2"	50,00	100,00
1 1/2"	37,50	100,00
1"	25,00	99,02
3/4"	19,00	85,36
1/2"	12,50	62,63
3/8"	9,50	48,74
Nº 4	4,75	32,45
Nº 10	2,00	23,46
Nº 40	0,425	11,41
Nº 200	0,075	4,75

Fuente: Elaboración propia.

Tabla3.20 Clasificación del suelo aluvial

Clasificación de suelos	
SUCS:	GW
AASHTO:	A-1-a

Fuente: Elaboración propia.

3.5.3 Compactación de la combinación del suelo con aluvial

Tabla 3.21 Resultados del ensayo de compactación del suelo combinado con distintos porcentajes de suelo aluvial.

Compactación		
	Zona de estudio	2da Circunvalación
% de aluvial	Número de ensayos	1
10%	Densidad máxima (gr/cm ³)	1,88
	Humedad óptima (%)	1366
20%	Densidad máxima (gr/cm ³)	1,92
	Humedad óptima (%)	11,96
30%	Densidad máxima (gr/cm ³)	1,95
	Humedad óptima (%)	11,22

Fuente: Elaboración propia.

3.5.4 CBR y expansión de la combinación del suelo con aluvial

Tabla 3.22 Resultados del ensayo de CBR y expansión del suelo combinado con distintos porcentajes de suelo aluvial.

CBR y Expansión		
Zona de estudio		2da Circunvalación
% de aluvial	Nº Ensayos	1
10%	CBR al 100% D. máx.	7,47
	CBR al 95% D. máx.	6,79
20%	CBR al 100% D. máx.	12,54
	CBR al 95% D. máx.	11,34
30%	CBR al 100% D. máx.	15,99
	CBR al 95% D. máx.	14,89

Fuente: Elaboración propia.

3.5.5 Procedimiento para el mejoramiento del suelo fino combinado con suelo aluvial

Una vez determinado todas las características del suelo fino se desarrolla el estudio con la combinación del suelo aluvial a distintos porcentajes de 10%, 20%, y 30%, el cual es analizado a partir de la compactación, los ensayos de la relación de soporte California (CBR) para hallar el porcentaje recomendable de la mezcla.

3.5.5.1 Procedimiento para la compactación del suelo natural combinado con suelo aluvial

Para la determinación de la humedad óptima y la densidad máxima en laboratorio se procedió a mezclar de acuerdo a la dosificación empleada de 10% aluvial - 90% suelo fino, 20% aluvial - 80% suelo fino, 30% aluvial - 70% suelo fino, se prepara una muestra de suelo aproximadamente de 25 kg combinando un 10% de suelo aluvial y 90 % de suelo fino, una vez preparado la muestra se debe calcular su contenido de humedad antes de compactarlo.

Se divide el suelo en 5 partes iguales de 5000 gr cada uno, depositar en fuentes y en cada uno se incrementa agua en diferentes porcentajes.

Se pesa el molde con la base y sin collarín y se determina su volumen, una vez calculado los porcentajes requeridos de humedad se procede a incrementar tales cantidades de agua al suelo mezclando y homogeneizando la muestra para luego introducir al molde

compuesto con su extensión o collarín en cinco capas iguales compactando cada capa a 56 golpes. Una vez completada la compactación se retira el collarín y se enrasa con la regla metálica hasta dejar una superficie lisa hasta la altura del molde, luego se pesa el molde con su base con el suelo compactado y enrazado, registrando en la planilla de cálculos, seguidamente se retira el molde de su base y se extrae tres muestras del corazón del suelo compactado para determinar el contenido de humedad real del suelo compactado. Luego de esto realizar los cálculos y graficar la curva de densidades en el eje de las ordenadas y porcentaje de humedad en el eje de las abscisas para obtener una ecuación y obtener la humedad óptima que será donde se dé la densidad máxima de compactación, repetir este procedimiento para las demás combinaciones de suelo aluvial de 20% y 30%.

3.5.5.2 Procedimiento de la relación de soporte California CBR del suelo natural combinado con suelo aluvial

Con la dosificación establecida de 10%, 20% y 30% se prepara el material para el suelo fino, calculando la cantidad de suelo aluvial y el suelo fino que se necesita en cada ensayo, con el contenido óptimo de humedad y la densidad máxima compactada de acuerdo al ensayo de proctor se compacta 3 moldes o probetas con diferentes energías.

Para cada molde colocar el disco espaciador sobre la placa base, fijar el molde con su collar de extensión sobre dicha placa y colocar un disco de papel filtro sobre el espaciador. Compactar cada una de las porciones de suelo húmedo en el molde, en un número de capas iguales al de las probetas usadas en el ensayo de humedad - densidad. Cada probeta se debe compactar con distinta energía de 12, 25, 56 golpe y pesar la muestra húmeda más molde.

Las muestras elaboradas bajo estos procedimientos, se sometieron a un proceso de inmersión en agua para simular las condiciones de saturación a las cuales podrían estar sometidos los suelos como es la subrasante de una carretera, y en esta forma, obtener los CBR de los suelos bajo las condiciones más críticas, esto durante un período mínimo de 96 horas donde se colocan pesas sobre las mismas, por otro lado determinar su expansión efectuando 4 lecturas empleando un extensómetro debidamente calibrado, cumpliendo con periodo de inmersión retirar la muestra de la piscina para luego dejar drenar por un

lapso de 15 minutos y secar sus superficies expuestas, se debe registrar el peso muestra saturada más molde.

Al aplicar la carga en el pistón de penetración a una velocidad sea de 1.27 mm/min, registrar las lecturas de carga en los siguientes niveles de penetración de 0.63; 1.27; 1.91; 2.54; 3.18; 3.81; 4.45; 5.08; 7.62; 10.16; y 12.7mm anotando la carga máxima alcanzada a una penetración dada. Sacar el molde de la prensa de CBR para extraer muestra del fondo, de la superficie y la segunda superficie y depositarlas en cápsulas determinando su peso húmedo más cápsula, inmediatamente se lleva al horno por 24 horas para después determinar su peso seco más cápsula, con los datos procesados y los resultados de estos se graficará la carga vs penetración.

3.5.5 Resumen de resultados de los ensayos de suelo - aluvial

Tabla 3.23 Resumen de las características mecánicas del suelo combinado con distintos porcentajes de suelo aluvial

% de aluvial	Compactación		CBR Promedio	
	Densidad máxima (gr/cm ³)	Humedad óptima (%)	al 100% D. máx.	al 95% D. máx.
0%	1,72	15,54	5,8	4,7
10%	1,88	13,66	7,38	6,71
20%	1,92	11,96	12,80	11,48
30%	1,95	11,22	15,93	14,81

Fuente: Elaboración propia.

3.5.5.1 Análisis de resultados de los ensayos de suelo A-6 (12) – aluvial

- **Influencia del suelo aluvial en el CBR del suelo A-6 (12).**

Se puede observar como aumenta la resistencia del suelo, de la combinación del suelo A-6 (13) con aluvial a distintos porcentajes respecto al valor de CBR natural de 4,7%, al agregar el 10% de suelo aluvial incrementa a 6,71%, al 20% incrementa un CBR de 11,48%, al 30% es de 14,81%.

- **Influencia del suelo aluvial en la densidad máxima del suelo A-6 (12).**

Se puede observar que la densidad máxima de compactación sufre alteraciones al ser combinados con distintos porcentajes de suelo aluvial, para el suelo natural se tiene un valor de 1,72 gr/cm³, al 10% de suelo aluvial este va aumentando a 1,88 gr/cm³, al

20% la densidad es 1,92 gr/cm³, al 30% es de 1,95 gr/cm³, este aumento del peso seco del suelo natural con aluvial es favorable ya que esto da una mejor compactación.

- **Influencia del suelo aluvial en la humedad óptima del suelo A-6 (12).**

En la humedad óptima al ser combinado con suelo aluvial tiene una tendencia a reducir en cada combinación de 10%, 20% y 30%, teniendo un valor de 15,70% en estado natural del suelo y un 11,22% al 30% de suelo aluvial agregado.

- **Relación de la densidad máxima y humedad óptima del suelo A-6 (12) - suelo aluvial a distintos porcentajes.**

La densidad máxima aumenta y la humedad óptima disminuye según el porcentaje de suelo aluvial agregado al suelo natural en cada combinación, para el suelo natural se tiene una densidad máxima de 1,72 gr/cm³ y una humedad óptima 15,54%, cuando se agrega un 10% de suelo aluvial se tiene un valor de 1,88 gr/cm³ y una humedad óptima de 13,66% , al 20% aumenta un 1,92 gr/cm³ y la humedad óptima disminuye a 11,96%, al 30% se tiene 1,95 gr/cm³ y disminuye la humedad óptima de 11,22%.

3.5.6 Porcentaje recomendable de suelo aluvial para el suelo A-6 (12)

Tabla 3.24 Cantidad recomendable de suelo aluvial para el suelo A-6 (12).

Tipo de suelo	% de aluvial	CBR Promedio		Expansión (%)
		al 100% D. máx.	al 95% D. máx.	
A-6	10%	7.38	6.71	2.27
	20%	12.80	11.48	1.47
	30%	15.93	14.81	1.38

Fuente: Elaboración propia.

Analizando la muestra de suelo A-6 (12), se puede establecer que combinando este suelo con suelo aluvial al 10% es recomendable para mejorar este tipo de suelo, donde capacidad portante CBR es de 6,71%, ya que este valor logra cumplir las normas y características para una capa subrasante.

Tabla 3.25 Clasificación de la subrasante, según el valor de CBR.

Clasificación	CBR
Subrasante muy pobre	< 3%
Subrasante pobre	3% - 6%
Subrasante regular	6% - 10%
Subrasante buena	10% - 20%
Subrasante Muy buena	20% - 30%
Subrasante excelente	> 30%

Fuente: Manual de carreteras suelos, geotecnia-MTC sección suelos y pavimentos

3.6 Presupuesto técnico económico suelo – suelo, suelo – caucho.

3.6.1 Precio unitario suelo - suelo.

Al realizar una estabilización suelo – suelo podemos incluir un método de estabilización mecánica y poder sacar todos los parámetros de costo, ya que este método es uno de los mas económicos que se puede realizar al estar trabajando con un suelo fino, al ser un suelo fino este tendrá que mezclarse con un suelo aluvial seleccionado según las normas del mercado, para una subrasante de 30 cm, con el 10% de suelo aluvial obteniendo un CBR que cumple las especificaciones mínimas para subrasantes.

Tabla 3.26 Presupuesto de una estabilización suelo - suelo.

Análisis de precios unitarios				
Item: Subrasante (Suelo A.6(12)) mejorada con material aluvial al 10%				
m3	MONEDA:	Bs		
DESCRIPCION	UNID.	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO PARCIAL
1. MATERIALES				
material aluvial	m3.	0,03	90,00	2,70
Arcilla	m3.	0,27	15,00	4,05
TOTAL MATERIALES				6,75
2. MANO DE OBRA				
3 Operadores de equipo pesado	hr.	0,96	20,00	19,20
2 Operadores de equipo liviano	hr.	0,64	20,00	12,80
1 Ayudante de maquinaria y equipo	hr.	0,32	16,50	5,28
1 Peon	hr.	0,32	16,50	5,28
SUB TOTAL MANO DE OBRA				42,56
CARGAS SOCIALES (55% a 71.18%)				27,66
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA 14,94%				10,51
TOTAL MANO DE OBRA				80,73
3. EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Cargador frontal 150 HP	hr.	0,04	380,00	15,20
Motoniveladora 140 HP	hr.	0,04	350,00	14,00
Compac/neumática 20Ton	hr.	0,04	300,00	12,00
Cisterna 10,000 Lt.	hr.	0,04	150,00	6,00
Camión utilitario	hr.	0,04	120,00	4,80
Volquete 12M3	hr.	0,45	160,00	72,00
HERRAMIENTAS 5%				4,04
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				128,08
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				
GASTOS GENERALES (10,00% de 1 + 2 + 3)				21,04
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				21,04
5. UTILIDADES				
UTILIDADES (10% de 1 + 2 + 3 + 4)				23,14
TOTAL UTILIDAD				23,14
6. IMPUESTOS				
IMPUESTOS IT (3,09% de 1 + 2 + 3 + 4 + 5)				8,06
TOTAL IMPUESTOS				8,06
COSTO TOTAL DEL ITEM EN BOLIVIANOS				268,83
COSTO TOTAL DEL ITEM ADOPTADO				268,80

Fuente: Elaboración propia.

3.6.2 Precio unitario suelo – caucho.

Al usar caucho granular para nuestra estabilización de material fino encontramos el óptimo de caucho granular de 6,6 % y el CBR máximo de 10 %. Teniendo estos datos podemos incorporar un análisis económico de precio unitario en m³ para una subrasante de 30 cm. Podemos observar que el precio de estabilización suelo - caucho casi duplica a una estabilización suelo – suelo, pero teniendo en cuenta el costo del proceso de reciclado del caucho que aumenta su precio.

Tabla 3.27 Presupuesto de una estabilización suelo - caucho.

Análisis de precios unitarios				
Item: Subrasante (Suelo A.6(12)) mejorada con el óptimo de caucho granular 7,1%				
m3	MONEDA:	Bs		
DESCRIPCION	UNID.	CANTIDAD	PRECIO PRODUCTIVO	COSTO PARCIAL
1. MATERIALES				
Caucho granular	kg	34,86	3,13	108,95
Arcilla	kg	477,84	0,01	4,19
TOTAL MATERIALES				113,14
2. MANO DE OBRA				
3 Operadores de equipo pesado	hr.	0,96	20,00	19,20
2 Operadores de equipo liviano	hr.	0,64	20,00	12,80
1 Ayudante de maquinaria y equipo	hr.	0,32	16,50	5,28
1 Peón	hr.	0,32	16,50	5,28
SUB TOTAL MANO DE OBRA				42,56
CARGAS SOCIALES (55% a 71,18%)				27,66
IMPUESTOS IVA MANO DE OBRA 14,94%				10,51
TOTAL MANO DE OBRA				80,73
3. EQUIPO MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				
Cargador frontal 150 HP	hr.	0,04	380,00	15,20
Motoniveladora 140 HP	hr.	0,04	350,00	14,00
Compac/neumática 20Ton	hr.	0,04	300,00	12,00
Cisterna 10,000 Lt.	hr.	0,04	150,00	6,00
Camion utilitario	hr.	0,04	120,00	4,80
Volquete 12M3	hr.	0,48	160,00	76,80
HERRAMIENTAS 5%				4,04
TOTAL EQUIPO, MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS				132,84
4. GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				
GASTOS GENERALES (10,00% de 1 + 2 + 3)				32,16
TOTAL GASTOS GENERALES Y ADMINISTRATIVOS				32,16
5. UTILIDADES				
UTILIDADES (10% de 1 + 2 + 3 + 4)				35,37
TOTAL UTILIDAD				35,37
6. IMPUESTOS				
IMPUESTOS IT (3,09% de 1 + 2 + 3 + 4 + 5)				12,22
TOTAL IMPUESTOS				12,22
COSTO TOTAL DEL ITEM EN BOLIVIANOS				407,53
COSTO TOTAL DEL ITEM ADOPTADO				407,50

Fuente: Elaboración propia.

3.7 Especificaciones técnicas del caucho

PROYECTO:

Análisis del mejoramiento en la estabilización de suelos finos utilizando suelo aluvial.

1. Definición

Las técnicas de mejoramiento de suelos consisten en modificar las características de un suelo, este método es aplicado para suelos finos que necesitan ser mejoradas las propiedades de resistencia CBR y dar una alternativa solución para subrasantes inadecuados que no cumplan con la norma de especificación técnica.

El procedimiento de este método usado, para mejoramiento de suelo fino combinado con caucho granular está basado en las normas AASHTO y ASTM.

2. Descripción del material

Para seleccionar un buen material de revestimiento debe cumplir las siguientes especificaciones.

El material deberá estar libre de residuos orgánicos o de otro material extraño.

El material se obtendrá de la empresa Andesur ubicado en el barrio la loma y que estos llegan en bolsas de 80kg.

Características: Gránulos y polvo de caucho vulcanizado procedente de la trituración mecánica a temperatura ambiental, de neumáticos fuera de uso.

3. Equipo y maquinaria

Para la trabajabilidad de mezcla homogénea con caucho granular será el uso necesario de:

Cargador frontal 150 HP
Motoniveladora 140 HP
Compac/neumática 20Ton
Cisterna 10,000 Lt.
Camión utilitario
Volquete 12M3

Sin embargo, el listado precedente no puede ser considerado restrictivo o limitativo en cuanto a la provisión de cualquier otro material, herramienta y/o equipo adicional necesario para la correcta ejecución y culminación de los trabajos. En todo caso, el empleo de insumos adicionales a los señalados en la propuesta y que resultasen necesarios durante el periodo de ejecución de la obra correrán por cuenta del Contratista, a fin de que se garantice que los trabajos sean ejecutados y culminados de manera adecuada y a satisfacción de la Supervisión de Obra, aclarando que este aspecto no implicará en ningún caso un costo adicional para la Entidad.

4. Ejecución

La ejecución de terraplenes estará subordinada a los planos y especificaciones proporcionados al CONTRATISTA, a las órdenes de trabajo elaboradas en conformidad con el proyecto y directiva emitidas por el SUPERVISOR.

Una vez, obtenido la arcilla; el material deberá ser identificados por el Contratista y aprobados por el Supervisor, se procederá al aflojamiento de dicho material mediante tractor o retroexcavadora, el material así obtenido será apilado convenientemente para su posterior carguío.

Esparcimiento, homogeneización, conveniente humedecimiento o desecación y compactación del caucho granular con el material fino provenientes de cortes o préstamos para la construcción de la subrasante.

La humedad de compactación para las capas acabadas no deberá estar a más del 3% por encima o por debajo del contenido óptimo de humedad, debiendo efectuarse ensayos prácticos de densidad de acuerdo con las especificaciones AASHTO T-147.

Las densidades de la subrasante, dentro de los límites de la sección de proyecto, serán:

Subrasante en cortes

Los 30 cm. superiores:100% de la densidad máxima dada por el ensayo AASHTO T-180 D.

Subrasante en Terraplenes

Los 60 cms. superiores: 100% de la densidad máxima dada por el ensayo AASHTO T-180 D. Por debajo de los 60 cm. superiores estos terra-plenes deberán compactarse al 95% de la densidad máxima dada por el ensayo AASHTO T-180 D.

Los sectores que no hubieran alcanzado las condiciones mínimas de compactación deberán ser escarificados, homogeneizados, llevados a la humedad adecuada y nuevamente compactados de acuerdo con las densidades exigidas.

Control por el supervisor

- a.** Un ensayo de compactación para la determinación de la densidad máxima según el método AASHTO T-180 D para cada 1.000 m³ del mismo material del cuerpo del terraplén.
- b.** Un ensayo de compactación para la determinación de la densidad máxima según AASHTO T-99 D para cada 200 m³.
- c.** Un ensayo para la determinación de la densidad en sitio para cada 1000 m³ de material compactado, correspondiente al ensayo de compactación referido en a) y un mínimo de dos (2) determinaciones por día.
- d.** Un ensayo de granulometría según AASHTO T-27, límite líquido según AASHTO T-89 y límite de plasticidad según AASHTO T-90, para cada grupo de diez (10) muestras homogéneas sometidas al ensayo de compactación, de acuerdo a lo referido en a).
- e.** Un ensayo de contenido de humedad para cada 100 metros lineales, inmediatamente antes de la compactación.
- f.** Un ensayo del Índice de Soporte de California (CBR) (AASHTO T-193) con la energía del ensayo de compactación AASHTO T-180 D., para cada 800 m³ sometidos al ensayo de compactación referido en b).

El número de los ensayos de compactación podrá ser reducido, siempre que se verifique la homogeneidad del material.

Para la aceptación de cada capa de terraplén serán considerados los valores absolutos de los resultados.

5. Medición

Este ítem será medido en kilogramos y en su estado esponjarlo.

6. Forma de pago

El pago del ítem se hará de acuerdo a la unidad y precio presentado. Este costo incluye la compensación total por todos los materiales, mano de obra, herramientas, equipo empleado y demás incidencias determinadas por ley.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Presentación de resultados

Tabla 4.1 Clasificación de suelos

2da Circunvalación								
Caract.	% que pasa total		Lim. de Atterberg		Clasificación			
	N°40	N°200	LL	IP	A.A.S.H.T.O	I.G	S.U.C.S	Descripción
P1	99,49	97,25	29	12	A-6	12	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad LL<50% y IP>7%
P2	99,92	98,68	29	11	A-6	13	CL	
P3	99,63	98,36	29	17	A-6	13	CL	
P4	99,89	80,41	28	11	A-6	10	CL	
P5	92,17	73,21	20	7	A-4	8	CL	
P6	93,92	72,36	20	8	A-4	8	CL	
P7	89,06	83,00	26	8	A-4	10	CL	
P8	99,19	73,10	21	8	A-4	8	CL	
P9	99,56	94,48	36	13	A-6	12	ML	Limo de baja compresibilidad
P10	99,72	93,89	34	11	A-6	12	CL	Arcillas inorgánicas de baja compresibilidad

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2 Densidad max y contenido de humedad óptimo a diferentes porcentajes

Puntos	P1		P5		P10	
	Cont. Óptimo de humedad (%)	Densidad max	Cont. Óptimo de humedad (%)	Densidad max	Cont. Óptimo de humedad (%)	Densidad max
0%	15,54	1,723	14,92	1,846	15,72	1,71
5%	15,03	1,751	12,37	1,93	15,42	1,75
10%	13,33	1,793	10,33	1,727	12,89	1,76
15%	13,83	1,621	11,22	1,708	13,28	1,62

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3 CBR en diferentes porcentajes

Puntos		P1		P5		P10	
		CBR 95% D.max	CBR 100% D.max	CBR 95% D.max	CBR 100% D.max	CBR 95% D.max	CBR 100% D.max
Porcentaje de caucho granular	0%	5,8	4,7	4,9	6,7	4,9	5,7
	5%	9,6	18,8	10,4	16,6	8,0	16,9
	10%	6,7	13,3	9,1	14,6	8,7	13,1
	15%	4,7	11,0	5,9	14,8	4,9	14,7
CBR Máximo %		8,6		10,3		8,8	
% Caucho óptimo		7,1		7,7		7,6	

Fuente: Elaboración propia.

A) Análisis granulométrico

A.1. Calicata P1, Progresiva Km 00+000.

Tabla 4.4 Porcentaje de material que pasa según el diámetro del tamiz de calicata P1

Tamiz		% que pasa la malla
Número	Abertura (mm)	
2 1/2"	75	100
2"	50	100
1 1/2"	37,5	100
1"	25	100
3/4"	19	100
1/2"	12,5	100
3/8"	9,5	100
Nº4	4,75	100
Nº10	2	100
Nº40	0,425	99,49
Nº200	0,075	97,25

Fuente: Elaboración propia.

A.2. Calicata P5, Progresiva Km 02+500.

Tabla 4.5 Porcentaje de material que pasa según el diámetro del tamiz de calicata P5

Tamiz		% que pasa la malla
Número	Abertura (mm)	
2 1/2"	75	100
2"	50	100
1 1/2"	37,5	100
1"	25	100
3/4"	19	100
1/2"	12,5	100
3/8"	9,5	100
Nº4	4,75	100
Nº10	2	100
Nº40	0,425	92,17
Nº200	0,075	73,21

Fuente: Elaboración propia.

A.3. Calicata P10, Progresiva Km 05+000.

Tabla 4.6 Porcentaje de material que pasa según el diámetro del tamiz de calicata P10

Tamiz		% que pasa la malla
Número	Abertura (mm)	
2 1/2"	75	100
2"	50	100
1 1/2"	37,5	100
1"	25	100
3/4"	19	100
1/2"	12,5	100
3/8"	9,5	100
Nº4	4,75	100
Nº10	2	100
Nº40	0,425	99,72
Nº200	0,075	93,89

Fuente: Elaboración propia.

A.4. Contenido de humedad

Tabla 4.7 Resumen del contenido de humedad de los P1, P5 y P10

Contenido de humedad			
Cápsula	P1	P5	P10
Peso de suelo húmedo + Cápsula (gr)	155,06	154,71	148,75
Peso de suelo seco + Cápsula (gr)	152,15	151,22	145,62
Peso de cápsula (gr)	12,5	12,53	12,55
Peso de suelo seco (gr)	139,65	138,69	133,07
Peso del agua (gr)	2,91	3,49	3,13
Contenido de humedad (%)	2,08	2,52	2,35

Fuente: Elaboración propia.

B) Límites de Atterberg

Tabla 4.8 Límites de Atterberg de calicatas P1, P5, P10.

Calicata Progresiva	Límite Líquido	Límite Plástico	Índice de Plasticidad
P1 Km 00+000	29	17	12
P5 Km 02+500	20	13	7
P10 Km 05+000	34	23	11

Fuente: Elaboración propia.

C) Proctor Modificado a condiciones normales

Tabla 4.9 Datos de ensayo Proctor Modificado (0% caucho)

Puntos	Calicata Progresiva	Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido Óptimo de Humedad (%)
P1	Km 00+000	1,72	15,50%
P5	Km 02+500	1,85	14,90%
P10	Km 05+000	1,71	15,70%

Fuente: Elaboración propia.

D) Proctor Modificado con adición de 5% de caucho granular

Tabla 4.10 Datos de ensayo Proctor modificado (5% caucho)

Puntos	Calicata Progresiva	Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido Optimo de Humedad (%)
P1	Km 00+000	1,75	15,00%
P5	Km 02+500	1,93	12,40%
P10	Km 05+000	1,75	15,40%

Fuente: Elaboración propia.

E) Proctor Modificado con adición de 10% de caucho granular

Tabla 4.11 Datos de ensayo Proctor modificado (10% caucho)

Puntos	Calicata Progresiva	Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido Optimo de Humedad (%)
P1	Km 00+000	1,79	13,30%
P5	Km 02+500	1,73	10,30%
P10	Km 05+000	1,76	12,90%

Fuente: Elaboración propia.

F) Proctor Modificado con adición de 15% de caucho granular

Tabla 4.12 Datos de ensayo Proctor modificado (15% caucho)

Puntos	Calicata Progresiva	Densidad seca máxima (gr/cm ³)	Contenido Optimo de Humedad (%)
P1	Km 00+000	1,62	13,80%
P5	Km 02+500	1,71	11,20%
P10	Km 05+000	1,62	13,30%

Fuente: Elaboración propia.

G) CBR a condiciones normales

Tabla 4.13 Capacidad de soporte a condiciones normales

Puntos	Calicata Progresiva	95% MDS (0,1")	100% MDS (0,1")
P1	Km 00+000	5	6
P5	Km 02+500	5	7
P10	Km 05+000	5	6

Fuente: Elaboración propia.

H) CBR con adición 5% de caucho

Tabla 4.14 Capacidad de soporte con adición 5% de caucho granular

Puntos	Calicata Progresiva	95% MDS (0,1")	100% MDS (0,1")
P1	Km 00+000	10	19
P5	Km 02+500	10	17
P10	Km 05+000	8	17

Fuente: Elaboración propia.

I) CBR con adición 10% de caucho

Tabla 4.15 Capacidad de soporte con adición 10% de caucho granular

Puntos	Calicata Progresiva	95% MDS (0,1")	100% MDS (0,1")
P1	Km 00+000	7	13
P5	Km 02+500	9	15
P10	Km 05+000	9	13

Fuente: Elaboración propia.

I) CBR con adición 15% de caucho

Tabla 4.16 Capacidad de soporte con adición 15% de caucho granular

Puntos	Calicata Progresiva	95% MDS (0,1")	100% MDS (0,1")
P1	Km 00+000	5	11
P5	Km 02+500	6	15
P10	Km 05+000	5	15

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Análisis de resultados

El presente capítulo tiene como objetivo reportar e interpretar los resultados obtenidos tras la estimación de la densidad máxima, humedad óptima y CBR realizados con el caucho reciclado en varios porcentajes y sin adición de caucho, mediante 4 muestras de 0%, 5%, 10% y 15% de caucho granular en 3 puntos del tramo, haciendo un total de 12 ensayos de CBR y 12 ensayos de compactación.

4.3 Análisis del suelo

Se realizó los ensayos de: Análisis granulométrico mediante tamizado, según Norma ASTM 0421, límite líquido y límite plástico según norma ASTM D 421. Los resultados del análisis granulométrico se presentan en la Tabla 4.4, Tabla 4.5 y Tabla 4.6; los resultados del ensayo de límite líquido y límite plástico se presentan en las Tabla 4.7, en base a los datos de estas tablas se procesó la Tabla 4.16. que nos permito clasificar el suelo según AASHTO y SUCS. (Braja, 2001).

Tabla 4.17 Características del suelo de la avenida 2da circunvalación, y su clasificación según AASHTO y SUCS.

Tamiz		% que pasa la malla		
Número	Abertura (mm)	Muestra Calicata P1	Muestra Calicata P5	Muestra Calicata P10
N°40	0,425	99,49	92,17	99,72
N°200	0,075	97,25	73,21	93,89
Límite líquido (LL)		29	20	34
Límite plástico (LP)		17	13	23
Ind. de plasticidad (IP)		12	7	11
Clasificación AASHTO		A – 6 (12)	A – 4 (8)	A – 6 (12)
Clasificación SUCS		CL	CL	CL

Fuente: Elaboración propia.

Según datos obtenidos, presentados en la Tabla 4.17, el suelo se clasifico de dos formas: Clasificación AASHTO: A-4 (8) y A-6 (12). Material limo – Arcillas, inorgánicas de baja compresibilidad ($LL < 50\%$ y $IP > 7\%$), ya que los porcentajes que pasan la malla No 200 es mayor a 35%, estos suelos tienen un índice de plasticidad ligeramente plástico.

Clasificación SUCS: Dado que más del 50% pasan por la malla No 200, y teniendo en cuenta la carta de plasticidad, se determinó que los suelos son del tipo CL. Arcillas inorgánicas de baja plasticidad.

4.4 Análisis de comparación de los ensayos de compactación realizados con el caucho granular reciclado en varios porcentajes.

Tabla 4.18 Valores óptimos de Densidad seca y Contenido de humedad

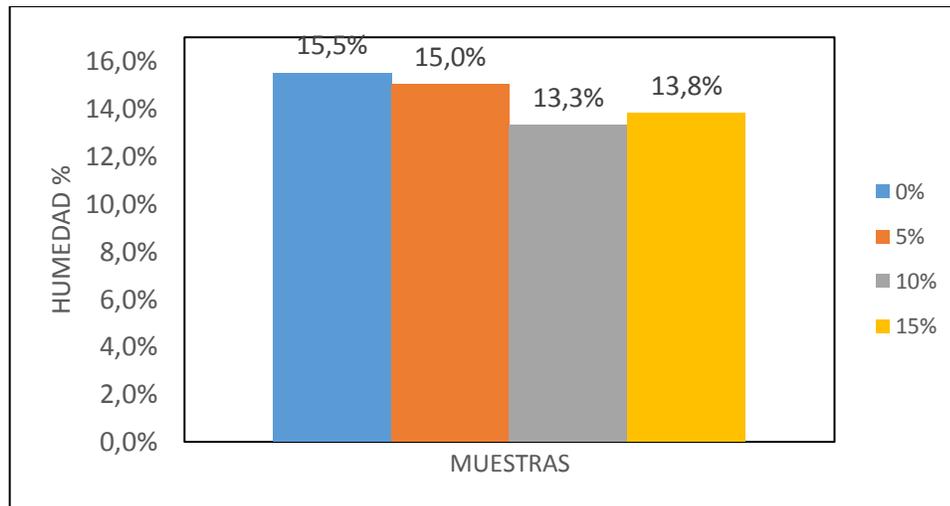
Ensayos		Densidad seca máxima (gr/cm ³)			Contenido Optimo de Humedad (%)		
		P1	P5	P10	P1	P5	P10
Calicata Progresiva		Km 00+000	Km 02+500	Km 05+000	Km 00+000	Km 02+500	Km 05+000
Porcentaje de caucho granular (%)	0 %	1,72	1,85	1,71	15,54	14,92	15,72
	5 %	1,75	1,93	1,75	15,03	12,37	15,42
	10 %	1,79	1,73	1,76	13,33	10,33	12,89
	15 %	1,62	1,71	1,62	13,83	11,22	13,28

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4.18 nos muestran los valores de la densidad seca máxima en los 3 puntos estudiados y como así sus contenidos de humedad óptimo.

Contenido de humedad óptimo

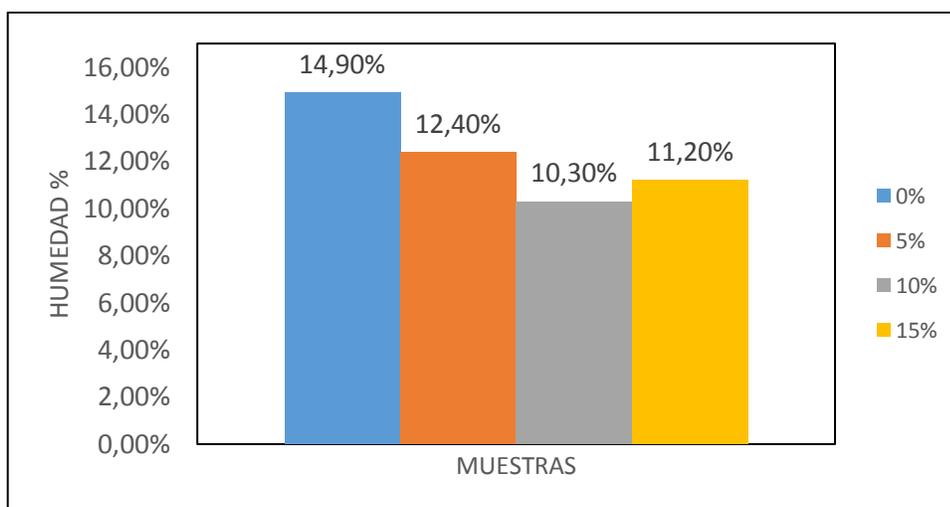
Figura 4.1 Contenido de humedad óptimo con varios % de caucho Punto 1



Fuente: Elaboración propia.

Podemos observar que en el punto 1 la humedad máxima se encuentra en condiciones normales y la mínima cuando adicionamos un 10% de caucho granular al suelo fino.

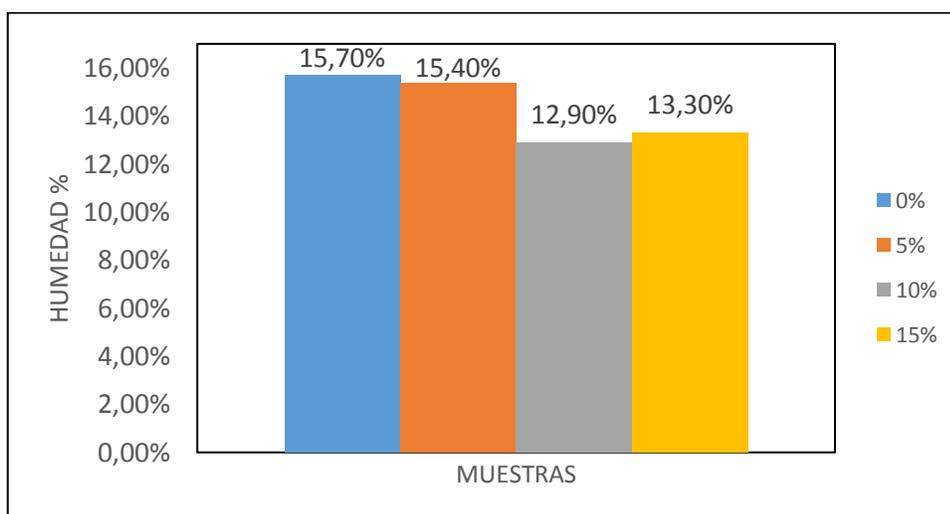
Figura 4.2 Contenido de humedad con varios % de caucho Punto 5



Fuente: Elaboración propia.

Podemos observar que en el punto 5 la humedad máxima se encuentra en condiciones normales y la mínima cuando adicionamos un 10% de caucho granular al suelo fino.

Figura 4.3 Contenido de humedad con varios % de caucho Punto 10



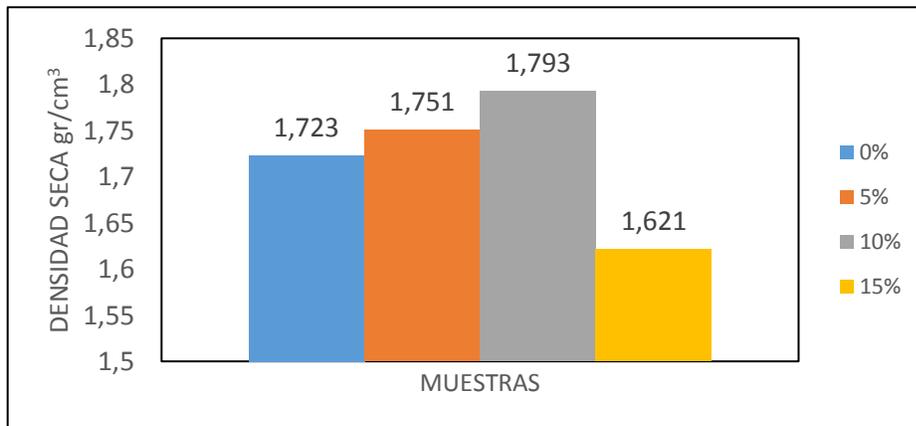
Fuente: Elaboración propia.

Podemos observar que en el punto 10 la humedad máxima se encuentra en condiciones normales y la mínima cuando adicionamos un 10% de caucho granular al suelo fino.

En síntesis, el ensayo de compactación podemos observar que el contenido de humedad va disminuyendo hasta ciertos porcentajes de caucho y vuelve a subir a medida que se aumenta más el porcentaje de caucho.

Densidad seca máxima

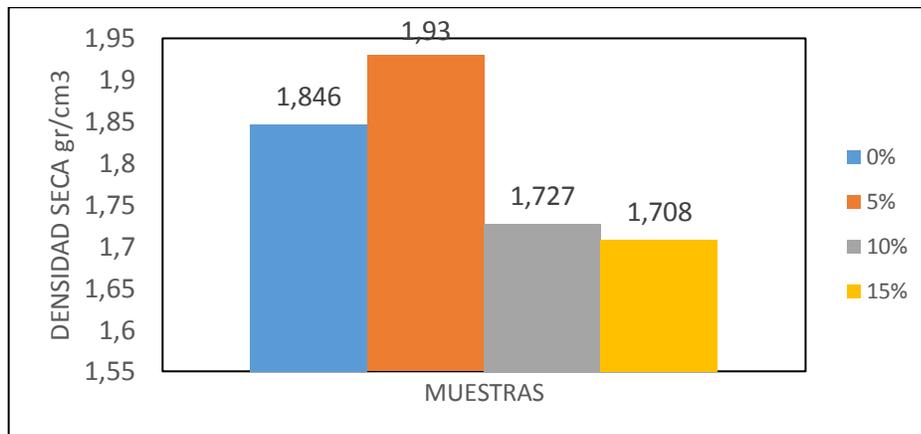
Figura 4.4 Densidad máxima seca con varios % de caucho Punto 1



Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la densidad seca mayor del punto 1 se encuentra cuando adicionamos un 10% de caucho granular, y el mínimo adicionando 15% de caucho granular.

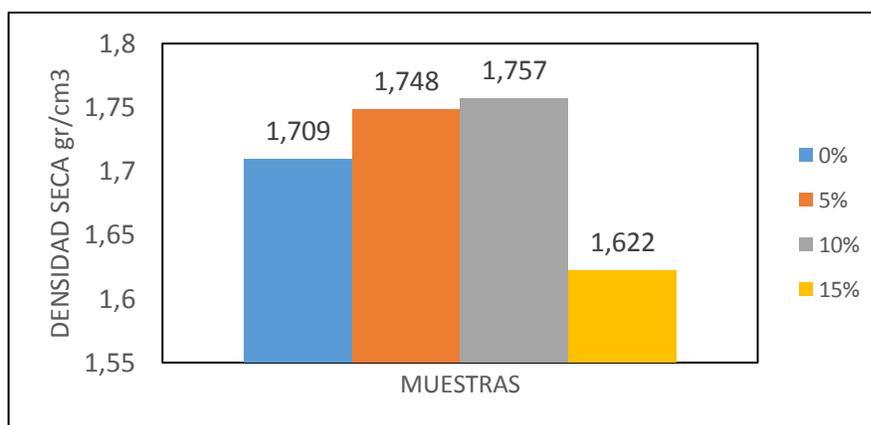
Figura 4.5 Densidad máxima seca con varios % de caucho Punto 5



Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la densidad seca mayor del punto 5 se encuentra cuando adicionamos un 5% de caucho granular, y el mínimo adicionando 15% de caucho granular.

Figura 4.6 Densidad máxima seca con varios % de caucho Punto 10



Fuente: Elaboración propia.

Se observa que la densidad seca mayor del punto 10 se encuentra cuando adicionamos un 10% de caucho granular, y el mínimo adicionando 15% de caucho granular.

En el ensayo de la compactación en el contenido de humedad para el punto 1 tenemos un máximo de 15,54% y un mínimo de 13,33% y densidad seca máxima de 1,79 (gr/cm³) y un mínimo de 1,62 (gr/cm³), para el punto 5 tenemos un máximo de 14,92% y un mínimo de 10,33% y densidad seca máxima de 1,93 (gr/cm³) y un mínimo de 1,71 (gr/cm³), para el punto 10 tenemos un máximo de 15,72% y un mínimo de 12,89% y densidad seca máxima de 1,76 (gr/cm³) y un mínimo de 1,62 (gr/cm³),

4.5 Análisis de comparación de los ensayos de CBR realizados con el caucho reciclado en varios porcentajes y sin adición de caucho

Se realizó las pruebas CBR basado en la norma ASTM D 1883, para cada una de las muestras, los resultados se muestran en la Tabla 4.18.

El Manual de Carreteras "Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos" - Sección: Suelos y Pavimentos, especifica que los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante, en una profundidad no menor de 0.60 m, deberán ser suelos adecuados y estables con CBR $\geq 3\%$ al ser suelos finos.

En el ensayo de CBR son valores que aumentan y disminuyen, de acuerdo a lo señalado por el manual de carreteras los suelos en estudio en condiciones normales (0% de caucho) pueden ser como material de subrasante pero en una categoría o clasificación pobre,

puesto que poseen un CBR mínimo de 4,7 % y un máximo de 6,7 % de acuerdo a los datos obtenido de las muestras de los 3 puntos.

Mientras que en el ensayo del CBR incluyendo el caucho granular como adición en porcentajes de 5%, 10% y 15% también son valores que aumentan y disminuyen su resistencia analizaremos al 95% MDS (0,1"). Para el punto 1 tenemos un máximo de 9,6% al agregar 5% de caucho y un mínimo de 4,7% al agregar 15% de caucho, Para el punto 5 tenemos un máximo de 10,4% al agregar 5% de caucho y un mínimo de 4,9% al agregar 0% de caucho, para el punto 10 tenemos un máximo de 8,7% al agregar 10% de caucho y un mínimo de 4,9% al agregar 15%.

Los resultados de los ensayos CBR basado en la norma ASTM D 1883, obtenidos a partir de la adición de 5%, 10% y 15% de caucho granular, en peso a los suelos finos se muestran en la Tabla 4.18.

Esta combinación de suelos finos puede ser utilizada como subrasante de carreteras con fines constructivos de pavimentos, los ensayos de laboratorio se obtuvieron un CBR mayor a 3 % en todos los puntos estudiados adicionando diferentes porcentajes de caucho, cumplen con lo establecido en la norma para subrasantes con suelos finos.

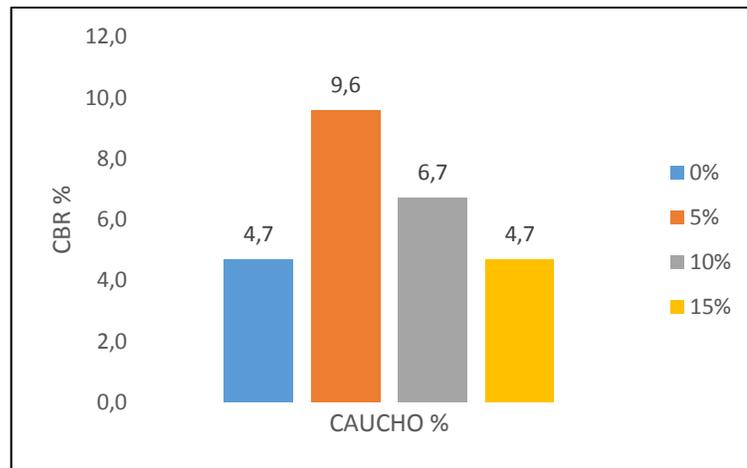
Al obtener estos valores de CBR podemos encontrar un valor máximo de CBR y un valor óptimo de caucho granular, que serían los resultados finales y buscados en este proyecto.

Tabla 4.19 Valores de CBR a diferentes porcentajes

Puntos		P1		P5		P10	
CBR		CBR 95% D.max	CBR 100% D.max	CBR 95% D.max	CBR 100% D.max	CBR 95% D.max	CBR 100% D.max
Porcentaje de caucho granular	0%	5	6	5	7	5	6
	5%	10	19	10	17	8	17
	10%	7	13	9	15	9	13
	15%	5	11	6	15	5	15

Fuente: Elaboración propia.

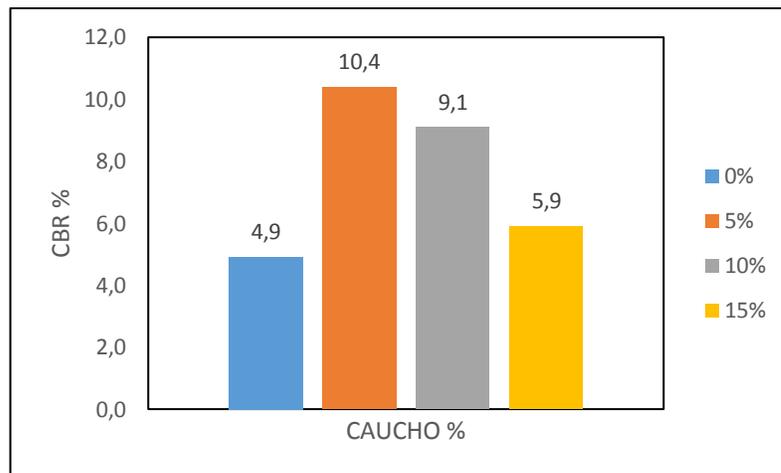
Figura 4.7 CBR vs % Caucho Punto 1



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.7 se observa que el CBR de mayor valor esta cuando adicionamos un 5% de caucho granular y el mínimo cuando adicionamos 15%.

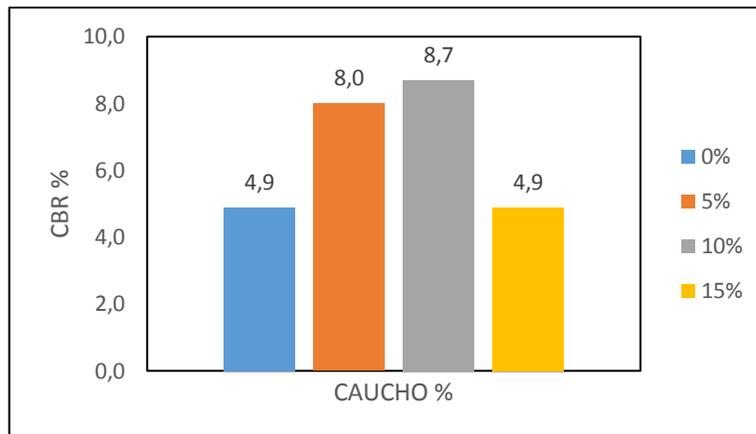
Figura 4.8 CBR vs % Caucho Punto 5



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.8 se observa que el CBR de mayor valor esta cuando adicionamos un 5% de caucho granular y el mínimo en condiciones normales.

Figura 4.9 CBR vs % Caucho Punto 10



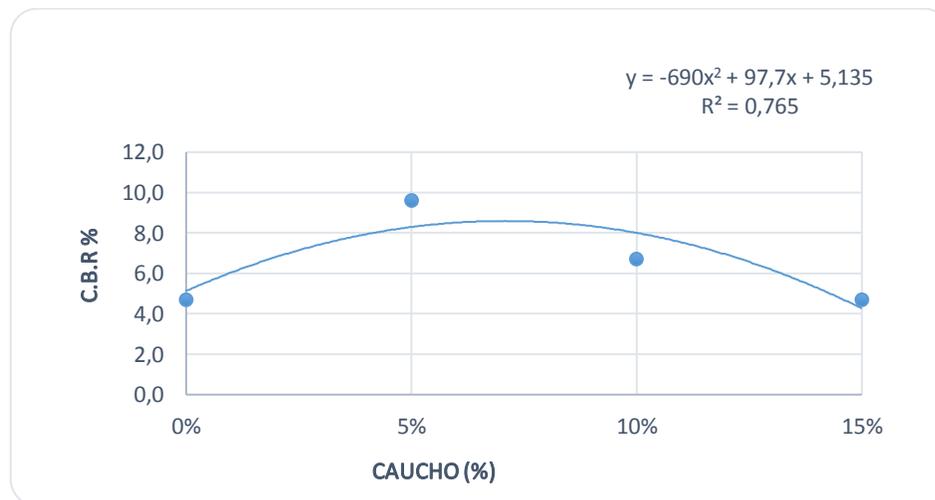
Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.7 se observa que el CBR de mayor valor esta cuando adicionamos un 10% de caucho granular y el mínimo cuando adicionamos 15%.

Se evidencia que la resistencia para una subrasante a medida que se le va adicionando caucho en porcentajes diferentes su resistencia aumenta y luego decrece formando una curva del cual podemos obtener un contenido óptimo de caucho granular.

Relación CBR y Caucho granular

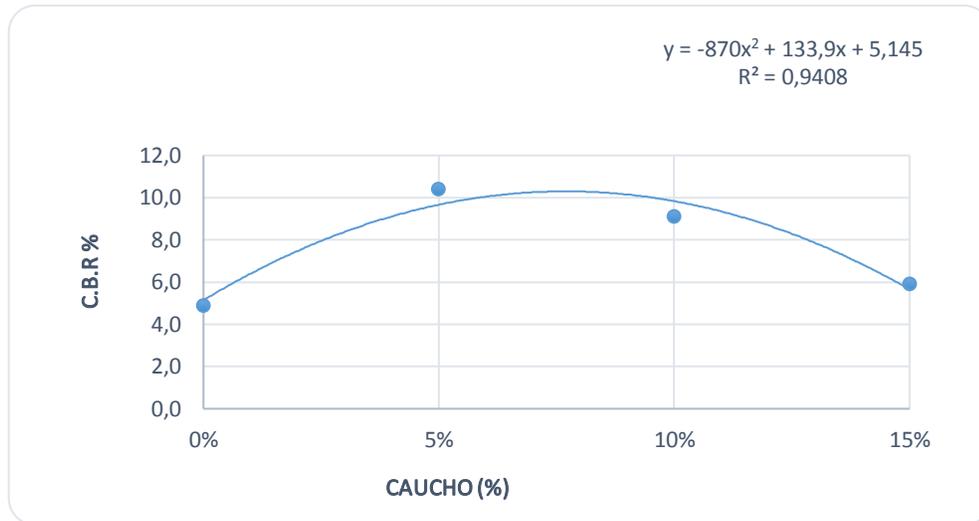
Figura 4.10 Curva CBR – Caucho granular Punto 1



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.10 vemos la curva de CBR vs % de caucho, del cual obtenemos el contenido óptimo de caucho granular de 7,1% y un CBR máximo de 8,6%.

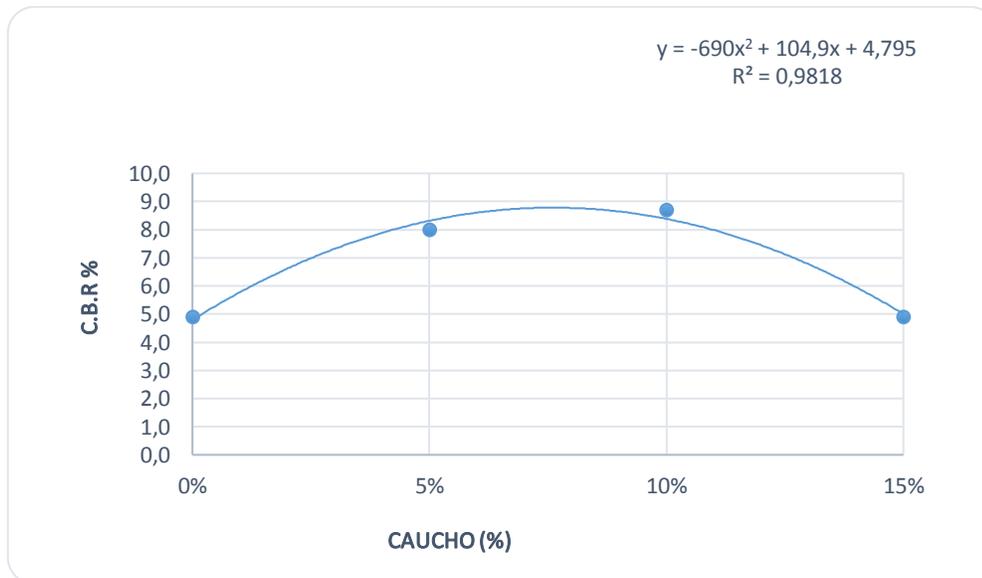
Figura 4.11 Curva CBR – Caucho granular Punto 5



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.11 vemos la curva de CBR vs % de caucho, del cual obtenemos el contenido óptimo de caucho granular de 7,7% y un CBR máximo de 10,3%.

Figura 4.12 Curva CBR – Caucho granular Punto 10



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 4.12 vemos la curva de CBR vs % de caucho, del cual obtenemos el contenido óptimo de caucho granular de 7,6% y un CBR máximo de 8,8%.

Tabla 4.20 CBR máximo y % de caucho óptimo

Puntos	Punto 1	Punto 5	Punto 10
CBR Máximo	8,6	10,3	8,8
% Caucho óptimo	7,1	7,7	7,6

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 4.20 se muestran los valores calculados a travez de la curva CBR % vs Caucho %, podemos observar que para el punto 1 tenemos un CBR máximo de 8,6 % y un porcentaje de caucho granular de 7,1 %, para el punto 5 tenemos un CBR máximo de 10,3 % y un porcentaje de caucho granular de 7,7 %, para el punto 10 tenemos un CBR máximo de 8,8 % y un porcentaje de caucho granular de 7,6 %.

Analizando los valores máximos del CBR vemos que estos valores están dentro del rango mínimo para subrasantes que deben ser mayores a 3,0%, concluyendo que es factible trabajar con estos porcentajes obtenidos

4.6 Análisis técnico económico suelo – suelo y suelo – caucho

Tabla 4.21 Comparación de precios

Estabilización	Suelo-caucho	Suelo-suelo
Material	Caucho granular	Ripio aluvial
Precio (bs/m ³)	407,50	268,80

Fuente: Elaboración propia.

Al analizar la diferencia que existe entre estas dos estabilizaciones en precio, observamos que al mezclar con caucho granular en una proporción óptima su precio es casi al doble que de una estabilización con material aluvial, también vemos que el CBR es mas elevado a comparación que con un materia aluvial, ambos CBR están dentro de las normas para una subrasante regular que van de 6% a 10%.

Podemos resumir que ambos son factibles y cumplen con aumentar su resistencia de CBR pero en cuestiones de costo el material aluvial es el mas económico ya que con un precio de 262,30bs podemos estabilizar 1 m³ de subrasante de 0,30 m de espesor. Y con un coste de 400,90bs podemos establizar 1m³ de subrasante de 0,30 m de espesor.

4.7 Verificación de hipótesis

Mediante el análisis de los resultados alcanzados en el laboratorio se pudo determinar que a medida que vamos aumentando el polímero reciclado caucho para un suelo fino se pudo determinar que las propiedades mecánicas tienen una influencia positiva ya que podemos encontrar un valor máximo o contenido óptimo de caucho.

Verificamos mediante los ensayos de laboratorio que si mejoran sus propiedades de resistencia mecánica al agregar en diferentes porcentajes de caucho granular y vemos que es factible este método para la estabilización de subrasantes de carreteras.

CAPÍTULO V CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Después de realizados los trabajos de campo y obtenidos los resultados de los ensayos de laboratorio se pueden definir las siguientes conclusiones:

5.1 Conclusiones

- De la teoría de estabilización de suelos se definió conceptos y adquirió conocimientos de la cual se realizó un análisis minucioso de los componentes del objeto de estudio de la investigación.
- Se extrajo las muestras de los suelos finos y se caracterizó mediante ensayos de laboratorio de granulometría, contenido de humedad, límites de Atterberg, compactación y finalmente CBR, según guía de laboratorio regidas en base a la norma AASHTO y ASTM aplicadas en nuestro medio.
- Se mejoró los suelos arcillosos de la carretera de la avenida 2da circunvalación con caucho granular de neumáticos para fines constructivos de pavimentos, cumpliendo las especificaciones mínimas de manual de carreteras, como material de subrasante.
- Los límites de Atterberg están dentro de las normas de clasificación de suelos finos al pasar más del 35% del tamiz N# 200. Los límites de Atterberg en condiciones normales nos dan un $IP \geq 7$, considerando una plasticidad media suelo arcilloso.

2da Circunvalación					
Ensayos	P1	P2	P3	P4	P5
Límite líquido LL	29	29	29	28	20
Límite plástico LP	17	18	12	17	13
Ind. de plasticidad IP	12	11	17	11	7
2da Circunvalación					
Ensayos	P6	P7	P8	P9	P10
Límite líquido LL	20	26	21	36	34
Límite plástico LP	13	18	13	23	23
Ind. de plasticidad IP	8	8	8	13	11

- La granulometría que obtuvimos se clasifica en suelos según AASHTO en un suelo para el P1: A-6 (12), P5: A-4 (8) y P10: A-6 (12) suelos de baja plasticidad y por el

método de SUCS obtuvimos un suelo de tipo CL arcilla inorgánica de baja compresibilidad $LL < 50\%$ y $IP > 7\%$, con lo cuales podemos trabajar para un subrasante.

- En cuanto a la compactación de los suelos finos combinados con caucho granular, se aplicó los porcentajes de 5%, 10%, y 15% en base de tanteos por sugerencia de personal profesional.
- Para el contenido óptimo de humedad analizamos en condición normal y en diferentes porcentajes de caucho granular, agregando diferentes cantidades de agua para así obtener el óptimo, donde los resultados son aceptables al ser suelos finos. Para la densidad seca máxima se encuentra a partir del contenido de humedad óptimo, comenzando con el natural y seguidamente agregando porcentajes de 5%, 10%, y 15% de caucho granular, los valores obtenidos se presentan en la siguiente tabla.

Ensayos		Densidad seca máxima (gr/cm ³)			Contenido Óptimo de Humedad (%)		
		P1	P5	P10	P1	P5	P10
Calicata Progresiva		Km 00+000	Km 02+500	Km 05+000	Km 00+000	Km 02+500	Km 05+000
Porcentaje de caucho granular (%)	0 %	1,72	1,85	1,71	15,54	14,92	15,72
	5 %	1,75	1,93	1,75	15,03	12,37	15,42
	10 %	1,79	1,73	1,76	13,33	10,33	12,89
	15 %	1,62	1,71	1,62	13,83	11,22	13,28

- Se determinó la capacidad de soporte de los suelos finos del área delimitada en condición normal o natural y en adición con caucho granular en porcentajes 5%, 10% y 15%, para los 3 puntos en estudio (P1, P5 y P10).
- Debemos saber que para una subrasante la norma nos dice que el CBR debe ser mayor a 3% mínimamente.
- El suelo del P1 A-6 (12) combinado con caucho granular aumenta la capacidad portante, respecto al valor de CBR natural de 4,7%, al añadir un 5% se tiene un 9,6% de su densidad máxima de compactación, al 10% disminuye a un 6,7%, al 15% disminuye a un 4,7%.
- El suelo del P5 A-4 (8) combinado con caucho granular aumenta la capacidad portante, respecto al valor de CBR natural de 4,9%, al añadir un 5% se tiene un

10,4% de su densidad máxima de compactación, al 10% disminuya un 9,1%, al 15% disminuye a un 5,9%.

- El suelo del P10 A-6 (12) combinado con caucho granular aumenta la capacidad portante, respecto al valor de CBR natural de 4,9%, al añadir un 5% se tiene un 8,0% de su densidad máxima de compactación, al 10% incrementa un 8,7%, al 15% disminuye a un 4,9%, que se encuentran en la siguiente tabla.

Puntos		P1		P5		P10	
CBR		CBR 95% D.max	CBR 100% D.max	CBR 95% D.max	CBR 100% D.max	CBR 95% D.max	CBR 100% D.max
Porcentaje de caucho granular	0%	5	6	5	7	5	6
	5%	10	19	10	17	8	17
	10%	7	13	9	15	9	13
	15%	5	11	6	15	5	15

- En el diseño y control de la mejora de suelos con caucho granular fue suficiente la realización de los ensayos básicos usuales en el ámbito de la construcción. Los efectos y utilidad del tratamiento se cuantifican mediante el control de características indirectas como son la determinación de los límites de Atterberg, ensayo de CBR y el ensayo de compactación Proctor.
- Los tratamientos de mejora de suelos finos realizados con porcentajes de caucho granular añadidos en valores de 5%, 10% y 15% sobre el suelo, los efectos que se consiguen son directamente proporcionales a dichas cantidades.
- Al encontrar los diferentes valores de CBR en condiciones normales y al 5%, 10%, y 15% de caucho granular podemos encontrar el óptimo que sería el objetivo que estamos buscando, y esos valores están dentro del rango para una subrasante.

Puntos	Punto 1	Punto 5	Punto 10
CBR Máximo (%)	8,6	10,3	8,8
Caucho óptimo (%)	7,1	7,7	7,6

- La adición de caucho granular a suelo finos es la alteración del comportamiento mecánico de un material para conseguir una resistencia estructural que podría

decirse es impropia de dicho tipo de material, podemos decir que cumple con el objetivo que buscamos.

- Se realizó el análisis económico de la estabilización con el caucho granular para poder evaluar los costos que este implicaría en la aplicación práctica en carreteras, sacando un presupuesto por m^3 .
- Se incluyó una estabilización mecánica de material aluvial a nuestro suelo fino en diferentes porcentajes, obteniendo los resultados de granulometría, límites de atterberg, compactación y CBR, Para realizar un análisis económico de este método de estabilización sacando un presupuesto de cuanto se gastara por m^3 .
- Al hacer el análisis económico de estos dos métodos: estabilización suelo – caucho obtuvimos un precio por m^3 de 407,50 bs con un CBR máximo de 7,1%. Estabilización suelo – suelo, esta estabilización es la mas económica es por eso que se realizó para así poder comparar los precios que existirían de un método con otro por m^3 , esta estabilización suelo – suelo nos produce un gasto de 268,80 bs por cada m^3 con un CBR máximo de 6,7%.
- Analizando estos dos precios obtenidos vemos que al usar caucho granular duplicamos al precio que al usar material aluvial, pero ambos cumplen en aumentar su resistencia portante cumpliendo las especificaciones técnicas mínimas que pide una subrasante.
- El reciclaje de residuos neumáticos se presenta como una solución saludable para el medio ambiente, inocua para el ser humano y multifuncional para el área de la construcción, porque queda demostrada la viabilidad de la aplicación exitosa de este residuo, pues, ofrece múltiples posibilidades para la fabricación de insumos, con ventajas que son innumerables y rentables, que resultan coherente con un desarrollo sustentable y sostenido de nuestro país.

5.2 Recomendaciones

- Es esencial determinar las características de los materiales con los que se va a realizar la estabilización, ya que estas características varían dependiendo de su origen.
- Para la obtención de contenidos de humedad en la muestra con adición de caucho se recomienda secar la muestra a una temperatura constante de 60 grados centígrados; debido a que temperaturas mayores el caucho se quema y se tiene una disminución del peso de la muestra.
- Al momento de realizar el ensayo de granulometría se recomienda revisar aberturas de los tamices que estén completamente libre de material ya que esto no sería favorable para los resultados.
- La utilización de un material proveniente del reciclaje ayudaría a la disminución en la explotación de materiales no renovables.
- Estudiar cuidadosamente las normas requeridas, tanto acerca de los instrumentos de laboratorios a utilizar como de la muestra, para minimizar errores que se pudieran presentar en los resultados.
- Verificar el volumen de los moldes, ya que pueden afectar en la densidad seca del material en estudio.
- En el equipo de la prensa para determinar capacidad de soporte, se recomienda verificar la calibración del anillo dinamométrico, con una ecuación de $R^2 = 1$ y el funcionamiento correcto del equipo al momento de realizar los ensayos de laboratorio.
- Realizar adecuadamente el ensayo del CBR siguiendo la norma ASTM 1883, para conseguir mejores resultados y así evitar que los moldes tengan vacíos y afecten la resistencia.
- Compactar adecuadamente los cilindros para eliminar las partículas de aire y así poder obtener resultados confiables como es el contenido de humedad óptimo que servirá para la realización del CBR.
- Al momento de hacer la lectura con el extensómetro, verificar la calibración y anotar bien los datos de las lecturas.
- Este trabajo de investigación será un aporte de manera positiva, ya que es de

importancia tener conocimiento de las características de un suelo para subrasante.

- Al momento de combinar los diferentes porcentajes se tiene que tener cuidado en pesar las proporciones adecuadas.
- Al hacer precios unitarios revisar de que año es la revista de precios para no tener errores al momento de sacar el precio final.